

Job Shop에서의 주문 투입 통제 방안 연구

최기범 · 김성식 · 이홍철

고려대학교 산업공학과

A Study on the Order Release Method in Job Shop

Ki Beom Choi · Sung Saick Kim · Hong Chul Lee

This paper deals with the order release problem for minimizing weighted earliness and tardiness as well as Work In Process (WIP) in dynamic job shop environments. A newly designed hierarchical order release mechanism is developed for efficient real-time control of the earliness/tardiness and WIP. The hierarchical order release mechanism consists of the order release plan and the order release control which is composed of two procedures. The experimental results show that the proposed order release mechanism is superior to other four order release mechanisms under overall simulation conditions of utilization rate, due-date allowances, and earliness/tardiness cost structures. In addition, the difference of total cost among the four dispatching rules is much more reduced in the proposed order release mechanism than in other release mechanisms.

1. 연구의 배경 및 목적

다양한 제품 요구와 짧아진 제품 수명 주기로 특징 지워지는 현대의 생산 환경은 기업간의 생존 경쟁을 갈수록 치열하게 만들고 이에 따라 더욱 효율적인 생산 시스템이 요구되고 있다. 최근에 주문의 작업 조기 완료시간(Earliness) 및 순수 작업 지연 시간(Tardiness) 그리고 재공품 재고(Work In Process)를 최소화하기 위한 생산 계획 및 통제 방안 개발에 많은 노력이 경주되고 있는 것도 이러한 요구에 부합하는 것이라고 할 수 있다.

개별생산(Job Shop) 시스템의 생산 계획 및 통제시 주문의 납기 지연에 따른 비용 손실은 과거에도 자주 고려되었지만 상대적으로 재공품 재고나 작업 조기 완료에 따른 완제품 재고(Finished Goods Inventory)의 비용 손실은 최근까지도 충분히 반영되지 않았었다. 그러나 재공품 재고 및 완제품 재고의 증가는 관리 비용(Holding Cost)의 증가를 가져올 뿐만 아니라 그만큼 투자된 자본이 빠르게 회수되지 않고 묶여 있다는 것을 의미한다. 또한 물류 흐름을 복잡하게 하여 주문의 생산 리드 타임을 증가시키고 긴급 주문의 우선적인 자원(기계, 작업자 등) 사용을 방해하는 문제점들이 발생한다.

주문의 작업 조기 완료 시간과 순수 작업 지연 시간을 최소화하는 생산 계획 및 통제 방안에 대해서는 많은 연구가 진행되어왔지만 주로 하나의 기계(One-machine)나 동종 기계들(Parallel Machine)을 대상으로 한 정적인 일정 계획 수립 방법에 대

하여 다루고 있다.

Baker와 Scudder(1990)의 조사 논문을 보면 기존 연구 결과들이 자세히 정리되어 있는데 이들의 연구 결과들 중 가장 중요한 것은 주문들의 납기가 모두 동일한(Common Due Date) 경우에 성립하는 최적 일정 계획 형성의 2가지 충분 조건을 들 수 있다. 즉, 최적 일정 계획은 반드시 V 자형의(V Shape) 작업 순서를 형성한다는 것과 작업간에 인위적인 지연(Inserted Idle Time)을 고려할 필요가 없다는 것이다. 여기서 V 자형 작업 순서란 일정 계획에서 주문의 완료 시점이 납기보다 빠른 주문들은 가공 시간을 기준으로 내림차순(Nonincreasing Order)의 순서로 그리고 주문의 완료 시점이 납기보다 늦은 주문들은 가공 시간을 기준으로 오름차순(Nondecreasing Order)의 순서로 작업되는 것을 말한다. 그러나 이러한 연구 결과들은 주문의 납기가 다양하고 여러 가지 경로와 기계를 거치는 동적이고 복잡한 현실 생산 시스템에서는 적용되기 어려운 문제점이 있다.

이에 따라 최근에 관심이 고조되고 있는 또 다른 접근 방법으로서 주문의 공장 투입 시점(Release Time)을 효과적으로 조절하여 공장의 재공품 재고량과 주문의 작업 조기 완료 시간 및 순수 작업 지연 시간을 최소화하는 방안에 대한 연구(Morton 등, 1988; Ragatz와 Mabert, 1988; Rohleder와 Scudder, 1993)를 들 수 있다. 이들이 제시한 주문 투입 통제 방안은 공장의 상황 정보를 바탕으로 실시간(Real-Time)으로 주문 투입 시점을 결정할 수 있기 때문에 복잡한 현실 생산 시스템에도 적용 가능한 장점이 있다. 특히 컴퓨터를 비롯한 자동화 설비의

확산에 따라 공장의 작업 현황을 실시간으로 획득할 수 있게 된 생산 환경의 변화는 이러한 상황 정보를 활용한 보다 효과적인 주문 투입 통제 방안의 개발을 가능하도록 하고 있다.

본 연구에서도 개별 생산 환경에서 순수 작업 지연 시간과 작업 초기 완료 시간의 가중값(Weight)에 따른 비용을 최소화 하고 동시에 공장 내의 재공품 재고를 일정 수준 이하로 유지 하는 실시간 주문 투입 시점 결정 방안을 제시하고자 한다. 그리고 공장의 작업 부하(가동률)가 변화될 때 이를 효과적으로 반영할 수 있는 방안을 제시함으로써 생산 환경의 변화에 안정적(Robust)으로 적응할 수 있도록 한다.

본 연구에서 제시하는 실시간 주문 투입 시점 결정 방안은 주문 투입 계획과 2 단계로 이루어진 주문 투입 통제 (주문의 Pool 투입 통제, 주문의 공장 투입 통제) 방안으로 구성된다. <그림 1>은 각 모듈에서 수행되는 기능과 각 모듈간의 작업 흐름을 보여주고 있다.

주문 투입 계획에서는 발견적 알고리즘(Heuristic Algorithm)을 사용하여 새로운 주문이 도착할 때마다 기존 주문들을 포함하여 각 일정 단위 기간별로 투입될 주문을 결정한다. 이때 투입 주문의 결정은 각 단위 기간별 가용 생산 용량을 고려하여 장기적인 관점에서 전체 주문의 예상 작업 초기 완료 시간과 순수 작업 지연 시간의 합이 최소화 되도록 수립된다.

주문의 Pool 투입 통제에서는 단위 기간별 주문 투입 계획을 기준으로 공장의 작업 상황을 고려하여 각 주문의 예상 작업 체류 시간을 계산하고 이에 따라 주문의 작업 초기 완료 시간과 순수 작업 지연 시간이 최소화되는 시점에 주문을 Pool에 투입한다. Pool이란 곧 공장에 투입될 주문들이 대기하고 있는 가상의 장소를 의미한다. 주문의 공장 투입 통제는 Pool에 존재하는 주문들에 대하여 공장의 작업 상황 정보와 주문의 여유 시간 정보를 기준으로 공장 투입 여부를 결정함으로써 공장의 재공품 재고량과 주문의 순수 작업 지연 시간을 관리한다.

다음 2절에서는 기존 연구에 대하여 고찰하고 3절에서는 주문 투입 계획을 위한 발견적 알고리즘에 대하여 설명한다. 4절에서는 주문 투입 통제 방안으로서 주문의 Pool 투입 통제 및 주문의 공장 투입 통제 방법을 제시한다. 5절에서는 본 연구의 주문 투입 방안에 대한 예제를 보여 주고 6절에서는 비교 대안과 실험 계획을 설명한다. 그리고 6절에서는 본 연구의 주문 투입 방안에 대한 비교 평가 및 결과 분석이 이루어진다. 마지막으로 7절에서는 본 연구의 결론을 정리한다.

2. 기존 연구

주문 투입 통제의 기본 개념은 주문을 선택적으로 적시에 공장에 투입하여 주문의 납기 준수 및 빠른 생산 그리고 적은 재고 수준을 유지하고자 하는 것이다. Ragatz와 Mabert(1988)는 주문 투입 시점 결정시 사용하는 규칙의 복잡성을 기준으로 주

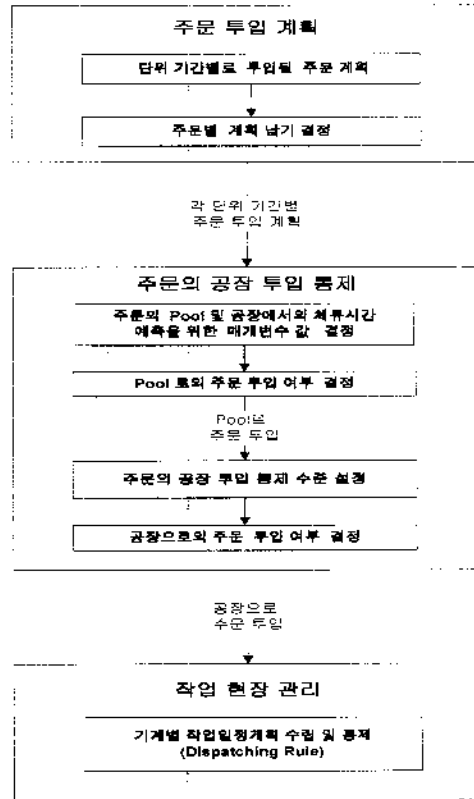


그림 1. 생산 계획 및 통제 시스템의 기능.

문의 정보나 공장의 작업 상황 정보 등을 고려하지 않는 초보적인 방법 (Naive Approach), 납기나 공정수 등의 주문 정보와 공장의 작업 부하량과 같은 공장 상황 정보를 바탕으로 간단한 발견적 기법을 사용하는 계획 요인 방법 (Planning Factor Method) 그리고 가장 복잡한 방법으로서 기계의 제한된 생산 용량을 고려하여 주문의 부하를 시간에 따라 할당하여 투입 시점을 결정하는 제한적 할당 방법 (Finite Loading Method) 등 3가지로 분류하였다.

Ragatz와 Mabert(1988)는 이러한 범주에 속하는 5 가지의 주문 투입 통제 방식들에 대하여 실험하였는데 이들은 계획 요인 방법의 범주에 속하는 MIL (Modified Infinite Load) 방법이 오히려 보다 효과적이라는 것을 보여 주고 있다. 또한 주문 투입 통제를 사용함으로써 단순한 작업 배정 규칙과 복잡한 작업 배정 규칙 간의 성능 차이를 줄일 수 있다고 하였다.

MIL 방법은 주문 정보로서 주문의 공정 수와 공장의 생산 상황 정보로서 주문의 공정 경로상에 대기중인 다른 주문들의 수를 활용하여 공장 투입 시점을 결정하는 방법이다. 따라서 MIL 방법에서는 작업 초기 완료 시간과 순수 작업 지연 시간의 비용에 대한 가중치 정보를 고려할 수 없는 단점이 있다.

Morton 등(1988)은 Ow와 Morton(1989)의 연구를 기초로 MOM (Modified Ow and Morton) 방법을 제안하였는데 이들에 따르면 보다 많은 정보를 사용하는 다른 방안들에 비하여 MOM

방법이 전반적으로 좋은 성능을 보인다고 하였다. MOM 방법은 주문의 총 공정 시간 및 작업 조기 완료 시간과 순수 작업 지연 시간의 비용 가중값 정보 그리고 평균 공정 시간 정보를 사용하여 공장 투입 시점을 계산한다.

Rohleder와 Scudder(1993)는 주문의 순수 작업 지연 시간과 작업 조기 완료 시간에 대한 가중값을 고려한 총 비용을 최소화 하는 문제에서 OpET (Operation Early/Tardy release) 방안을 제시하고 MIL 방법과 MOM 방법을 포함한 주문 투입 통제 방안과 작업 배정 규칙들의 조합에 따른 성능을 비교하였다. 이들은 실험을 통하여 OpET 방안이 상대적으로 다른 방안들에 비하여 안정적이고 우수한 성능을 보여 준다고 하였다. 그러나 OpET 방안은 이들의 실험에서도 알 수 있듯이 다른 방안에 비하여 공장 내 작업 체류 시간과 재공품 재고량을 매우 크게 증가시키는 문제점이 있다. OpET 방법은 다른 주문 투입 통제 방안들과 달리 주문의 공장 투입 시점을 통제하는 것이 아니라 주문의 도착 즉시 공장에 투입한 후 경로상의 각 작업장에서 공정 투입 시점 (Operation Release Time)을 통제한다.

이상에서 언급된 MIL, MOM 그리고 OpET 방안들은 모두 주문의 공장 투입 시점 결정시 공장의 가용한 생산 용량 정보를 고려하지 않는다. 따라서 특정 시점에 공장으로 과도한 작업 부하량이 투입될 수 있는 문제점이 있다. 이밖에 재공품 재고 및 주문의 납기 준수율을 주로 고려한 주문 투입 통제 방법에 대한 연구들도 (Choi 등, 1997; Irastorza와 Deane, 1974; Melnyk 등, 1994; Melnyk과 Ragatz, 1989; Onur과 Fabrycky, 1987; Philipoom과 Fry, 1992; Shimoyashiro 등, 1984) 많이 수행되었다. 이들의 연구 결과에서 밝혀진 주문 투입 통제의 효과는 재공품 재고의 감소, 주문의 공장 작업 체류 시간의 감소, 공장의 작업 부하량 평준화, 주문의 변경에 대한 유연성 증가 등을 들 수 있다.

3. 주문 투입 계획

주문 투입 계획에서는 새로운 주문이 들어올 때마다 장기적인 관점에서 가용한 생산 용량 제약하에 주문들의 예상 작업 조기 완료 시간과 순수 작업 지연 시간의 합이 최소화 되도록 각 단위 기간별로 생산할(공장에 투입될) 주문들을 결정한다. 이것은 주문들의 작업 조기 완료 시간과 순수 작업 지연 시간을 고려하면서 특정 기간에 작업 부하가 과도하게 집중되는 것을 방지함으로써 간접적인 각 기간별 부하 평준화(Load Balance) 효과를 유도하기 위한 것이다.

각 단위기간별 가용 생산 용량은 현 시점으로부터 예측이 불확실한 미래로 갈수록 적게 설정한다. 이것은 인위적으로 공장 투입이 지연되는 주문량을 미래로 갈수록 제한함으로써 향후의 주문 쇄도에 따른 과부하 현상이 심화되는 것을 방지하기 위한 것이다.

각 단위 기간별로 할당된 주문들에 대해서는 계획 납기

(Planned Due Date)를 설정하는데 이것은 주문의 Pool 투입 통제에서 투입 시점 판단의 기초 정보로 사용된다.

3.1 주문 투입 계획의 발전적 알고리즘

주문 투입 계획의 발전적 알고리즘에서는 각 단위 기간의 가용 생산 용량 제약하에서 가능한 한 모든 주문들이 자신의 납기와 가장 가까운 단위 기간에 할당되도록 한다. 이를 위하여 새로이 계획될 주문의 납기로부터 가장 늦은 투입 시점을 구하고 이 시점이 속하는 계획 단위 기간부터 후진방향으로 각 단위 기간의 작업 부하량을 탐색하면서 해당 주문이 할당될 최적의 기간을 선정한다. 이때 작업 부하량이 가용 생산 용량 수준보다 큰 단위 기간에서는 작업 조기 완료 시간과 순수 작업 지연 시간이 최소화되는 방향으로 기존에 계획된 주문과의 조정 작업을 수행한다.

각 단위 기간의 길이는 주문의 총 가공 시간의 합 중에 가장 큰 값보다 크게 설정한다. 만약 단위 기간의 길이가 너무 크게 설정될 경우에는 단위 기간 동안 특정 시점의 작업 부하 집중 여부를 파악하지 못하게 되는 문제점이 있다. 이와 같은 주문 단위의 할당 및 투입 시점 결정은 공정 단위로 작업 시점을 결정하는 제한적인 할당 문제보다 총괄된(Aggregated) 주문 투입 계획을 제공한다. 이것은 공정 단위의 제한적인 할당 방법에 비하여 상황 변화에 훨씬 안정적인 뿐만 아니라 생산 시스템의 규모가 커짐에 따른 실시간 적용의 문제에도 보다 유리하다.

주문 투입 계획 알고리즘의 구체적인 내용은 다음과 같다.

- R_i : 주문 i 가 투입될 계획 단위 기간
- $P_{i,j}$: 주문 i 의 j 공정의 가공 시간
- $a_{i,j,m}$: 주문 i 의 j 공정이 m 작업장에서 작업
계획된 경우 1, 그렇지 않은 경우 0
- n_i : 주문 i 의 공정 수
- AWT : 각 공정에서의 평균 대기 시간
- TB : 계획 단위 기간의 길이
- CT : 현 시점의 계획 구간
- $RS(k)$: k 단위 기간에 투입되기로 계획된 모든
주문들의 집합
- $PC(k)$: k 단위 기간에 허용 가능한 생산 용량
수준
- $CL(m,k)$: k 단위 기간에 m 작업장에서 가용한
생산 용량 = 기계수 $\times TB \times PC(k)$
 k 단위 기간에 계획된 m 작업장에서의
- $L(m,k)$: 총부하량 = $\sum_{r \in RS(k)} \sum_{j=1}^{n_r} a_{r,j,m} P_{r,j}$
 R_i 단위 기간까지 m 작업장에서 가용한
- $CCL(m,R_i)$: 누적 총생산 용량 = $\sum_{k=CT}^{R_i} CL(m,k)$

$CWL(m, R_i)$: R_i 단위 기간까지 m 작업장에서 누적
총 작업 부하량 = $\sum_{k=CT}^{R_i} L(m, k)$

Step 1. 초기화 루틴

Set S 를 설정. $S = \{\text{현 시점까지 Pool 또는 공장에 투입되지 않은 주문들}\}$

계획 대상 주문 $i (i \in S)$ 의 초기 R_i 결정

$$R_i = k, k \text{는}$$

$$k \cdot TB \leq D_i - \sum_{j=1}^{n_i} P_{i,j} - n_i \cdot AWT < (k+1) \cdot TB$$

조건을 만족하는 정수

Set S 의 주문들에 대하여 Critical Ratio(CR)가 작은 순서대로 정렬

Step 2. 정렬 순서에 따라 주문 i 가 R_i 기간에 투입될 수 있는지 검사

만약 S 가 공집합(\emptyset)이면 STOP.

주문 i 가 점유하는 모든 작업장 m 에 대하여 작업 가능 부하량 조건

$$L(m, R_i) + \sum_{j=1}^{n_i} a_{i,j,m} P_{i,j} \leq CL(m, R_i) \text{을 만족하면}$$

$$RS(R_i) = RS(R_i) \cup \{i\}, S = S - \{i\}, \text{ Step 2로}$$

조건이 만족되지 않는 작업장이 발견되면 Step 3로

Step 3. 주문 i 가 R_i 기간 이전에 투입될 수 있는지 검사 작업 가능 부하량 조건을 위반하는 모든 작업장에 대하여

$$CWL(m, R_i) + \sum_{j=1}^{n_i} a_{i,j,m} P_{i,j} \leq CCL(m, R_i)$$

이면 Step 4로, 그렇지 않으면 Step 5로

Step 4. R_i 기간부터 후진 방향(backward)으로 주문 투입 계획 $RS(R_i)$ 에 속하고 아직 Pool에 투입되지 않은 주문들 중에서 주문 i 의 과부하 작업장을 점유하면서 최소 납기를 가진 주문 선정.

만약 주문 i 의 납기 > 최소 납기 이면,

$$RS(R_i) = RS(R_i) - \{\text{최소 납기 주문의 } id\},$$

$$S = S \cup \{\text{최소 납기 주문의 } id\}$$

그렇지 않으면, 만약

$$CWL(m, R_i - 1) + \sum_{j=1}^{n_i} a_{i,j,m} P_{i,j} \leq CCL(m, R_i - 1)$$

, $\forall m$ 이면 $R_i = R_i - 1$

그렇지 않으면, $RS(R_i - 1) = RS(R_i - 1) \cup \{i\},$

$S = S - \{i\}, \text{ Step 2로}$

만약 $R_i = CT$ 이면,

$$RS(CT) = RS(CT) \cup \{i\}, S = S - \{i\}$$

Step 2로

Step 5. R_i 기간부터 전진 방향(forward)으로 주문 투입 계획

$RS(R_i)$ 에 속하고 아직 Pool에 투입되지 않은 주문들 중에서 주문 i 의 과부하 작업장을 점유하면서 최대 납기를 가진 주문 선정.

만약 주문 i 의 납기 < 최대 납기 이면,

$$RS(R_i) = RS(R_i) - \{\text{최대 납기 주문의 } id\},$$

$$S = S \cup \{\text{최대 납기 주문의 } id\}$$

그렇지 않으면, $R_i = R_i + 1,$

Step 2로

Step 2에서는 공장의 가용 생산 용량과 기존에 계획된 주문들의 부하량을 기준으로 각 주문이 초기 투입 기간 R_i 에 투입될 수 있는지를 검사한다.

Step 3에서는 주문 i 가 점유하는 각 작업장에 대하여 현재의 계획 기간(CT)부터 R_i 기간까지의 누적 작업 부하량과 주문 i 의 가공시간의 합을 구하고 이를 동일 기간 동안의 누적 가용 생산 용량과 비교한다. 만약 모든 작업장에서 누적 가용 생산 용량이 누적 작업 부하량보다 크다면 이것은 현재 기간부터 R_i 기간동안에 계획된 주문들과 주문 i 가 가용 생산 용량 제약 하에서 수행될 수 있다는 것을 의미하는 것이므로 Step 4로 간다. 그렇지 않은 경우에는 Step 5로 간다.

Step 4에서는 R_i 기간부터 후진 방향으로 공장의 예상 부하량을 탐색하여 주문 i 를 투입할 수 있는 최적 기간을 선정한다. 우선 R_i 기간에서 $RS(R_i)$ 에 속하고 아직 Pool에 투입되지 않은 주문들중 주문 i 의 과부하 작업장을 점유하고 최소 납기를 가진 주문을 선정한다.

만약 선정된 주문의 납기가 주문 i 의 납기보다 작으면 선정된 주문을 R_i 기간보다 전(前) 계획 기간으로 할당하기 위해 계획 대상 주문 집합 S 에 포함시키고 R_i 기간에서의 주문 투입 계획 리스트 $RS(R_i)$ 에서는 삭제한다. 그리고 선정된 주문의 부하량 만큼을 R_i 기간의 계획 부하량에서 제거한다.

이러한 작업이 완료되면 주문 i 에 대하여 다시 Step 2로 올라가 R_i 기간에 할당 가능한지 여부를 검사한다. 만약 선정된 주문의 납기가 주문 i 의 납기보다 크면 주문 i 를 R_i 의 이전 기간에 할당하도록 R_i 기간을 갱신하여($R_i = R_i - 1$) Step 2로 올라간다. 이때 만약 갱신된 R_i 기간에 주문 i 의 부하량을 포함하였을 때 누적 가용 생산 용량이 누적 작업 부하량보다 작은 작업장이 존재하면 주문 i 를 갱신된 R_i 기간에 할당한다. 이것은 무한루프를 방지하기 위한 절차이다. 또한 갱신된 R_i 기간이 현재의 계획 기간이면 주문 i 를 현재 계획 기간에 할당하고 다음 주문에 대하여 Step 2를 반복한다.

이와 같이 과부하 작업장을 점유하는 주문중 납기가 가장 빠른 주문을 선정하여 전 단위 기간으로 이동시키는 이유는

각 단위 기간별 작업장의 가용 생산 용량 제약을 만족하면서 상대적으로 다른 주문을 이동시키는 것보다는 전체 주문의 작업조기완료시간 및 순수작업지연시간의 발생이 감소될 가능성이 크기 때문이다.

Step 5에서는 R_i 기간부터 전진 방향으로 공장의 예상 부하량을 탐색하여 주문 i 를 투입할 수 있는 최적 기간을 선정한다. Step 5에서 수행되는 과정은 Step 4에서 수행된 과정과 유사하다. 다만 최소 납기를 가진 주문을 선정하는 대신에 주문 i 보다 납기가 큰 최대 납기를 가진 주문을 선정하고 이 주문을 후(後) 계획 기간에 할당하기 위해 계획 대상 주문 집합 S 에 포함시키는 것이 차이가 있다. 또한 마찬가지로 선정된 주문의 납기가 주문 i 의 납기보다 작으면 주문 i 를 R_i 의 다음 계획 기간에 할당하도록 R_i 기간을 갱신하여($R_i = R_i + 1$) Step 2로 이동한다. Step 5에서 과부하 작업장을 경유하는 주문중 납기가 가장 낮은 주문을 선정하여 후 단위 기간으로 이동시키는 이유는 Step 4에서의 이유와 같다.

3.2 주문의 계획 납기 설정

주문 투입 계획이 완료되면 각 단위 기간별로 해당 기간 동안에 작업이 시작될 주문들이 결정된다. 즉, 각 기간별로 할당된 주문들은 늦어도 해당 기간이 지나기 전에는 공장에 투입되거나 또는 Pool(공장에 투입될 준비 상태)에 존재하여야 한다는 것을 의미한다. 이러한 조건을 만족하기 위하여 본 연구에서는 주문 수주 과정에서 결정된 각 주문들의 본래의 납기 외에 생산 통제시 활용하기 위한 계획 납기를 설정한다.

주문의 계획 납기 PD_i 는 다음과 같은 방식에 따라 결정된다. 여기서 LTB_i 는 주문 i 가 속한 단위 기간의 세분화된 기간 중 마지막 기간의 시작 시점이고 세분화된 기간이란 주문의 Pool 투입 통제시 Pool 형성의 기준 단위 기간이다.

$$PD_i = \text{Min} \{ LTB_i + \sum_{j=1}^{n_i} (P_{i,j} + AWT) , D_i \} \quad (1)$$

4. 주문 투입 통제

4.1 주문의 Pool 투입 통제

주문의 Pool 투입 통제의 기능은 주문 투입 계획에서 결정된 각 단위 기간별 주문들을 대상으로 보다 세분화된 기간(Time Fence)마다 Pool로 투입될 주문들을 선정하는 것으로 새로운 주문이 들어올 때 그리고 Time Fence가 변경될 때마다 수행된다. 즉, 주문의 작업조기 완료 시간 및 순수작업 지연 시간이 최소화 될 수 있는 시점에 도달한 주문을 판별하고 이에 따라 Pool을 형성하려는 것이다.

이러한 목적을 효과적으로 수행하기 위하여 동적인 주문의 Pool 및 공장에서의 체류 시간 예측 모형을 제시한다. 주문의 예상 체류 시간은 공장의 현재 작업 상태 정보와 해당 주문의 정보 그리고 당해 계획 기간에 할당된 다른 주문들의 정보들을 고려하여 결정된다.

또한 공장의 가동률과 작업 조기 완료 시간 및 순수작업 지연 시간의 가중값 비율에 따라서 작업 체류 시간 예측 모형의 매개변수를 동적으로 조정함으로써 상황 변동에 능동적으로 적용될 수 있도록 한다.

4.2 작업 체류 시간 예측시 고려할 정보

기존 연구들을 살펴보면 주문의 총 공정 시간, 공정 수, 공장의 작업부하 등의 정보를 고려한 여러 가지 유형의 작업 체류 시간 예측 방법들이 제시되고 있는데 이와 관련하여서는 Ragatz와 Mabert(1984) 그리고 Smith와 Seidmann(1983)의 논문에서 잘 정리되어 있다.

Ragatz와 Mabert(1984)가 이들 규칙들에 대하여 비교 평가한 결과를 살펴보면 JIQ (Jobs In Queue), WIQ (Work In Queue), RMR (Response Mapping Rule)과 같이 주문과 공장의 정보를 모두 고려하는 규칙들이 TWK (Total Work), NOP (Number of Operations), TWK+NOP 과 같이 주문만의 정보를 이용하거나 JIS (Jobs In System)과 같이 공장만의 정보를 이용하는 규칙들보다 성능이 좋은 것으로 나타난다. 또한 공장의 정보로는 공장 전체의 정보(JIS) 보다는 주문의 경로상에 놓여 있는 작업장의 정보 (JIQ, WIQ)를 사용하는 것이 보다 효과적인 것으로 나타난다. 그리고 보다 복잡한 선형관계식을 사용하는 RMR 규칙이 JIQ나 WIQ에 비하여 크게 향상된 성능을 보이지는 않는다고 하였다.

본 연구에서는 주문의 작업 체류 시간을 예측하는 데 사용하는 정보로서 공장 내 작업 부하량과 주문의 계획 납기 그리고 주문 투입 계획상의 작업 부하량 3가지를 사용한다.

공장 내 작업 부하량은 현재 공장에 존재하는 모든 주문들 중 고려 대상 주문의 공정 경로상의 작업장에서 대기중이거나 향후 이들 작업장을 거치게 될 주문들의 관련 작업 부하량을 의미한다. 주문 투입 계획상의 작업 부하량은 Pool에서 대기 중인 주문들과 현재 계획 기간 내에서 계획된 주문들 중 아직 Pool이나 공장에 투입되지 않고 계획 리스트상에 존재하는 주문들에 의해 고려 대상 주문의 공정 경로상에서 발생할 수 있는 작업 부하량을 의미한다.

공장 내 작업 부하량과 주문 투입 계획상의 작업 부하량은 다시 각 기계가 부담하게 될 평균 작업 부하량 정보로 가공되어 사용된다. 그리고 고려 대상 주문의 공정 경로에 따라 이러한 기계별 평균 작업 부하량을 합하면 대상 주문의 공정 경로상에서의 총 평균 작업 부하량을 구할 수 있다. 본 연구에서는 이를 해당 주문이 시점 t 에 투입될 때 예상할 수 있는 최대 작업 부하량이라 정의하고 $PL_i(t)$ 라 표현한다.

4.3 동적인 작업 체류 시간 예측 방법

Ragatz와 Mabert(1984) 등에서 제시된 기존의 작업 체류 시간 예측 모형에서는 대부분 회귀 분석 등을 통하여 추정된 매개 변수를 고정적으로 사용하고 있다. 이에 비하여 Adam 등(1993)은 주문의 리드 타임을 기초로 작업 체류 시간 예측 모형의 계수를 동적으로 추정하는 방법을 제시하였다.

본 연구에서 제시하는 주문의 작업 체류 시간 예측 모형에서도 동적인 계수를 사용하는데 이것은 고려 대상 주문의 최대 작업 부하량 'PL_i(t)' 와 주문의 Pool 및 공장에서의 대기 시간 'WT_i' 간의 비율을 계속적으로 갱신한 수치이다. 만약 주문 i가 t시점에 Pool에 투입되어 완료되었다면 그리고 이때 이 비율을 α_i라 하면 이는 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha_i = \frac{WT_i}{PL_i(t)}, \quad \alpha_0 = 1 \quad (2)$$

그리고 주문의 작업 체류 시간 예측에 사용하는 계수는 이들 α_i (i=0,1,2,...)의 평균 $\bar{\alpha}$ 을 사용한다. 이와 같은 정의에 따르면 계수 $\bar{\alpha}$ 과 주문 i의 최대 작업 부하량 PL_i(t)의 곱 $\bar{\alpha} \cdot PL_i(t)$ 는 주문 i의 Pool 및 공장에서의 예상 대기 시간을 의미한다는 것을 알 수 있다.

이 밖에 본 연구에서는 주문의 체류 시간 예측 모형에 공장의 가동률(U)과 순수 작업 지연 시간의 가중값과 작업 조기 완료 시간과 순수 작업 지연 시간의 가중값 합에 비율 'wT/(wE+wT)' 요소를 포함하였다.

이 두 가지 요소가 주문의 예상 체류 시간 관계식에 반영되어야 하는 이유는 다음과 같이 직관적으로 설명할 수 있다. 우선 공장의 가동률이 증가한다는 것은 처리할 주문량이 커진다는 것을 의미하는 것이고 이것은 공장에 투입된 주문들간에서 서로 자원 사용을 방해할 가능성이 커지게 하기 때문에 당연히 대기 시간이 증가하게 된다. 따라서 주문의 Pool 및 공장에서의 예상 체류 시간을 보다 크게 잡아 주도록 하는 것이 보다 성능을 향상시키는 것이다.

순수 작업 지연 시간의 가중값과 작업 조기 완료 시간과 순수 작업 지연 시간의 가중값 합에 비율 변동은 주문의 작업 체류 시간에 직접적인 영향을 주는 요소는 아니다. 그러나 이 비율이 커지게 될수록 순수 작업 지연 시간에 따른 손실 비중이 커지게 되므로 Pool 및 공장에서의 예상 체류 시간을 보다 크게 잡아 주어 순수 작업 지연 시간의 발생을 더욱 억제하는 것이 보다 성능을 향상시킬 것이다.

그러나 이들 두 요소의 상관 관계를 정확히 표현하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 본 연구에서는 실험 조건 범위 내에서 이 두 가지 요인을 곱의 식으로 단순히 표현하여 주문의 Pool 및 공장에서의 체류 시간 모형에 반영하였다. 다음은 이를 반영한 주문의 Pool 및 공장에서의 체류 시간 F_i(t)의 관계식을 표현한 것이다.

$$F_i(t) = kU \frac{w_T}{w_E + w_T} \left(\sum_{j=1}^{n_i} P_{i,j} + \bar{\alpha} \cdot PL_i(t) \right) \quad (3)$$

이상에서 정의된 주문의 Pool 및 공장에서의 체류 시간 관계식을 사용하여 임의의 시점 t에 각 주문의 Pool 투입 시점 R_i(t)을 계산하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_i(t) = PD_i - F_i(t) \quad (4)$$

Pool 투입의 시간 범위(Time Fence) 크기를 TF라고 할 때 만약 R_i(t)가 t+TF 보다 빠르면 (= R_i(t) ≤ t+TF) 주문 i는 Pool로 투입된다. 그리고 만약 늦다면 주문 i는 아직 Pool에 투입될 조건이 되지 않은 것으로 간주하고 계획 리스트상에 그대로 유지한다.

4.4 주문의 공장 투입 통제

주문의 공장 투입 통제는 각 공정에서 작업이 완료될 때마다 Pool에서 대기중인 주문들의 공장 투입 시점을 결정하는 기능을 수행하는데 공장 내의 재공품 재고 수준이 일정 기준 이하로 유지되도록 함으로써 재고 비용 및 주문의 작업 체류 시간이 감소되도록 한다. 본 연구에서는 풀(Pull) 방식과 푸시(Push) 방식이 혼합된 주문의 공장 투입 통제 방안을 제시한다.

풀 방식의 주문 투입 통제는 공장의 재공품 재고 수준과 애로 공정(Bottleneck)의 작업 부하량을 기준으로 다음의 2 가지 조건을 사용한다.

- 새로운 주문이 공장으로 투입되어도 공장 내 최대 허용 재공품 재고 수준 (MSW, Maximum Shop WIP)을 초과하지 않으면 주문을 투입한다.
 - 주문의 공정 경로상에 존재하는 작업장의 현재 작업 부하량이 해당 작업장의 최대 허용 작업 부하량(MCL, Maximum Cell Load) 이하이면 주문을 투입한다.
- 푸시 방식의 주문 투입 통제 기준으로는 다음의 조건을 사용한다.
- 주문의 여유 시간이 최소 여유 시간보다 작거나 같을 경우 주문의 공장 투입이 허가된다.

특히 풀 방식의 통제에서 현 시점의 공장 내 최대 허용 재공품 재고 수준 (MSW) 및 각 작업장의 최대 허용 작업 부하량 (MCL)은 공장의 가동률에 따라 다음과 같이 동적으로 조정된다. 여기서 U_s는 공장의 표준(정상) 가동률이고 U 현재는 공장의 현재 가동률이다. 그리고 MSW_s는 표준 가동률에서의 최대 허용 재공품 재고 수준이고 MCL_s는 표준 가동률에서의 작업장의 최대 허용 작업 부하량 수준이다.

$$MSW = MSW_s \frac{U_{현재}}{U_s} \quad (5)$$

$$MCL = MCL_s \frac{U_{현재}}{U_s} \quad (6)$$

공장으로 투입될 주문의 우선 순서는 작업 배정 규칙을 사용한다. 일단 주문들이 공장에 투입되고 나면 각 작업장간의 이동은 푸시 방식으로 통제된다.

5. 주문 투입 방안 설명 예제

본 연구의 주문 투입 방안에 대하여 예(例)를 통한 설명을 위해 다음의 가정을 한다.

현재 시점은 12월 1일로 하고 계획 단위 기간의 길이는 1 주(週)로 한다. 한 주간 작업일은 6일(日)이며 각 일의 작업 시간은 8 시간으로 동일하다. 공장은 동종의 기계로 구성된 3개의 작업장으로 이루어져 있고 작업장에 기계 수는 각각 3, 2, 3대이다. 각 작업장의 가용 생산 용량 수준은 단위 기간별로 현재 기간은 총 생산 용량의 100%로 하고 나머지 단위 기간들은 총 생산 용량의 70%로 한다. 즉, $PC(1) = 1.0$ 이고 $PC(2) = PC(3) = \dots = 0.7$ 이 된다. 다음의 <표 2>부터 <표 6>까지는 공정 정보 등의 기초 정보와 현재의 주문 투입 계획을 보여 준다.

표 1. 작업장별 가능 공정표

작업장 ID	가능 공정 ID 리스트
1	2001, 2002, 2003, 2004
2	2005, 2006, 2007, 2008, 2009
3	2010, 2011, 2012

표 2. 현재의 각 단위 기간별 주문 투입 계획

단위 기간	투입 계획된 주문 리스트
1	$RS(1) = \{10001, 10002, 10003, 10004, 10008, 10011, 10014, 10015, 10019, 10020, 10023, 10025\}$
2	$RS(2) = \{10005, 10006, 10007, 10009, 10013, 10016, 10018, 10022\}$
3	$RS(3) = \{10010, 10012, 10017, 10021, 10024\}$

표 3. 단위 기간별 각 작업장의 가용 생산 용량

단위 : 시간(Hour)

단위 기간	작업장 1	작업장 2	작업장 3
1	$CL(1,1) = 144$	$CL(2,1) = 96$	$CL(3,1) = 144$
2	$CL(1,2) = 100$	$CL(2,2) = 67$	$CL(3,2) = 100$
3	$CL(1,3) = 100$	$CL(2,3) = 67$	$CL(3,3) = 100$

이제 새로운 주문 '10026'과 '10027'이 도착하여 주문 투입 계획을 다시 수립하고자 한다. 새로이 도착한 주문 '10026'과 '10027'의 납기는 모두 12월 13일 12시이고 공정 순서 및 종류 그리고 공정 시간은 각각 {2002 (13), 2005 (11)}와 {2011 (13), 2006 (9), 2002 (14)} 이다. 각 공정별 평균 대기 시간은 1 시간으로 가정한다.

계획 대상 주문의 집합 S 에는 아직 공장 또는 Pool에 투입되지 않은 모든 주문들과 새로이 수주된 주문 '10027', '10026'으로 형성된다. 그러나 여기서는 설명을 간단히 하기 위하여 새로이 수주된 주문을 제외한 모든 다른 계획 대상 주문들의 주문 투입 계획이 완료되었고 결과는 기존 주문 투입 계획과 동일하다고 가정한다. 따라서 다음의 과정 설명은 새로운 주문 '10026', '10027'을 대상으로 하여 진행된다.

Step 1. 초기화 루틴

계획 대상 주문의 집합 $S = \{10026, 10027\}$.

주문 '10026'의 초기 투입 기간 $R_i = 2$.

(8일 9시 < 13일 12시-24시간-2*1 = 10일 10시 < 13일 17시)

주문 '10027'의 초기 투입 기간 $R_i = 2$.

(8일 9시 < 13일 12시-36시간-3*1 = 8일 13시 < 13일 17시)

CR 크기에 따라 먼저 주문 '10027'에 대하여 Step 2부터 Step 5까지 수행한다.

Step 2. 주문 '10027'이 기간 2에 투입될 수 있는지 검사

$$L(3, 2) = \sum_{r \in RS(2)} \sum_{j=1}^{n_r} a_{r,j,3} P_{r,j} = 84$$

$$CL(3, 2) = \text{작업장 3의 기계 수} \times \text{단위 기간의 길이} \times PC(2) = 3 \times 48 \times 0.7 = 100$$

동일한 방법으로 나머지를 구하면

$$L(2, 2) = 53, CL(2, 2) = 67, L(1, 2) = 70, CL(1, 2) = 100$$

$$L(3, 2) + 0 \times 13 + 0 \times 9 + 1 \times 14 = 98 < CL(3, 2) = 100$$

$$L(2, 2) + 0 \times 13 + 1 \times 9 + 0 \times 14 = 62 < CL(2, 2) = 67$$

$$L(1, 2) + 1 \times 13 + 0 \times 9 + 0 \times 14 = 83 < CL(1, 2) = 100$$

이상의 결과를 보면 주문 '10027'은 모든 작업장에서 작업 가능 부하량 조건을 만족하므로 기간 2에서 작업이 개시되는 것으로 계획한다.

$$RS(2) = RS(2) \cup \{10027\} = \{10005, 10006, 10007, 10009, 10013, 10016, 10018, 10022, 10027\}$$

$$L(1, 2) = 70 + 13 = 83, L(2, 2) = 53 + 10 = 62, L(3, 2) = 84 + 14 = 98$$

$$S = \{10026, 10027\} - \{10027\} = \{10026\}$$

주문 '10026'에 대하여 Step 2부터 다시 수행한다.

Step 2. 주문 '10026'이 기간 2에 투입될 수 있는지 검사

$$L(1, 2) = 83, L(2, 2) = 62$$

$$L(1, 2) + 1 \times 13 + 0 \times 11 = 96 < CL(1, 2) = 100$$

표 4. 현재 계획된 주문들의 공정표

주문 ID (납기)	공정 순서, 공정 ID (가공 시간) 리스트		
	작업장 1	작업장 2	작업장 3
10001 (12:04:12)	1, 2001 (16)*	2, 2005 (11)	3, 2010 (13)
10002 (12:03:12)	2, 2002 (13)	-	1, 2011 (14)*
10003 (12:03:12)	1, 2003 (16)*	2, 2009 (13)	-
10004 (12:05:12)	2, 2004 (15)	1, 2008 (12)*	3, 2010 (13)
10005 (12:11:16)	-	-	1, 2010 (13)
10006 (12:09:12)	-	1, 2006 (9)	-
10007 (12:13:16)	2, 2002 (13)	1, 2007 (10)	3, 2011 (14)
10008 (12:03:16)	2, 2003 (16)	-	1, 2012 (15)*
10009 (12:13:16)	1, 2001 (16)	3, 2009 (13)	2, 2012 (15)
10010 (12:18:12)	-	1, 2008 (12)	-
10011 (12:05:12)	1, 2002 (13)	2, 2005 (11)	-
10012 (12:19:12)	-	2, 2007 (10)	1, 2010 (13)
10013 (12:12:12)	1, 2002 (13)	-	2, 2012 (15)
10014 (12:05:16)	3, 2002 (13)	1, 2006 (9)	2, 2011 (14)
10015 (12:03:12)	2, 2001 (16)*	1, 2007 (10)*	3, 2011 (14)
10016 (12:12:16)	2, 2004 (15)	-	1, 2010 (13)
10017 (12:19:12)	1, 2001 (16)	-	2, 2012 (15)
10018 (12:12:16)	-	1, 2008 (12)	-
10019 (12:05:16)	2, 2002 (13)	-	3, 2010 (13)
10020 (12:05:16)	3, 2003 (16)	2, 2007 (10)	1, 2011 (14)*
10021 (12:17:12)	1, 2004 (15)	-	-
10022 (12:13:16)	3, 2002 (13)	1, 2006 (9)	2, 2011 (14)
10023 (12:04:16)	-	2, 2007 (10)	1, 2010 (13)
10024 (12:19:12)	1, 2004 (15)	-	2, 2010 (13)
10025 (12:06:16)	2, 2004 (15)	1, 2007 (10)	3, 2012 (15)

(* : 가공이 완료된 공정)

표 5. 현재 각 단위 시간별로 계획된 작업 부하량

(단위 : 시간(Hour))

단위 시간	작업장 1	작업장 2	작업장 3
1	$L(1,1) = 114$	$L(2,1) = 74$	$L(3,1) = 95$
2	$L(1,2) = 70$	$L(2,2) = 53$	$L(3,2) = 84$
3	$L(1,3) = 46$	$L(2,3) = 22$	$L(3,3) = 41$

$$L(2, 2) + 0 \times 13 + 1 \times 11 = 73 > CL(2, 2) = 67$$

작업장 2에서 예상되는 부하량이 가능 생산 용량을 초과하므로 Step 3로 간다.

Step 3. 주문 '10026'이 기간 2이전에 투입될 수 있는지 검사

$$CWL(2,2) = L(2,1) + L(2,2) = 74 + 62 = 136, CCL(2,2) = CL(2,1) + CL(2,2) = 96 + 67 = 163$$

$$CWL(2, 2) + 0 \times 13 + 1 \times 11 = 147 < CCL(2, 2) = 163$$

작업장 2에서 기간 1, 2 동안의 누적 총 작업 부하량이 동일 기간의 누적 총 가용 생산 용량보다 작으므로 Step 4 간다.

Step 4. 기간 2부터 후진 방향으로 주문 투입 계획

$RS(2)$ 에 속한 주문들 중 과부하 작업장 2를 경유하면서 최소

납기를 가진 주문은 '10006'으로 납기가 12월 9일 12시이고 공정 정보는 {2006 (9)}이다. 주문 '10026'의 납기(12월 13일 12시)보다 주문 '10006'의 납기가 더 작으므로 주문 '10006'은 기간 2의 투입 계획 리스트에서 삭제하고 전 기간인 기간 1에 투입되도록 집합 S 에 포함시킨다.

$$S = \{10026\} \cup \{10006\} = \{10026, 10006\}$$

$$RS(2) = RS(2) - \{10006\} = \{10005, 10007, 10009, 10013, 10016, 10018, 10022, 10027\}$$

$$L(2, 2) = 62 - 9 = 53$$

주문 '10026'에 대하여 Step 2를 다시 수행한다.

주문 '10026'에 대하여 이상의 과정을 반복하여 결정된 각 단위 시간별 최종 주문 투입 계획과 작업장별로 계획된 최종 작업 부하량은 <표 7>과 <표 8>에 표시되어 있다.

모든 주문이 할당되면 새 주문과 변동된 주문들에 대하여 계획 납기(Planned Due Date)를 설정하는데 주문 '10026'과 '10027'의 경우 자신들의 본래 납기(12월 13일 12시)가 이미 기간 2의 완료 시점(12월 13일 17시)보다 빠르기 때문에 계획 납기도 원래의 납기와 동일하게 설정된다. 그러나 주문 '10006'의 경우에는 주문의 본래 납기(12월 9일 12시)가 기간 1의 완료 시점(12월 6일 17시)보다 늦기 때문에 식 (1)에 따라 계획 납기

가 정해진다.

$$LTB10006 = 12월 6일 9시,$$

$$\sum_{j=1}^n (P_{i,j} + AWT) = (9 + 1) = 10 \text{ 시간}$$

$$PD10006 = \text{Min} \{12월 6일 9시 + 10시간 = 12월 8일 11시, 12월 9일 12시\} = 12월 8일 11시$$

표 6. 각 단위 기간별 최종 주문 투입 계획

단위 기간	투입 계획된 주문 리스트
1	RS(1) = { 10001, 10002, 10003, 10004, 10008, 10011, 10014, 10015, 10019, 10020, 10023, 10025, 10006 }
2	RS(2) = { 10005, 10007, 10009, 10013, 10016, 10018, 10022, 10027, 10026 }
3	RS(3) = { 10010, 10012, 10017, 10021, 10024 }

표 7. 단위 기간마다 각 작업장별로 계획된 최종 작업 부하량

단위 기간	작업장 1	작업장 2	작업장 3
1	L(1,1) = 114	L(2,1) = 83	L(3,1) = 95
2	L(1,2) = 96	L(2,2) = 64	L(3,2) = 98
3	L(1,3) = 46	L(2,3) = 22	L(3,3) = 41

주문 투입 계획이 완료되면 현재 계획 기간과 다음 계획 기간에 투입될 주문들에 대하여 Pool 투입 여부를 결정한다. 다음 계획 기간까지 고려하는 이유는 본 예에서 각 주문의 총 가공 시간이 크기 때문에 주문의 공정 작업 동안 다음 기간의 주문들도 투입될 가능성이 있고 따라서 영향을 줄 수 있기 때문이다.

현재 시점(t)이 12월 1일 10시이고 공장의 가동률 U가 80% (0.8) 일 때 그리고 매개변수 k가 1.25로 설정되어 있고 $wT/(wT+wE)$, $\bar{\alpha}$ 가 각각 0.95, 0.1인 경우에 <표 4>의 주문 '10014'에 대한 Pool 투입 시점을 계산해 보자.

우선 <표 4>에서 $PL_i(t)$ 의 정의에 따라 작업장 1, 2, 3에 대기중이거나 기간 1, 2 동안에 투입될 모든 공정들에 대하여 최대 로 예상할 수 있는 주문 '10014'의 총 평균 작업 부하량 $PL_{10014}(t)$ 은 207.8 이다. 그리고 식 (3), 식 (4)에 따라 계산하면 다음과 같다.

$$F_{10014} = 1.25 \times 0.8 \times 0.95 \times (13 + 11 + 0.1 \times 143.5) \approx 36.4 \text{ 시간}$$

$$R_{10014}(t) = PD_i - F_i(t) = 12월 5일 16시 - 36.4시간 = 12월 1일 11.6시$$

Pool 투입의 시간 범위 크기 TF가 2시간이면 $R_{10014}(t) = 12$

월 1일 11.6 시 < $t+TF = 12월 1일 12시$ 이므로 주문 '10014'은 Pool로 투입된다.

6. 비교 대안 선정 및 실험 계획

실험 대상 공장은 동적인 개별 생산 시스템으로서 동종의 기계로 이루어진 다섯 개의 작업장으로 구성되어 있고 각 작업장의 기계 수는 각각 3, 4, 4, 5, 4대 이다. 일별 생산 가용 시간은 10 시간이고 주 6일 작업이 이루어진다. 본 연구에서 수행되는 주문 투입 계획도 1주를 단위 기간으로 하여 수행된다. 단위 기간별 가용 생산 용량 수준은 현재 기간에서는 총 생산 용량의 100%로 하고 나머지 기간에서는 총 생산 용량의 80%로 한다.

주문의 발생은 지수 분포 (Exponential Distribution)를 따르며 주문이 경유하는 공정 수는 균일 분포 (Uniform Distribution)에 따라 3에서 6가지로 결정된다. 주문이 경유할 작업장은 임의로 결정되는데 이때 각 작업장에서 다음 작업장을 방문할 확률은 모두 동일하다. 주문의 가공 시간은 작업장 1은 3 ~ 6 시간, 작업장 4에서는 5 ~ 10 시간 그리고 나머지 작업장 2, 3, 5에서는 4 ~ 8 시간까지의 균일 분포를 따른다.

주문의 납기는 Rohleder와 Scudder(1993)의 연구에서 사용된 방법을 약간 수정하여 다음과 같은 방법으로 결정된다.

$$D_i = a_i + \sum_{j=1}^{n_i} P_{i,j} \cdot KK \cdot y$$

a_i 는 주문 i의 수주(도착) 시점이고 KK는 주문의 납기 여유 상수 그리고 y는 Beta (3.0, 3.0) 분포의 확률 변수이다. 이때 확률 변수 y는 항상 $1/KK$ 보다는 크게 조정된다. 이것은 주문의 납기 여유가 적어도 자신의 총 공정 시간보다는 작지 않도록 하기 위한 것이다. 따라서 주문의 납기 여유 시간은 자신의 총 공정 시간에 최소 1배에서 최대 KK배까지 임의적으로 다양하게 주어진다.

비교 대안으로는 4가지 주문 투입 방안을 사용하였는데 IMM(Immediately Release) 방안은 주문의 도착 즉시 공장에 투입 하는 방안으로 주문 투입 통제의 효과를 비교하기 위한 대안 이고 나머지 3 방안은 <표 8>에 기술된 MIL, MOM 그리고 OpET 방안으로 기존 연구들에서 좋은 결과를 보여 준 주문 투입 방안들이다.

<표 8>에 사용된 기호들을 간단히 설명하면 k_1, k_2, k_3, k_4 는 주문 투입 시점 추정에 사용되는 매개 변수(Parameter)들이 다. Q_i 는 주문 i의 공정 경로상에 존재하는 대기 주문들의 수이고 \bar{p} 는 모든 공정 시간의 평균이다. wT_i 는 주문 i의 순수 작업 지연 시간 손실 비용이고 $wE_{i,j}$ 는 각 공정별 작업 조기 완료 시간 손실 비용이다. 그리고 각 공정별 작업조기완료시간 손실 비용의 총합은 주문의 작업 조기 완료 시간 손실 비용(wE_i)

표 8. 기존의 주요 주문 투입 방안들

주문 투입 방안	정의
MIL	$r_i = \max \{a_i, D_i - k_1 n_i - k_2 Q_i\}$
MOM	$r_i = \max \left\{ a_i, D_i - \sum_{j=1}^{n_i} p_{i,j} - k_3 \frac{w_{T,i}}{\sum_{j=1}^{n_i} w_{E,i,j} + w_{T,i}} \right\}$
OpET	$r_{i,j} = \max \left\{ t, t + d_{i,j}(t) - p_{i,j} - k_4 \frac{w_{T,i} - w_{E,i,j}}{\lambda} \right\}$ $d_{i,j}(t) = p_{i,j} \cdot (D_i - t) / \sum_{l=k_i}^{n_i} p_{i,l}$

이 된다. λ 는 순수 작업 지연 시간 손실 비용과 작업 조기 완료 시간 손실 비용간의 평균 차이이다.

본 연구와 이들 비교 대안들간의 주요 성능 평가 척도로는 총 손실 비용을 사용한다. 총 손실 비용은 순수 작업 지연에 따른 손실 비용과 작업 조기 완료 시간에 의해 발생하는 완제품 재고 비용 그리고 공장 내 작업 체류 시간에 따른 재공품 재고 비용으로 구성된다. 본 실험에서는 주문에 따른 순수 작업 지연 시간 손실 비용 및 작업 조기 완료 시간 손실 비용 차이를 고려하지 않는다. 또한 각 주문은 주문 투입 결정 즉시 공장으로 자재 투입이 이루어지는 것으로 가정한다. 그리고 각 공정별 작업 조기 완료 시간 손실 비용은 Rohleder와 Scudder(1993)의 연구에서처럼 다음과 같이 정의된다.

$$w_{E,i,j} = w_E \cdot p_{i,j} / \sum_{j=1}^{n_i} p_{i,j}$$

그러나 공정별 작업 조기 완료 시간 손실 비용 $w_{E,i,j}$ 에 따라 재공품 재고 비용을 계산하면 공장에 투입되어 아직 첫 공정이 수행되지 않고 대기중인 주문들은 재공품 재고로 존재하지만 비용 계산시 반영되지 않는 문제가 발생한다. 따라서 본 실험에서는 $w_{E,i,j}$ 의 크기와 상관없이 공장에서 체류하는 시간에 따라 일정하게 재공품 재고 비용을 계산한다. 완제품 재고와 재공품 재고간의 손실 비용은 2:1로 가정한다.

각 방안들간의 성능 평가에 대한 또 다른 중요한 기준으로서 <표 10>에 나타난 여러 가지 실험 조건에서 주문 투입 방안들의 민감도(Sensitivity)를 분석한다. 일반적으로 현실의 생산 환경은 매우 동적으로 변동하기 때문에 이러한 민감도 분석은 주문 투입 방안의 실용성을 판단할 수 있는 근거로 사용될 수 있다. 즉, 동적으로 변동되는 여러 요인에 안정적으로 적용될 수 있어야 현실의 생산 시스템에서 이들 주문 투입 방안을 활용했을 때 얻고자하는 기대 효과가 보장된다고 할 수 있다.

실험은 본 연구의 주문 투입 방안과 4 가지 비교 대안에 대해

여 이들이 각각 <표 9>에 4 가지 작업 배정 규칙과 조합되어 사용될 때 <표 10>에 정리된 바와 같이 공장 가동률, 납기의 여유 정도 그리고 순수 작업 지연 시간과 작업 조기 완료 시간간의 손실 비용(가중값) 비율 등 3가지 요인에 대하여 총 24 가지 조건에서 각각 성능을 평가한다.

표 9. 고려하는 작업 배정 규칙들

작업 배정 규칙	정의
FIFO	$\min_i \{ c_{i,j-1} \}, (c_{i,0} = a_i)$
SPT	$\min_i \{ p_{i,j} \}$
EDD	$\min_i \{ D_i \}$
CR	$\min_i \left\{ (D_i - t) / \sum_{j=1}^{n_i} p_{i,j} \right\}$

표 10. 실험 요인 및 수치

요인	수준	수치
공장 가동률	높음	90
	보통	85
	낮음	80
납기 여유 상수(KK)	여유가 큼	10
	여유가 작음	6
손실 비용 구조 ($W_T : W_E$)	높음	40 : 1
	보통 이상	20 : 1
	보통 이하	10 : 1
	낮음	5 : 1

공장의 가동률에 따른 주문의 발생률은 IMM 방법에 따라 주문을 투입 할 때를 기준으로 각각 80%, 85%, 90%의 공장 가동률에 이르도록 정하였다. 또한 납기 여유 상수는 IMM 방법과 FIFO규칙을 사용할 때 공장 가동률 90%에서 주문의 순수 작업 지연 발생 비율이 각각 10%, 30%에 이르는 값으로 정하였다.

각 방안들에서 사용되는 계획 요인의 매개 변수 추정치는 기존 연구들에서 사용된 추정값을 기준으로 본 연구의 대상 시스템 환경에 맞게 조정하였다. 이들 매개 변수들은 공장 가동률이 중간 수준(85%)이고 손실 비용 구조가 보통 이상(20:1)인 조건에서 작업 배정 규칙으로 CR 규칙을 사용할 때 최소 손실 비용이 발생하는 수치를 탐색하여 설정하였다. 각 방안들의 매개 변수 k_1, k_2, k_3, k_4 의 추정값은 각각 '15.5', '0.2', '7.25', '3.0' 이다. 본 연구에서는 주문의 Pool 및 공장 체류 시간 예측 모형의 매개 변수 k 의 추정값으로 1.5를 사용하고 MSW와 MCL은 각각 '60' 과 '9×작업장 기계수×평균 가공 시간'으로 설정되었다.

7. 실험 결과 및 분석

<그림 2>, <그림 3>, <그림 4>은 각각 공장 가동률 80%, 85%, 90%에서 여러 조건(납기 여유 상수 및 손실 비용 구조)의 평균 총 손실 비용을 작업 배정 규칙별로 평균한 값을 도시한 것이다. 이들 그림에서도 보듯이 평균적으로 본 연구의 방안은 모든 실험 조건에서 그리고 모든 작업 배정 규칙에서 다른 방안들에 비하여 보다 우수하거나 유사한 성능을 보인다는 것을 알 수 있다. 그리고 이들 그림에서 보듯이 작업 배정 규칙간의 성능은 납기를 기반으로 하는 규칙들(CR, EDD)이 그렇지 않은 규칙들(FIFO, SPT)보다 우수하다는 것을 알 수 있다. 특히 CR 작업 배정 규칙은 대부분의 실험 조건 및 주문 투입 방안에서 다른 작업 배정 규칙에 비하여 우수한 성능을 보여 주고 있다.

MIL과 MOM 방안의 경우 이들 방안은 공장 가동률이 보통 이하(80%에서 85%)인 조건에서는 대부분의 납기 여유, 손실 비용 비율 조건에서 그리고 작업 배정 규칙에 상관없이 차선의 주문 투입 방안으로 그리고 일부에서는 최적의 주문 투입 방안으로 선정되었다. 특히 MOM 방안은 공장 가동률이 낮은 경우에 매우 좋은 성능을 보여 주고 있다. 그러나 공장 가동률이 높고 납기 여유가 작은 경우에는 총 손실 비용이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 반대로 IMM 방안은 공장 가동률이 90% 이고 납기 여유가 작은 경우에 그리고 손실 비용 비율이 높아질수록 우수한 성능을 보여 주고 있다. 그러나 IMM 방안은 변화된 실험 환경을 전혀 반영하지 않기 때문에 많은 실험 조건에서 매우 큰 손실 비용을 발생시킨다.

OpET 방안은 MOM 방안과 IMM 방안의 중간적인 결과를 보여 주고 있다. 이것은 OpET 방안이 다른 주문 투입 방안과 달리 주문의 공장 투입 시점을 통제하는 것이 아니라 일단 주문을 공장에 즉시 투입한 후에 각 작업장에서 공정별 작업 투입 시점을 통제하기 때문에 MOM 방안보다는 순수 작업 지연 시간을 줄이기에 유리하고 IMM 방안 보다는 완제품 재고량을 줄이기에 용이하다. 그러나 대신에 공장 내 재공품 재고량이 제한 없이 매우 커지게 되는 문제점이 있다.

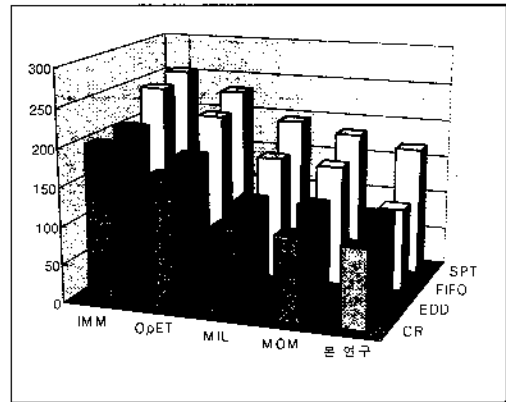


그림 3. 대안별 평균 총 손실 비용(가동률 85%).

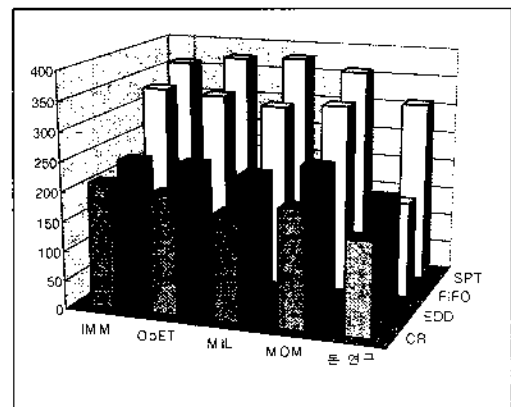


그림 2. 대안별 평균 총 손실 비용(가동률 90%).

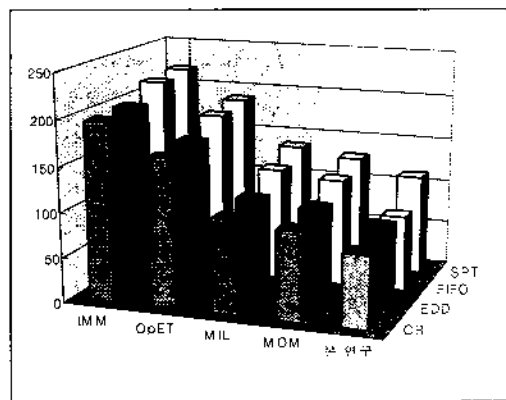


그림 4. 대안별 평균 총 손실 비용(가동률 80%).

OpET 방안이 Rohleder와 Scudder(1993)의 연구 결과와 다르게 나타나는 이유는 재고 비용에 대한 함수 정의의 차이에 있는 것으로 볼 수 있다. 이들은 재고 비용을 공정별 작업 조기 완료 시간의 손실 비용에 비례한 함수로 정의하여 사용하였지만 본 연구에서는 재고 비용이 일정하므로 이들의 연구에서와 다른 결과가 나오게 된 것이다. 또한 이들이 정의한 방식에 따르면 첫 공정이 아직 완료되지 않은 주문들은 공장 내에 재고로서 존재함에도 불구하고 비용에 반영되지 않는 문제점이 있다. 본 실험에서는 이러한 재고도 재공품 재고로서 모두 비용 계산에 반영하였다.

총 손실 비용과 무관하게 또 하나 관심을 보이는 결과는 주문 투입 방안과 작업 배정 규칙간의 성능 편차이다. <그림 2>, <그림 3>, <그림 4> 에서 나타난 주문 투입 방안과 작업 배정 규칙간의 조합에 따른 총 손실 비용을 보면 본 연구의 방안이 다른 방안들에 비하여 작업 배정 규칙과의 조합에 따른 총 손실 비용의 평균 및 편차가 매우 작다는 것을 알 수 있다. 이것은 본 연구의 주문 투입 방안이 다른 대안들에 비하여 작업 배정 규칙간의 성능 편차를 매우 작게 줄여 준다는 것을 의미하는 것으로 본 연구의 주문 투입 방안이 상대적으로 작업배정 규칙의 변화에 훨씬 안정적으로 대응한다는 것을 알 수 있다. 특히 본 연구 방안의 결과에서 FIFO 작업 배정 규칙의 경우가 가장 좋은 성능을 보이는 CR 작업 배정 규칙을 사용했을 때에 비하여 총 손실 비용에 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이것은 본 연구의 주문 투입 방안이 상대적으로 다른 방안들에 비해 공장의 과부하 발생을 보다 효과적으로 관리함으로써 공장 내 작업 흐름을 단순화시켜 준다는 것을 의미한다.

8. 결론

주문의 공장 투입 시점을 통제하는 방법은 보다 경쟁력 있는 생산 시스템 구축을 위해 주문의 납기 지연에 따른 비용 손실 뿐만 아니라 공장의 재공품 재고와 완제품 재고의 증가에 따른 비용 손실을 동시에 줄이고자 하는 목적에 상당히 긍정적인 효과를 보여주고 있다. 특히 공장의 가동률이 보통 수준이거나 낮은 경우에는 주문 투입 통제의 효과가 매우 크게 나타난다. 또한 납기 여유가 큰 경우에도 공장 가동률에 상관없이 주문 투입 시점을 조절함으로써 이상의 비용 손실을 크게 감소시킬 수 있다.

본 연구의 주문 투입 방안은 공장의 가동률, 납기 여유 수준 그리고 손실 비용 비율에 대한 총 24 가지 다양한 실험 조건에서 단지 1 가지 실험 조건을 제외한 모든 경우에서 최적 또는 차선의 우수한 결과를 보여 주었다. 이러한 결과들은 본 연구의 방안이 실험 조건의 변화에 매우 안정적으로 적응하고 있

다는 것을 의미한다.

또한 납기에 기초하지 않은 작업 배정 규칙(FIFO, SPT)에 대하여서는 특히 다른 방안들보다 매우 우수한 성능을 보여주고 있다. 즉, 본 연구의 방안이 다른 방안들에 비하여 작업 배정 규칙간의 성능 편차를 매우 작게 줄여 준다는 것을 의미한다. 특히 FIFO 작업 배정 규칙의 경우에는 가장 좋은 결과를 보인 작업 배정 규칙(CR)과 성능 차이가 거의 발생하지 않는다.

이러한 효과는 요구되는 성능을 유지하면서 FIFO 등의 단순한 규칙을 사용할 수 있도록 함으로써 생산 시스템의 운영을 보다 단순화하는 데 큰 도움을 줄 수 있다.

참고문헌

- Adam, N. R., Bertrand, J. W. M., Morehead, D. C. and Surkis, J. (1993), Due date assignment procedures with dynamically updated coefficients for multi-level assembly job shop, *European Journal of Operational Research*, 68, 212-227.
- Baker, K. R. and Scudder, G. D. (1990), Sequencing with Earliness and Tardiness Penalties: A Review, *Operations Research*, 38(1), 22-36.
- Choi, K., Kim, S., Lee, H. and Kwon, I. (1997), An operation scheme for make-to-order job shop production systems, *Computers and Industrial Engineering*, 33, 765-768.
- Irastorza, C. J. and Deane, R. H. (1974), A loading and balancing methodology for job shop control, *AIIE Transactions*, 6(4), 302-307.
- Melnik, S. A., Tan, K. C., Denzler, D. R. and Fredendall, L. (1994), Evaluating variance control, order review/release and dispatching: a regression analysis, *International Journal of Production Research*, 32(5), 1045-1061.
- Melnik, S. A. and Ragatz, G. L. (1989), Order review/release: research issues and perspectives, *International Journal of Production Research*, 27(7), 1081-1096.
- Morton, T. E., Lawrence, S. R., Rajagopalan, S. and Kekre, S. (1988), SCHED-STAR: A price based shop scheduling module, *Journal of Manufacturing and Operations Management*, 1(1), 131-181.
- Onur, L. and Fabrycky, W. J. (1987), An input/output control system for the dynamic job shop, *IIE Transactions*, 19, 88-97.
- Ow, P. and Morton, T. (1989), The single machine early-tardy problem, *Management Science*, 35, 177-191.
- Philipoom, P. R. and Fry, T. D. (1992), Capacity-based order review/release strategies to improve manufacturing performance. *International Journal of Production Research*, 30(11), 2559-2572.
- Ragatz, G. L. and Mabert, V. A. (1984), A Simulation Analysis of Due Date Assignment Rules, *Journal of Operations Management*, 5(1), 27-39.
- Ragatz, G. L. and Mabert, V. A. (1988), An evaluation of order release mechanisms in a job shop environment, *Decision Sciences*, 19(1), 167-189.
- Rohleder, T. R. and Scudder, G. D. (1993), A comparison of order-release and dispatch rule for the dynamic weighted early/tardy problem, *Production and Operations Management*, 2(3), 221-238.
- Shimoyashiro, S., Isoda, K. and Awane, H. (1984), Input scheduling and balance control for a job shop, *International Journal of Production Research*, 22(4), 597-605.
- Smith, M. L. and Seidmann, A. (1983), Due date selection procedures for job-shop simulation, *Computers and Industrial Engineering*, 7(3), 199-207.