

전산화된 공장에서의 납기결정 방안에 관한 연구[†]

김재만* · 김성식**

A Study on the Due-date Estimation for Some Computerized Manufacturing Systems

Jae Man Kim* · Sung Shick Kim**

Abstract

In manufacturing systems, to overcome the inherent complexities and uncertainties, due-dates are usually decided by some simple rules. This study proposes a computational procedure for estimating production lead time for computerized manufacturing systems. Based on the current system status stored in the computers, the procedure estimates production lead time for an incoming order. The result is more accurate than the ones produced by old rules, and yet the procedure is fast in computation speed enough to use in real time. Simulations are used to prove these.

1. 연구의 배경 및 목적

생산시스템에서 납기의 중요성은 절대적이다. 생산시스템을 대상으로 하면서 납기에 관련된 연구들은 주어진 납기를 적절히 맞추는 생산계획 수립에 관련된 연구가 주종을 이루며, 주문이 들어왔을 때 납기를 결정하는 문제에 대한

연구는 전자에 비하면 그 수가 상당히 적다. 또한 현실적으로 대부분의 생산시스템에서의 납기결정은 과거 실적에 근거하여 대체적인 납기를 추정하는 방법을 쓰고 있다.

납기를 결정할 때 고려되어야할 요인은 여러 가지가 있으나 이중 가장 중요한 요인은 대상 생산시스템이 현재의 능력으로 주문을 생산하는데 걸리는 기간이다. 주문이 들어왔을 때 생

* 고려대학교 산업공학과 자동화 연구실

** 고려대학교 산업공학과 교수

산자는 현재의 생산시스템 능력으로 언제까지 그 주문을 처리할 수 있을 것인가를 결정하고, 이 기간과 그 외 다른 요인들을 바탕으로 고객과 협상을 한 후 납기를 결정하게 된다. 본 연구는, 주문의 합리적인 납기결정을 위하여, 주문이 들어왔을 때 그 주문을 소화하는데 걸리는 시간(주문별 예상완료 시점)을 가능한 한 정확히 추정하는 방법을 제안하는데 목적을 두고 있다.

납기결정을 위하여 주문별 예상완료 시점을 결정할 때에는 생산시스템의 경쟁력과 주문의 납기준수 가능성을 함께 고려하여야 한다. 주문의 납기를 무리하게 짧게 잡으면 해당 주문 뿐 아니라 다른 주문의 납기준수도 어려워지는 반면, 주문의 납기를 길게 잡으면 생산시스템의 경쟁력이 약화된다. Wein[11], Wein과 Chevalier[12]는 평균 납기 지연된 주문 수의 비율이나 평균 납기 지연 시간(Mean Tardiness)을 일정 수준으로 유지하는 제약하에서 주문이 발생된 시점에서 납기까지의 시간 크기인 납기 리드타임(Due Date Lead Time, DDLT)의 평균을 최소화하는 문제를 납기결정 방식의 평가척도로 제안하였다. 이 평가척도는 생산시스템의 경쟁력과 주문의 납기준수 가능성을 동시에 고려하는 것이다. 본 연구에서도 여기서 제안하는 주문별 예상완료 시점 계산방식을 Wein[11]의 평가척도에 의해 분석한다.

Wein[11]의 평가척도를 향상시키기 위해서는 계산된 주문별 예상완료 시점이 주문의 실제 완료 시점을 정확히 추정하여야 한다. 물론 가장 정확한 주문별 예상완료 시점은 상세 생산일정을 수립한 결과로 얻어질 수 있다. 그러나 생산시스템은 주문의 발생이나 기계의 고장과 같은 예측할 수 없는 사건이 발생 가능한 동적인 특성을 가지고 있기 때문에 수립된 상

세 생산일정이 주문의 완료시점을 반드시 정확하게 예측한다는 보장이 없다. 또한 주문의 납기결정을 위해서 주문별 예상완료 시점을 이용하려면 계산이 빠른 시간내에 수행되어야 하는데, 상세 생산일정 수립은 적지 않은 시간과 노력이 소요되는 일이다. 결국 납기결정에 이용할 수 있는 효과적인 주문별 예상완료 시점 계산 절차가 필요하다.

최근 들어 주문에 대한 생산자 입장의 납기 결정 문제는 많은 연구에서 다루어져 왔으며, Cheng과 Gupta[5], Hendry와 Kingsman[8]은 이러한 연구들을 정리하였다. 주문의 납기 결정문제는 간단한 규칙(Rule)을 이용하는 것이 대부분이며, Baker와 Bertrand[2], Cheng[4], Elion과 Chowdhury[6], Fry등[7], Wein[11], Wein과 Chevalier[12]의 연구가 이에 속한다. 이외에 Rajasekera등[9]은 대기행렬망(Queueing Network) 이론과 수리적 모델(Mathematical Programming)을 이용하여 주문의 납기를 결정하는 방법을 제안하였고, Billington 등[3]은 수리적 모델을 이용하여 주문의 납기 결정에 관련된 연구를 수행하였다. 이 중 대기행렬망이나 수리적 모델을 이용하는 연구에서는 주문이나 수요 형태를 기본 입력정보로 가정할 뿐 아니라 문제의 크기가 커질 경우 계산에 많은 시간이 소요되는 단점이 있다. 반면 규칙을 통한 납기 결정 연구들은 현장과 주문 정보를 너무 단순화시켜 이용함으로써 계산이 부정확해질 가능성이 높다.

실제 대부분의 생산업체에서는 과거의 경험에 근거한 제품별 리드타임을 주문의 예상완료 시점으로 이용하는 경우가 많다. 그 이유는 제품별 리드 타임 정보는 상대적으로 얻기 쉬운 값이고, 과거에는 주문 발생시마다 생산현장의 정보를 실시간으로 획득하여 주문별 예상완료

시점 결정에 이용하기도 힘들었기 때문이다. 그러나 제품별 리드타임은 동적으로 변화하는 생산현장의 부하를 전혀 고려하지 않기 때문에 주문의 예상완료 시점결정에 효과적으로 이용될 수 없다.

본 연구에서 대상으로 하는 생산시스템은 생산현장의 상태가 항시 모니터링 되고 유지되는 전사화된 Job Shop형태의 가공 공장이다. 여기서 제안하는 주문별 예상완료 시점은 계산시 생산현장 상황에 대한 실시간 정보를 이용하는 데, 구체적으로 이용되는 정보는 생산이 이미 진행되고 있거나 계획된 기계군별 제품종류 및 수량이다. 기존의 규칙을 통한 주문별 납기결정에서는 생산현장의 상황을 대기 작업물 수와 같이 단순한 총량으로 표현하여 이용하지만 여기서 제안하는 주문별 예상완료 시점 계산방식에서는 제품 종류별 가공경로와 제품수량을 모두 고려하여 생산현장의 부하를 상세하게 고려한다. 또한 계산이 비교적 빠른 시간내에 수행될 수 있으므로 계산결과가 주문의 납기결정 과정에서 효과적으로 이용될 수 있다.

여기서 제안하는 주문별 예상완료 시점 계산방식의 효과는 시뮬레이션을 통하여 기존의 규칙을 통한 주문의 납기결정 방식의 경우와 비교, 분석한다.

2. 기존 납기결정 방식

주문별 납기결정에 관련된 기존 연구들에서는 대부분 납기결정을 위한 간단한 규칙(Rule)을 제안하고, 그 규칙을 이용하여 주문의 납기를 결정하였다. Hendry와 Kingsman[8]은 납기결정을 위한 규칙들을 그 규칙이 이용하는

정보의 종류에 따라 다음과 같은 3가지 범주로 분류하였다.

- (1) 주문이 발생한 시점에서 일정한 크기나 랜덤한 크기의 시간을 더하는 단순 모델
- (2) 발생된 주문의 가공시간 정보와 같은 해당 주문 자체 정보만을 고려하는 모델
- (3) 주문 자체 정보이외에 주문이 발생한 시점의 생산현장 혼잡도를 고려하는 모델

첫번째 범주에 속하는 것으로 대표적인 규칙은 CON(CONStant)인데, 이 규칙은 모든 제품종류에 동일한 크기의 납기 리드타임(DDLT)을 주어 주문의 납기를 결정하는 것이다. 이 규칙은 생산되는 제품들의 리드 타임이 거의 일정하게 유지될 때 적용 가능하지만 Job Shop환경에서 이러한 전제조건은 성립되기 힘들다. Baker와 Bertrand[2]는 Simulation을 통하여 Job Shop환경에서 범주(1)에 속하는 규칙이 다른 두 범주의 규칙들보다 좋지 않은 성능을 나타냄을 보였다.

두번째 범주에 속하는 규칙의 대표적인 것은 TWK(Total WorK content)와 NOP(Number Of Process)이다. TWK는 발생한 주문의 가공시간의 총합을 근거로 납기를 결정하는 규칙이고, NOP는 발생한 주문의 총공정수를 근거로 납기를 결정하는 규칙으로 다음 식 (i)과 (ii)로 각각 표현된다.

$$DD = AD + (K \times TWK) \quad (i)$$

$$DD = AD + (L \times NOP) \quad (ii)$$

이때 DD는 납기, AD는 주문발생시점(Arrival Date)이며, TWK는 주문의 가공시간 총합, NOP는 주문의 총공정수이다. L과 K는 조정모수(control parameter)이다. 이 두개의 규칙을 조합한 TWK+NOP규칙은 다음의 (iii)과 같은 형태로 표현된다. Cheng[4]의 연구결

과에 따르면 (iii)에 의한 주문별 납기결정 방식이 (i)이나 (ii)를 이용한 것보다 좋은 결과를 나타낸다.

$$DD=AD+(K \times TWK)+(L \times NOP) \quad (iii)$$

세번째 범주에 속하는 규칙의 대표적인 예는 Elion과 Chowdhury[6]가 제안한 것으로 (iv)와 (v)와 같이 표현된다. 여기서는 주문자체의 정보이외에 현장의 혼잡도 정보를 함께 고려하였다.

$$DD=AD+(K \times TWK)+(L \times W) \quad (iv)$$

$$DD=AD+(K \times TWK)+(L \times Q) \quad (v)$$

K와 L은 식 (iii)의 경우와 마찬가지로 조정모수이며, (iv)의 W는 대기시간을 추정한 값이고, (v)의 Q는 기계앞 대기행렬의 길이이다. 식 (iv)에서 W는 추정하기 힘든 값인 반면, 식 (v)의 Q는 쉽게 얻을 수 있는 값이므로 (v)에 의한 방법이 쉽게 적용될 수 있다. (v)의 식과 같은 규칙은 TWK 규칙에 현장의 작업불수를 함께 고려한 것으로 TWK+JIS(Job In System)규칙이라 부르기도 한다.

5장에서는 시뮬레이션을 통하여 위의 3가지 범주의 대표적인 규칙들인 CON과 TWK+NOP, TWK+JIS를, 본 연구에서 제안하는 주문별 예상완료 시점 계산절차와 성능을 비교하여 본다.

3. 문제의 정의 및 대상 환경

본 연구의 대상은 전산화된 일반 가공 공장의 납기이다. 전산화된 공장이란 생산현장의 정보가 실시간으로 파악, 유지되어 생산일정

수립시 이 정보가 이용되며, 수립된 생산일정은 생산현장에 직접 전달되는 공장이다. 그림 1은 이와 같은 전산화된 공장의 운영방식을 도시한 것이다. 주문은 공장 외부로부터 발생되는데, 주문이 발생하게 되면 그림 1에서처럼 주문 예상완료 시점 계산 기능에서 생산일정 수립 기능으로부터 전달받은 생산현장 정보를 이용하여 주문의 예상완료 시점을 계산한다. 계산된 예상완료 시점은 고객에게 제시되어 주문의 납기결정시 이용되며, 고객과의 타협과정을 통해 납기가 결정된 주문은 생산일정 수립 기능에 의해 생산 일정이 수립된다.

여기서 대상으로 하는 전산화된 공장은 여러 종류(N 개)의 제품을 생산할 수 있으며, 서로 다른 복수 개(M 개)의 기계군으로 구성된 Job Shop형태의 생산시스템이다. 각 제품종류별로 가공경로 및 가공경로 상의 각 기계군에서의 가공시간은 고정되어 있다고 가정한다. 실제 생산 자동화의 진척에 따라 특정 공정별 기계의 작업 시간은 큰 변동이 없기 때문에 이러한 가정은 현실 상황을 반영한 것이다. 이외에 작업준비 시간이나 이동시간은 주문별 예상완료 시점 계산시 별도로 고려하지 않으며, 납기결정시에 주문간의 별도의 우선순위도 고려하지 않는다.

다음은 본 연구에서 사용된 기호를 정의한 것이다. 주문은 발생된 순서에 따라 u라는 지수가 부가된다.

i : 제품 종류 Index, $i = 1, 2, \dots, N$

j : 기계군 Index, $j=1, 2, \dots, M$

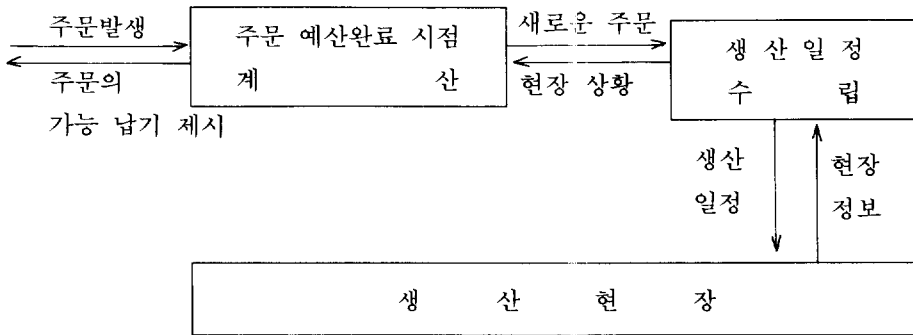
$r_{i(k)}$: 제품 i 의 k 번째 작업을 담당하는 기계군

p_j : 제품 i 의 j 기계군에서 단위 Lot 가공시간

O_u : u 번째로 발생한 주문

a_u : u 번째로 발생한 주문의 발생시점

D_u : u 번째로 발생한 주문의 납기



[그림 1] 전산화된 공장의 운영

계산된 주문별 예산완료 시점의 성능은 주문의 예산완료 시점이 실제 주문의 납기로 간주되어 생산현장을 운영한 결과 해당 주문의 작업이 모두 완료된 시점에서 측정될 수 있다. 주문별 예산완료 시점은 생산시스템의 경쟁력과 주문의 납기준수 가능성을 함께 고려하여야 한다. 그런데 과거의 납기결정 관련 연구들에서는 평균 납기 지연시간(Mean Tardiness)과 같은 기존의 납기 관련 성능평가척도를 이용하여 납기결정 방식의 성능을 평가하였고, 이러한 납기 관련 성능평가척도들은 대부분 주문의 납기준수 가능성에 대한 성능만을 평가하는 것이기 때문에 납기결정 방식의 생산시스템 경쟁력에 관련된 성능은 평가할 수 없었다.

본 연구에서는 주문별 예산완료 시점 결정방식의 납기준수 가능성뿐만 아니라 생산시스템의 경쟁력에 미치는 영향을 함께 평가하기 위하여 Wein[11]이 제시한 성능평가 방식을 이용하여 주문별 예산완료 시점 방식의 성능을 평가한다. Wein[11]은 주문의 납기 리드타임을 주문이 발생된 시점과 납기간의 시간 크기로 정의했을 때, 복수개의 납기결정 방식간의 성능을 비교하기 위한 다음 두 가지 유형의 성능

평가 방안을 제안하였다.

$$\begin{aligned} \text{(유형 1)} \quad & \text{Min} \quad \bar{D} \\ & \text{Subject to} \quad \bar{P} \leq p \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{(유형 2)} \quad & \text{Min} \quad \bar{D} \\ & \text{Subject to} \quad \bar{T} \leq t \end{aligned}$$

여기서 \bar{D} 는 평균 납기 리드타임이며, \bar{P} 는 평균 납기 지연된 주문 수의 비율이고, \bar{T} 는 평균 납기 지연 시간이다. 유형 1은 평균 납기 지연된 주문 수의 비율이 일정 수준 p 를 넘지 않는 제약하에서 평균 납기 리드 타임을 최소화시키는 납기결정 방식이 가장 좋은 성능을 가지는 납기결정 방식임을 의미하는 것이고, 유형 2는 평균 납기 지연시간이 일정 수준 t 를 넘지 않는 제약 하에서 평균 납기 리드 타임을 최소화시키는 납기 결정 방식이 가장 좋은 성능을 가지는 납기 결정 방식임을 의미하는 것이다. Wein과 Chevalier[12]는 위의 두 가지 유형중 유형 1이 실제 생산현장의 필요성을 적절하게 반영한 것이라고 보았다.

6장에서는 2장에서 제시한 CON, TWK+NOTR, TWK+JIS규칙에 의한 납기결정 방식과 본 연구에서 제안하는 주문별 예산완료 시

점 계산 방식의 성능 비교를 위의 유형 1을 통하여 수행한다.

4. 예상완료 시점 계산시의 고려사항

주문별 예상완료 시점 계산이 주문의 납기결정 과정에서 효과적으로 이용되기 위해서는 계산된 시점이 실제 완료 시점을 정확하게 추정해야할 뿐 아니라 계산이 빠른 시간 내에 수행되어야 한다. 그런데 계산 결과의 정확성이나 계산 소요 시간은 계산에 이용되는 생산현장 정보의 상세한 정도에 많은 영향을 받는다. 즉 주문별 예상완료 시점 계산은 이용하는 현장 상황 정보가 상세할수록 정확한 완료 시점을 추정할 가능성이 높아진다. 그러나 NP-Hard 계층에 속하는 생산계획 관련 문제들의 특성상 계산에 이용되는 정보가 상세해질 수록 계산시간이 증가될 가능성도 높아진다. 더욱이 기계고장이나 주문발생과 같은 예측하기 힘든 사건들의 발생 가능성을 감안한다면 너무 상세한 현장 정보를 사용하여 주문의 예상완료 시점을 계산하는 것은 바람직하지 못하다.

예를 들어 주문의 납기결정시 과거 경험에 근거한 제품별 리드 타임(Lead time)을 이용하는 방법은 빠른 시간 내에 완료 시점을 추정할 수 있지만 주문이 발생한 시점의 현장 상황을 계산에 전혀 반영하지 못한다. 반면 해당 주문을 포함하여 상세 생산일정을 수립하는 것은 주문이 발생한 시점의 생산현장 상황을 가장 상세하게 고려하는 방법이다. 그러나 생산 일정 수립은 일반적으로 많은 계산량을 필요로 하는 작업이며, 생산현장의 동적인 특성 때문

에 수립된 생산 일정이 계속 유지된다는 보장이 없다. 현장 혼잡도를 고려하는 납기결정 규칙인 TWK+JIS는 현장정보를 대기행렬의 길이로 파악하는데 이 정보는 생산이 계획되어 있거나 진행중인 제품 종류 및 수량 조합에 따른 현장 부하를 정확히 측정하기 힘들다.

본 연구에서 제안하는 주문별 예상완료 시점 계산절차에서는 주문이 발생한 시점에서 생산이 계획되어 있거나 진행중인 제품들의 종류 및 수량 조합(Product Mix)에 따른 현장 부하를 고려하여 주문의 예상완료 시점을 계산한다. 여기서는 제품 종류와 기계군별 생산계획 수량을 생산이 진척된 수준에 따라 구분하고, 이 현장정보를 제품별 가공경로와 가공시간 정보를 이용하여 개별 기계군의 부하로 환산하는 과정을 통하여 생산현장 상황이 주문의 예상완료 시점 계산과정에 반영되도록 하였다.

5. 예상완료 시점 계산 방식

5. 1. 예상완료 시점 계산절차

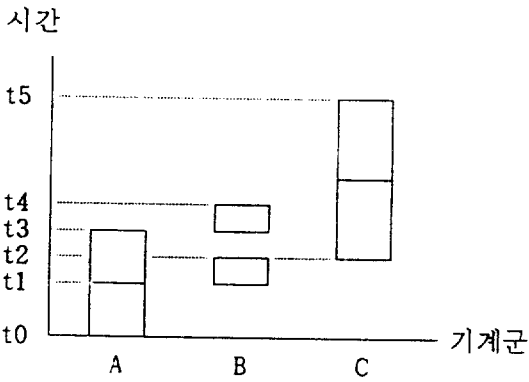
본 연구에서 제안하는 주문별 예상완료 시점 계산절차에서는 각 기계군에 작업이 계획되어 있는 제품별 Lot 수량 정보를 이용하여 계산을 수행한다. j 기계군에 작업이 계획된 제품 i 의 Lot 수량을 나타내는 정보를 여기서는 $Load(j, i)$ 로 표현한다. $Load(j, i)$ 는 기계군 j 앞에서 가공을 받기 위해 대기하는 제품 i 의 Lot 수량과 기계군 j 앞에서 대기하고 있지는 않지만 가공경로상 기계군 j 에서 작업 받아야할 제품 i 의 Lot 수량을 함께 나타낸다. 이 수량은 해당 기계군에서 작업이 완료될 때와 새로운 주

문이 발생되었을 때 각기 감소, 증가한다. 이 정보에는 제품 Lot단위의 가공경로별 완료 시점과 같은 시점 정보는 포함되지 않는다.

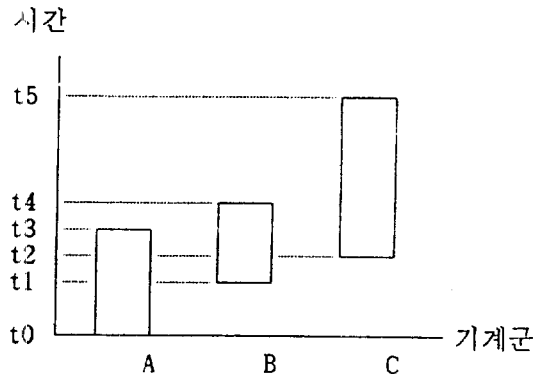
본 연구에서 제안하는 주문별 예상완료 시점 계산절차에서는 새로운 주문이 발생했을 때, 해당 주문은 각 기계군에서 이미 수주된 기존 주문들의 작업이 모두 완료된 후에 가공 받을

수 있다는 가정에서 예상완료 시점을 계산한다. 이것은 생산현장의 생산 일정이 발생 시점이 빠른 주문부터 먼저 처리하도록 수립된다는 것을 가정한 것으로, 이 가정은 새로 발생한 주문으로 인한 기존 주문들의 납기지연을 억제하기 위한 것이다.

이런 전제하에서 주문별 예상완료 시점을 계



(a) Lot 단위의 부하표현



(b) 부하영역

[그림 2] 부하영역 산출예

산하기 위해서는 각 기계군별로 주문이 발생된 시점에서 기존 작업물들의 작업이 모두 처리되는 시점(Makespan)에 대한 정보가 있어야 하는데 이 시점은 상세 생산일정을 수립해보기 전에는 알아내기가 힘들다. 여기서는 각 기계군별 작업완료 시점(Makespan)을 추정하기 위하여 기계군별 부하영역이란 개념을 도입한다. 기계군별 부하영역은 부하 발생 시점과 부하 소멸 시점으로 정의되는데, 부하 발생 시점과 부하 소멸 시점간의 시간대는 해당 기계군에서 작업이 진행중일 가능성이 있는 시간대를 추정한 것이며, 부하 소멸 시점은 해당 기계군의 작업완료 시점(Makespan)의 추정치가 된다. 부하영역은 다음 (i) - (iii)의 절차를 통해 계

산되며, 그림 2는 과정 (i)과 (ii)에 해당하는 간단한 예를 도시한 것이다.

(i) 동일한 제품 Lot이 복수개 생산 계획되어 있을 때는 이들 Lot이 각 기계군에서 연속적으로 가공을 받는다고 가정한다.

(ii) 각 제품 종류별로 가공 경로상의 기계군들의 부하영역을 산출하는데 부하영역은 전후 공정간의 가공시간 대소관계를 이용하여 쉽게 얻어질 수 있다. 예를 들어 그림 2의 (a)는 가공경로 A, B, C를 가지는 어떤 제품 2 Lot이 각 기계군에서 연속적으로 가공 받는다고 가정했을 때의 Lot단위 일정이다. 이때 각 기계군에서 하나의 블럭 길이는 단위 Lot의 가공시간을 나타낸다. 그림 2의 (a)에서 그림 2의

(b)와 같은 부하영역이 산출되는데 그림 2의 (b)에서 각 블록의 시작점과 완료점이 부하 발생 시점과 부하 소멸 시점이다. 즉 기계군 A의 부하 발생 시점과 부하 소멸 시점은 각각 t_0 , t_3 이며, 기계군 B는 t_1 , t_4 , 기계군 C는 t_2 , t_5 이다. 이 부하영역은 그림 2의 (a)와 같이 개별 Lot을 모두 고려하지 않고도 쉽게 산출할 수 있다.

(iii) 제품 종류별로 그림 2의 (b)와 같이 각 기계군에 대한 부하영역이 산출되면 각 기계군별로 해당 기계군에 대한 제품별 부하영역을 더해서 각 기계군별 최종 부하영역을 산출한다.

위와 같이 기계군별 부하영역이 산출되었을 때, 각 기계군의 부하 소멸 시점은 해당 기계군에서 새로 발생된 주문이 가공을 시작할 수 있는 가장 빠른 시점이 된다. 따라서 새로 발생된 주문의 가공경로상에 있는 각 기계군의 부하 소멸 시점에 가공시간을 더하는 과정을 순차적으로 진행시켜 최종적으로 해당 주문의

예상 완료 시점을 구할 수 있다.

위의 계산절차에서 기계별 고장에 따른 지연 효과를 고려하고자 한다면 (iii)의 기계군별 부하영역 산정시 해당 기계군의 고장예상시간만큼 부하영역을 연장시키는 방법으로 쉽게 고려될 수 있다.

다음은 위에서 제시한 예상완료 시점 계산절차의 의사코드(Pseudo Code)이다. 여기서 $Load_end(j, i)$, $Load_start(j, i)$ 는 과정 (ii)에 의해 계산된 각 제품 i 에 대한 기계군 j 의 부하 발생 시점과 소멸 시점이다. $Mac_start(j)$ 와 $Mac_end(j)$ 는 각각 과정 (iii)에서 기계군 j 에 대해 각 제품별 부하영역을 합성한 결과로 산출되는 부하발생 시점과 소멸 시점이다. $Maxmac(j)$ 각 기계군 j 에서의 가공시간중 가장 큰 값이며, R_i 는 제품 i 의 가공경로의 수이다. ECT (Expected Completion Time)은 여기서 구하고자 하는 주문 O_i 의 예상완료 시점이다. 이외에 나머지 기호는 3장에서 제시한 것과 동일하다.

Step 0. $i = 1$

Step 1. $k = 1$

Step 2. $j = r_{i[k]}$, $j' = r_{i[k]}$

k 가 1이거나 $Load(j, i) - Load(j', i)$ 이 0보다 크면 Step 3으로, 아니면 Step 4로

Step 3. $Load_start(j, i) = 0$, Step 5로

Step 4. $Load_start(j, i) = Load_start(j', i) + p_{ij}'$

Step 5. $Load_end(j', i) + p_{ij}$ 가 $Load_start(j, i) + p_{ij} \times Load(j, i)$ 보다 크면 Step 6으로, 아니면 Step 7로

Step 6. $Load_end(j, i) = Load_end(j', i) + p_{ij}$, Step 8로

Step 7. $Load_end(j, i) = Load_start(j, i) + p_{ij} \times Load(j, i)$

Step 8. k 가 R_i 와 같고 i 와 N 과 같으면 Step 9로.

k 가 R_i 와 같고 i 가 N 보다 작으면 $i = i + 1$, Step 1로

k 가 R_i 보다 작으면 $k = k + 1$, Step 2로

- Step 9. $j = 1$
 Step 10. $Mac_start(j) = \underset{i}{Min} [Load_start(j, i)],$
 $i = 1$
 $Mac_end(j) = Mac_start(j)$
 Step 11. $Mac_end(j) = Mac_end(j) + (Load_end(j, i) - Load_start(j, i))$
 Step 12. i 가 N 과 같고 j 가 M 과 같으면 Step 13으로
 i 가 N 과 같고 j 가 M 보다 작으면 $j = j + 1$, Step 10으로
 i 가 N 보다 작으면 $i = i + 1$, Step 11로
 Step 13. $End = 0, k = 1$
 $i = O_v$ 의 제품종류
 Step 14. $j = r_{i|k}$
 End 가 $Mac_end(j, i)$ 보다 크면 Step 15로 아니면 Step 16으로
 Step 15. $End = End + p_{ij} + \underset{i}{Max} mac(j) (여기서 Maxmac(j) = \underset{i}{Max} [p_{ij}])$
 Step 17로
 Step 16. $End = Mac_end(j) + p_{ij} + Maxmac(j)$
 Step 17. k 가 R_i 보다 작으면 $k = k + 1$, Step 14로
 아니면 Stop, $ECT = a_v + End$

위의 의사코드의 Step 1에서 Step 8의 절차에서는 각 제품 i 에 대한 기계군 j 의 부하영역을 계산한다. 제품 i 에 대한 기계군 j 의 부하영역은 각 제품 i 별로 작업 계획된 Lot 갯수에 무관하게 Step 5에서 Step 7의 방식에 의해 간단하게 산출할 수 있다. Step 9에서 Step 12는 제품종류별로 각기 결정된 기계군의 부하영역을 개별 기계군을 중심으로 합성하는 절차이며, Step 13에서 Step 17의 절차에서는 기계군 j 부하영역의 부하 소멸 시점 $Mac_end(j)$ 를 새로 발생된 주문의 해당 기계군에서 가장 빠른 작업시작 가능 시점으로 간주하여 해당 주문의 예상완료 시점을 계산한다.

Step 15에서는 각 기계군별 부하 소멸 시점에 해당 기계군 j 에서 가장 긴 가공시간 $Maxmac(j)$ 을 더하여 부하 소멸시점을 보정한다. 여기서 제안하는 예상완료 시점 계산절차

에서는 추후 발생하는 주문이 미치는 효과가 생산현장이 주문이 발생된 순서가 빠른 순으로 작업을 처리하도록 운영된다는 가정에서 간접적으로 고려된다. 그런데 추후 발생하는 주문이 가공경로의 차이 때문에 특정 기계군을 기존 주문들보다 먼저 점유할 가능성이 있다. 예를 들어 가공경로가 기계군 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 인 제품 1과 기계군 $C \rightarrow B \rightarrow A$ 인 제품 2가 있을 때 제품 1에 대한 주문이 발생된 시점에서 기존 주문은 모두 제품 2에 대한 것뿐이라면 새로 발생된 주문이 기계군 C 나 B 를 먼저 점유할 가능성이 있다. 이 경우 기존 주문에서 납기결정시 예상하지 못했던 작업지연이 발생할 수 있다. Step 15는 이런 효과를 고려한다.

대상 생산현장에 기계군 j 가 동일한 기계가 m_j 로 구성되면 m_j 가 커질수록 기계군 j 의 작업 처리능력도 증가하게 되고, 기계군의 부하

영역 산출시 이러한 요인이 반영되어야 한다. 여기서는 이것을 기계군 j에 대해 동일기계 대수 m_j 에 반비례하는 보정계수함수 $f(m_j)$ 를 도입하여 고려하는데, 구체적으로 위의 의사코드에서 $p_{ij} \times \text{Load}(j, i)$ 를 $\text{Load}(j, i) \times p_{ij} \times f(m_j)$ 로 치환한다.

여기서 제안하는 주문별 예상완료 시점 계산 절차는 대상 생산시스템이 생산하는 제품 종류가 N개 기계군의 수가 M개라고 할 때 O ($M \times N$)의 복잡성(Complexity)을 가진다. 일반적으로 생산현장의 부하를 상세하게 평가하기 위해서는 생산현장에 투입되어 있는 Lot의 수에 계산량이 크게 영향을 받게 되는데, 여기서 제안된 주문별 예상완료 시점 계산절차에서는 생산현장내의 Lot의 수에는 계산시간이 전혀 영향을 받지 않는다. 또한 위의 의사코드의 Step 1에서 Step 8의 절차에서 결정하는 제품 i에 대한 기계군 j별 부하영역은, 주문이 발생될 때마다 새로 계산할 필요없이, 생산현장에서 작업이 진행됨에 따라 실시간으로 수정, 유지할 수 있다. 따라서 여기서 제안하는 주문별 예상완료 시점 계산절차는 비교적 빠른 시간내에 계산을 수행할 수 있다.

5. 2. 예 제

5. 1절에서 제안한 주문의 예상완료 시점 계산방식을 예를 들어 설명하면 다음과 같다. 서로 다른 기계 A, B, C의 3대가 있는 공장에서 제품 1, 2가 있을 때 제품 1은 A→B→C의 가공경로를 가지며, 각 경로에서 1 Lot의 가공시간은 2, 1, 3이다. 제품 2는 A→C→B의 가공경로를 가지며 각 경로에서 1 Lot의 가공시간은 1, 3, 2이다. 현재 공장에서 생산계획된 수량은 제품 1이 2 Lot, 제품 2가 3 Lot이다. 여기에

따르는 현장정보 Load(j, i)는 Load(A, 1)와 Load(B, 1), Load(C, 1)은 모두 2 Lot이고, Load(A, 2), Load(C, 2), Load(B, 2)는 모두 3 Lot이다.

이때 제품 1에 대한 새로운 주문이 1 Lot의 수량으로 발생했다면, Load(A, 1), Load(B, 1), Load(C, 1)은 모두 3 Lot이 되며, 앞서 (i), (ii)의 방식에 따라 제품1 및 2의 각 기계별 부하의 발생 및 소멸 시점을 결정하면 다음과 같다.

제품형태 1

	기계 A	기계 B	기계 C
발생시점	0	2	3
소멸시점	6(2×3)	7(6+1)	12(3+3×3)

제품형태 2

	기계 A	기계 B	기계 C
발생시점	0	4	1
소멸시점	3(1×3)	12(10+2)	10(1+3×3)

여기서 제품 1의 경우 기계 A에서는 3 Lot의 작업물에 대한 가공시간 6이 그대로 부하 소멸 시점으로 산출되었지만 기계 B에서의 부하 소멸 시점은 앞절의 의사코드의 Step 5의 비교절차 및 Step 6의 절차를 거쳐 결정되는데, 앞선 공정의 가공완료 시점에 마지막 제품의 가공시간을 더한 값이 된다. 그리고 다음 기계 C에서의 부하 소멸 시점은 앞절 의사코드의 Step 7의 절차에 의해 가공시간 3에 수량 3을 곱한 값을 부하 발생 시점에 더하여 결정이 된다. 각 기계의 부하 발생 시점은 작업물 1 Lot의 전 단계 가공공정에서의 가공시간을 바탕으로 누적시켜 구한 값이다.

다음으로 (iii)에서와 같이 위의 계산결과에 근거하여 각 기계별로 부하영역을 결정하면 다음과 같다. 여기서 기계 B의 경우 부하 발생 시점은 제품 1의 2와 제품 2의 4중 작은값인

값인 2로 하였고 거기에 위에서 제품 종류별로 환산된 부하영역의 크기를 더하여 기계 B의 부하 소멸 시점이 결정된다.

	기계 A	기계 B	기계 C
발생시점	0	2	1
소멸시점	9(6+3)	15(2+5+8)	19(1+9+9)

제품 1에 대한 주문의 완료 시점은 이 부하 소멸 시점에 각 기계별 최대 가공시간을 더한 것 위에서 결정된다. 즉 제품 1은 경로 A→B→C를 거치고 각각의 가공시간은 2, 1, 3이며 각 기계의 최대 가공시간은 각각 2, 3, 3이므로 A기계에서 예상완료 시점은 $9+2+2 = 13$ 이고, 기계 B에서는 $15+1+3 = 19$ 이다. 이때는 기계 A에서의 완료 시점이 기계 B에서의 부하 소멸 시점보다 빠르기 때문에 기계 B의 부하 소멸 시점을 이 주문의 기계 B에서의 시작 가능 시점으로 잡았다. 같은 방식으로 기계 C에서의 완료 시점은 $19+3+3 = 25$ 이다. 결국 이 예제에서 주문의 예상완료 시점은 주문

의 도착시점에 25를 더한 값이 된다.

6. Simulation 모델 및 결과

여기서는 본 연구에서 제안한 주문별 예상완료 시점 계산방식의 성능을 CON, TWK+NOP, TWK+JIS 규칙의 성능과 시뮬레이션을 통하여 비교, 분석한다.

6. 1. Simulation Model

본 연구의 Job Shop 모델은 5대의 서로 다른 기계로 구성된다. 모델 Job Shop에서는 6 종류의 제품이 생산되며, 각각의 제품은 종류별로 고유한 가공경로를 가지고, 각 가공경로별 가공시간은 상수이다. 다음 표 1은 모델 Job Shop의 가공 정보이다. 표에서 ()로 표시된 것은 제품별로 해당 기계군에서 단위 Lot의 가공시간이며 단위는 시간(hour)이다.

제품 1	: 기계군 4(2, 4)→기계군 1(3, 0)
제품 2	: 기계군 1(1, 4)→기계군 4(2, 0)→기계군 5(3, 2)→기계군 2(1, 8)
제품 3	: 기계군 2(4, 3)→기계군 4(2, 0)→기계군 3(1, 8)
제품 4	: 기계군 3(8, 0)→기계군 5(6, 0)→기계군 2(5, 4)
제품 5	: 기계군 1(6, 2)→기계군 3(7, 4)→기계군 4(8, 2)→기계군 5(6, 2)
제품 6	: 기계군 1(5, 5)→기계군 2(6, 0)→기계군 5(5, 2)→기계군 4(4, 4)→기계군 3(3, 5)

표 1 | 모델 Job Shop의 가공정보

모델 Job Shop에서 발생하는 주문 발생시간 간격은 지수 분포를 따르며, 시뮬레이션은 90000시간 동안 수행하였다. 기존 규칙 적용을 쉽게 하기 위하여 하나의 주문은 한 제품 종류

에 대해 단위 Lot 크기로 발생된다. 생산현장의 혼잡도 수준은 기계 사용율면에서 볼 때 70, 90 %의 2가지 경우로 구분하여 각각 시뮬레이션을 수행하였으며, 두 경우의 주문 발생

의 평균 시간간격은 각각 4.5 시간, 3.4 시간이다.

시뮬레이션 수행시 주문이 발생되면 예상완료 시점 계산절차에 의해 예상완료 시점을 계산하여 이 시점을 해당 주문의 납기로 간주한다. 모델 Job Shop에서는 별도의 작업물 투입 정책(Job Release Policy)이 없고, 발생한 주문은 생산현장에 바로 투입된다. 각 기계에서 작업물 선택 방식은 FIFO+, EDD, Slack, Critical Ratio 의 4가지를 각각 적용하여 보았다. 이 중 EDD, Slack, Critical Ratio 방식은 Baker[1]가 제시한 3가지의 대표적인 납기 중심의 Dispatching 방식이다. FIFO+는 기계에서 작업물 선정시 주문 발생 순서가 빠른 순으로 우선순위를 두는 방식으로, 기계에 먼저 도착한 순서로 가공을 받는 일반적인 FIFO방식과 구분하기 위하여 FIFO+라 표현하였다. FIFO+는 본 연구에서 제안하는 주문별 예상완료 시점 계산절차의 생산현장 운영방식에 대한 기본 가정이다.

주문별 예상완료 시점 계산방식의 성능은 3장에서 제시된 Wein[11]의 유형 1에 의해 평가한다. 여기서는 납기 지연된 주문 수의 평균 비율을 일정수준 이하로 제약할 때 평균 주문 리드 타임을 이용하여 주문별 예상완료 시점 계산 방식의 성능을 평가하는데 본 연구에서는 여기서 납기 지연된 주문 수의 평균 비율의 상한을 1%로 하였다. 기존의 TWK+NOP와 TWK+JIS의 경우는 조정모수를 변화시켜 실험 결과가 이 제약을 만족하도록 하였다. 본 연구에서 제안하는 주문별 예상완료 시점 계산절차에서는 기계군 j 의 동일한 기계 대수 m_j 에 대한 보정계수함수 $f(m_j)$ 가 필요한데 모델 Job Shop의 경우 동일한 기계가 1대씩이기 때문에 보정계수함수 $f(1) = 1$ 로 고정된다.

6. 2. Simulation 결과 및 분석

다음 그림 3과 그림 4는 각각 기계 사용율이 70%인 경우와 90%인 경우에 대한 시뮬레이션 수행 결과이고, 표 2는 시뮬레이션 수행시 CON, TWK+NOP, TWK+JIS 규칙의 조정모수 값이다. 표 2에서 CON 규칙은 특별한 조정모수 없이 납기 리드 타임이 고정되며, TWK+NOP와 TWK+JIS는 K와 L의 두 가지 조정모수를 가지는데 그 의미는 앞서 2장에서 정의된 내용과 동일하다. 그림 3, 4의 그래프상의 Y축은 평균 DDLT이며, X축은 주문별 납기결정방식이다. 생산현장 운영 방식으로 Critical Ratio를 적용한 경우는 본 연구에서 제안하는 예상완료 시점 계산절차의 경우 납기지연된 주문수의 비율에 대한 제약을 만족하지 못했다. 여기서 제안한 예상완료 시점 계산절차는 동일한 기계가 여러 대 존재하지 않을 때는 계산 결과를 보정할 방법이 없기 때문에 생산 현장 운영 방식으로 Critical Ratio를 적용한 경우에는 다른 납기 결정 규칙과 실험결과를 비교할 수 없었다. 그림에서 각 납기 결정방식별로 표시된 3개의 평균 DDLT 값은 Critical Ratio를 제외한 FIFO+, EDD, Slack의 3가지 Dispatching 방식을 각각 적용하였을 때의 실험 결과이다. 표 2에서도 Critical Ratio를 적용하였을 때의 관련 규칙의 조정모수 값은 생략하였다.

여기서 제안하는 예상완료 시점 계산절차의 경우 주문의 납기는 생산현장이 FIFO+로 운영된다는 것을 가정하여 계산되었지만 실험 결과 생산현장 운영 방식이 FIFO+인 경우나 EDD, Slack인 경우 평균 DDLT에 거의 변화가 없었다. Baker[1]는 Critical Ratio 방식은 EDD나 Slack과 우선순위 계산방식의

혼잡도	납기결정 방식	Dispatching rule	납기리드타임	K	J
70%	CON	FIFO ⁺	144 h	X	X
		EDD	149 h	X	X
		Slack	149 h	X	X
	TWK+NOP	FIFO ⁺	X	9.8	12.6
		EDD	X	6.3	9.8
		Slack	X	6.0	9.3
	TWK+JIS	FIFO ⁺	X	6.4	4.2
		EDD	X	5.0	3.0
		Slack	X	4.7	2.9
90%	CON	FIFO ⁺	2149 h	X	X
		EDD	2149 h	X	X
		Slack	2149 h	X	X
	TWK+NOP	FIFO ⁺	X	320.3	155.0
		EDD	X	100.3	68.0
		Slack	X	100.3	68.0
	TWK+JIS	FIFO ⁻	X	12.4	3.7
		EDD	X	12.4	3.5
		Slack	X	12.4	3.5

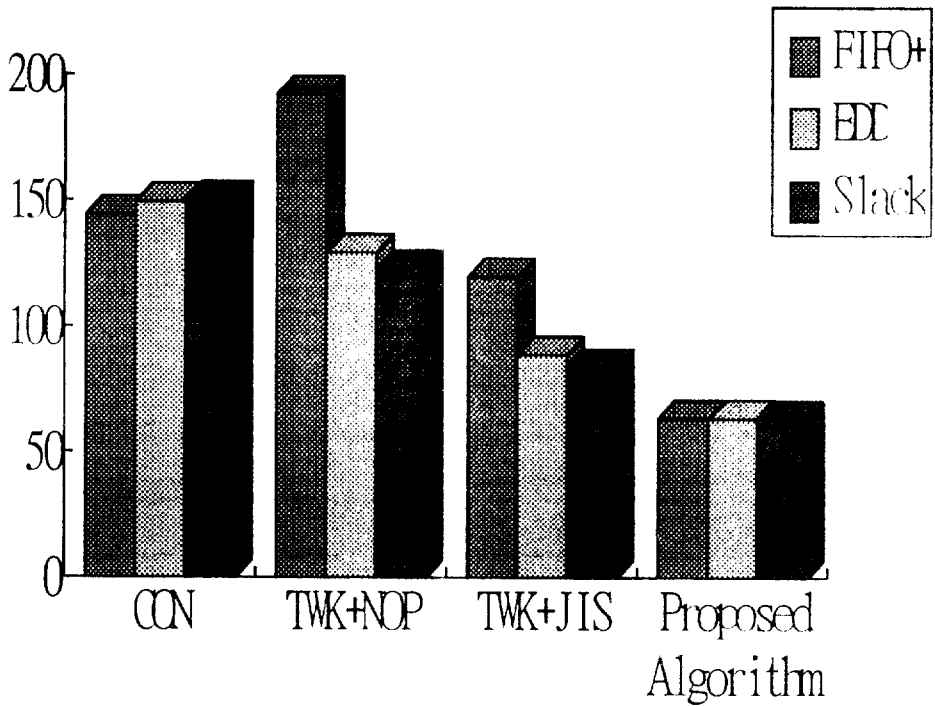
[표 2] Simulation의 납기 결정 규칙 입력치

특성이 크게 다를 뿐 아니라, 완전하게 정의된 Dispatching 방식이라고 보기 힘들다고 보았는데, 여기서의 실험 결과에서도 동일한 결론을 유추할 수 있다.

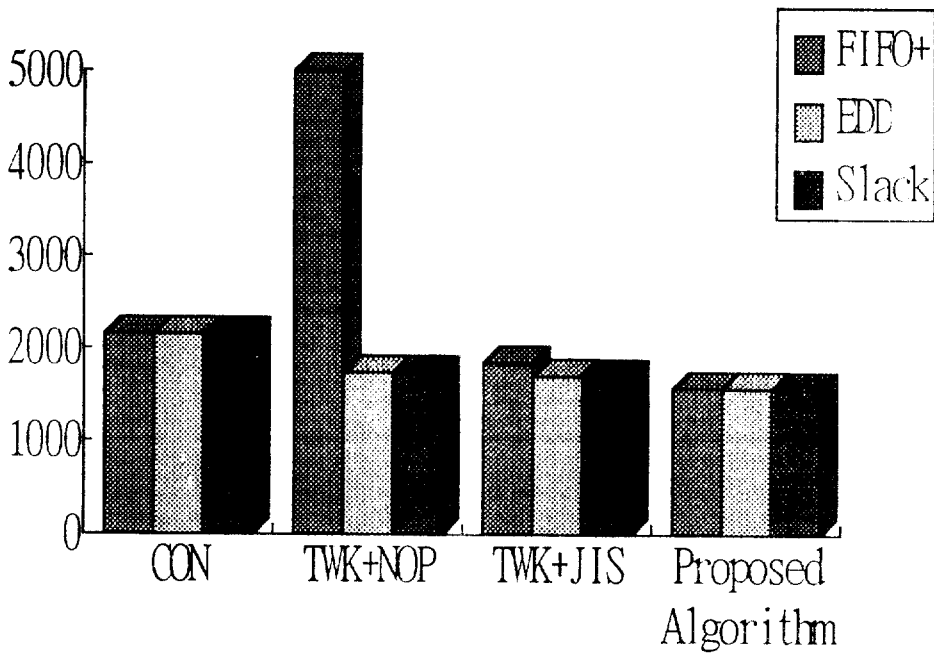
기존의 납기결정 방식을 적용하였을 때는 FIFO+를 제외한 EDD, Slack의 경우 거의 비슷한 실험결과를 나타냈으며, FIFO+는 다른 Dispatching 방식에 비해 평균 DDLT가 크게 나왔다. CON의 경우는 Dispatching 방식에 따라 결과가 거의 영향을 받지 않았다.

실험결과의 오차를 감안하더라도 생산현장 혼잡도 수준에 무관하게 여기서 제안하는 예상

완료 시점 계산절차가 다른 납기 결정 방식에 비해 효과적임을 알 수 있다. 또한 그림에는 표시되지 않았지만 평균 납기 지연 시간이나 평균 납기 지연된 주문의 수 등도 역시 여기서 제안하는 예상완료 시점 계산 절차가 좋은 결과를 나타냈다. CON은 거의 모든 경우에 다른 납기결정 방식보다 나쁜 실험결과를 나타냈다. TWK+JIS는 TWK+NOP 보다 전반적으로 좋은 실험 결과를 가져왔으며, 특히 현장의 혼잡도 수준이 낮을 때 TWK+JIS가 뚜렷하게 좋은 결과를 가져왔다.



[그림 3] 평균 납기 리드 타임의 비교 (기계 사용률 70 %인 경우)



[그림 4] 평균 납기 리드 타임의 비교 (기계 사용률 90 %인 경우)

7. 결 론

본 연구에서는 전산화된 공장을 대상으로 주문 발생시 주문의 합리적인 납기결정을 위한 예상완료 시점 계산 절차에 대해서 다루었다. 전산화된 공장에서는 주문이 발생한 시점의 생산현장의 상황 정보를 주문별 예상완료 시점 계산시 바로 이용할 수 있는데, 이때 이용되는 생산현장 정보의 상세한 정도에 따른 계산 결과의 정확성이나 계산소요 시간에 미치는 영향을 고려하여 예상완료 시점 계산 절차를 설계하여야 한다. 생산자 입장에서 납기 결정에 관련된 기존 연구들 대부분은 생산현장의 상황을 너무 단순화시켜서 고려해 왔다.

여기서 제안하는 예상완료 시점 계산 절차는 주문이 발생한 시점에 생산이 계획되어 있거나 진행중인 제품 종류 및 수량 조합(Product Mix)을 고려하여 주문의 예상완료 시점을 계산하는데, 각 기계군에 대한 부하영역이란 개념을 정의하고, 기계군별로 부하영역을 산출하여 주문의 예상완료 시점을 계산한다. 여기서 제안된 계산절차는 계산을 비교적 빠른 시간내에 수행할 수 있으므로 계산결과가 주문의 납기결정 과정에서 효과적으로 이용될 수 있다. 또한 기존 연구의 대표적인 몇 가지 납기결정 방식과의 성능 비교를 위한 시뮬레이션 수행 결과 여기서 제안하는 주문의 예상완료 시점 계산절차는 평균 납기 지연된 주문 수의 비율이 일정 수준을 넘지 않도록 하는 제약 하에서 평균 DDLT를 감소시키는 좋은 결과를 가져왔다.

추후 연구과제로는 여기서 고려되지 않았던 작업준비 시간이나 주문별 별도의 우선순위에 따른 같은 요소를 예상완료 시점 계산절차에 포함시

키는 것과 더 정확한 계산을 위한 효과적인 보정방안 등이다.

참 고 문 헌

- [1] Baker, K. R., "Sequencing rules and due-date assignments in a job shop", 1984, Vol. 30, No. 9, *Management Science*
- [2] Baker, K. R., Bertrand, J. W. M., "A comparison of due-date selection rules", 1981, Vol. 13, No. 2, *AIIE Transactions*
- [3] Billington, P. J., McLain, J. O., Thomas, L. J., "Mathematical programming approach to capacity-constrained MRP system: Review, formulation and problem reduction", 1983, Vol. 29, No. 10 *Management Science*
- [4] Cheng, T. C. E., "Optimal due-date assignment in a job shop", Vol. 24, No. 3, *International Journal of Production Research*
- [5] Cheng, T. C. E., Gupta. M. C., "Survey of scheduling research involving due date determination decisions", 1989, Vol. 38,
- [6] Elion. S., Chowdhury, I. G., "Due-dates in job shop scheduling", 1976, Vol. 14, No. 2, *International Journal of Production Research*
- [7] Fry. T. D., Philipoom, P. R., Markland, R. E., "Due date assignment in a multistage job shop", 1989, Vol. 21, No.

2, *IIE Transactions*

- [8] Hendry, L. C., Kingsman, B. G., "Production planning systems and their applicability to make-to-order companies", 1989, Vol. 40, *European Journal of Operational Research*
- [9] Rajasekera J. R., Murr, M. R., So, K. C., "A due-date assignment model for a flow shop with application in a lightguide cable shop", Vol. 10, No. 1, *Journal of Manufacturing Systems*
- [10] Vollmann, T. E., Berry, W. L., Whybark, D. C., "*Manufacturing Planning and Control Systems*", 2nd Ed., 1988, IRWIN
- [11] Wein, L. M., "Due-date setting and priority sequencing in a multiclass M/G/1 queue", 1991, Vol. 37, No. 7, *Management Science*
- [12] Wein, L. M., Chevalier, P. B., "A broader view of the job-shop scheduling problem", 1992, Vol. 38, No. 7, *Management Science*