

병렬 기계 공정에서 일정 계획과 투입 계획을 고려한 납기 산정에 관한 연구*

심상오** · †이근철***

Order Promising Methods Considering Scheduling and Order Releasing in Parallel Machine Shops

Sang-Oh Shim** · †Geun-Cheol Lee***

■ Abstract ■

In this study, we consider an order promising problem at parallel machine shops where orders arrive dynamically. We develop methods for the problem, which instantly quote the due-dates of arrived orders. In this study, we first propose methods which can estimate flow times of orders, in which the current and future inventory status as well as the specific scheduling scheme used in the shop are taken into account, and then the due-dates are set by the order promising methods using the estimation results. The quoted due-dates of orders are compared with the actual completion times of those which are obtained from the simulation runs. The series of computational experiments show that the superior performance of the proposed methods in terms of the accuracy of due-date quotation.

Keywords : Order Promising, Scheduling, Order Releasing, Parallel Machine Shop, Simulation

논문접수일 : 2012년 09월 25일 논문수정일 : 2012년 10월 21일 논문게재확정일 : 2012년 11월 04일

* 이 논문은 2010년도 정부재원(교육과학기술부 인문사회연구역량강화사업비)으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음(NRF-2010-327-B00205).

** 한밭대학교 경영회계학과

*** 건국대학교 경영대학

† 교신저자

1. 서 론

최근 들어 고객 만족을 기업의 목표로 설정하고 있는 많은 제조 회사에서는 고객의 주문에 대한 납기 산정(Order Promising) 문제를 매우 중요시 하고 있다. 특히, 반도체나 LCD 패널 등, 부품을 생산/납품하는 B2B(Business to Business)형태의 사업 방식이나, 주문 생산 방식을 추구하고 있는 회사일수록, 납기 산정은 매우 중요한 이슈이지만 정확한 납기의 산정은 요즘과 같이 복잡한 제조 환경에서는 달성하기 쉽지 않은 목표이기도 하다. 가령, 동일 제품, 같은 주문량, 같은 납기일을 갖는 두 개의 주문이더라도 제조 공정의 상태, 재고 현황, 사용하는 일정계획(Scheduling) 방법, 주문의 투입(Order Releasing) 시점 등에 따라 각각의 공기(Lead Time)는 달라질 수 있다. 따라서 제조 시스템의 여러 가지 요인들을 반영한 납기 산정 방법을 개발하는 것이 요구된다. 아울러, 고객 주문에 대한 예상 납기일을 빠르게 알려주는 것도 매우 중요하다. 본 연구에서는, 여러 종류의 일정 계획 방법을 사용하는 병렬 기계 공정에서, 고객의 주문에 대한 정확한 납기를 빠른 시간 내에 산정할 수 있는 납기 산정 방법론을 제안하고자 한다.

고객 주문의 납기를 산정하는 것은 꾸준히 연구되어 오고 있는 일정 계획 연구 분야 중 하나인데, 서베이 연구만 해도 여러 논문이 발표되었다. 먼저, Framinan and Leisten[1]은 납기 산정과 관련한 의사 결정 문제를 주문의 선택 여부, 납기일 할당 여부, 주문의 일정 계획 방법에 따라 여섯 가지의 납기 산정 의사 결정 사항에 대해 소개하였고, Keskinocak and Tayur[2]는 일정 계획 전략, 오프라인 및 온라인, 서비스 수준 등을 고려한 납기 관리와 관련한 다양한 이슈들을 정리하였다. 한편, Kaminsky and Hochbaum[3]은 정적인 주문의 도착, 단일 기계 공정 등의 비교적 단순한 제조 공정 상황에서 여러 주문의 동일한 납기일을 산정하는 문제에 대하여 분석적 방법들을 소개하였다. Gordon et al.[4]에서는 기존의 납기 산정과 관련한 연구를

정리하였는데, 병렬 기계 공정과 단일 공정에서의 선입선출법을 이용하여 다양한 납기 관련 척도를 최소화하는 방법을 다룬 연구들을 소개하고 있다. 그리고 Cheng and Gupta[5]에서는 전체 제조 시스템에서의 납기 산정 방법이 아닌 단위 공정에서 작업의 도착 시간과 작업 시간, 긴급도 등을 고려한 납기 산정 규칙과 이때 사용하는 척도 등을 정리하였다.

납기 산정과 관련한 연구는 양적으로는 많으나 실제 활용을 위해서는 아직 극복해야 할 사항이 많이 남아있다. 먼저, 대다수의 납기 산정 관련 연구들이 단일 기계 공정(Single Machine Shop)같은 매우 단순한 제조 시스템을 대상으로 하고 있다. 두 번째, 많은 연구들이 이미 도착한 주문의 납기 산정만을 고려하고 있다. 즉, 정적인 상황만을 고려하고 있는 것인데, 향후 주문이 동적으로 도착하는 상황(수주가 예상되는 주문)에 대해서는 문제의 복잡도로 인해 관련 연구가 거의 없는 실정이다. 실제 제조 시스템의 현실은 주문의 도착이 동적으로 이루어지고 있기 때문에 현재 도착한 주문과 제조 시스템 내의 재고 상태뿐만 아니라, 향후 도착할 주문까지 고려하여 납기를 산정하는 것이 필요하다. 세 번째는 제조 시스템에서 작업의 우선 순위를 결정하는 일정 계획 방법으로써, 대다수의 기존 연구가 선입 선출법(First In First Out, FIFO)을 사용하고 있는 것을 가정하고 있다. 고객의 주문에 대한 납기 산정을 하기 위해서는 주문이 제조 시스템으로 투입 되었을 때의 제조 시스템의 예상 부하(Workload)를 먼저 산출해야 하는데 이때, 제조 시스템 내에서 사용하는 일정 계획 방법론에 따라 부하가 달라진다. 일반적으로 납기가 중요한 성과 척도로 인식하고 있는 제조 시스템에서는 선입 선출법보다는 납기와 관련한 최소 납기일 규칙(Earliest Due Date, EDD)이나 최소 여유율 규칙(Slack) 등의 우선 순위 규칙(Dispatching Rule)을 선호하여 사용하는 편이다. 하지만, 이러한 우선 순위 규칙을 사용할 때, 납기 산정을 위한 예상 부하량을 산출하는 것과, 선입 선출법을 사용할 때 예상 부

하량을 산출하는 것은 그 문제의 복잡도가 전자가 매우 높은 것으로 알려져 있기 때문에 많은 기존의 연구에서 선입 선출법을 적용한 납기 산정 방법론이 제안되었다. 마지막 고려사항으로, 납기 산정과 관련한 많은 연구가 고객이 요구하는 납기일을 고려하고 있지 않다는 점이다. 일반적으로, 주문의 납기 산정은 고객이 원하는 납기일과 생산자가 제조 시스템 상황을 고려한 납기일을 서로 조율하면서 정하게 되는데, 상당수의 기존 연구들에서는 고객이 바라는 납기일은 고려하지 않고, 제조 시스템의 상황만을 고려하여 납기를 산정하는 방법론이 주로 제안되었다. 본 연구에서는 위에서 언급한 기존의 연구들의 취약점들을 보완하여 실제 제조 시스템에 활용 가능한 납기 산정 방법론을 제안하고자 한다. <표 1>에서는 기존 연구와 본 연구의 차이점을 나타내고 있다.

<표 1> 기존 연구와 본 연구의 방법론의 차이

문제 상황	기존 연구	본 연구
제조 시스템 형태	단일 기계 공정	병렬 기계 공정
주문의 도착	정적(Static)	동적(Dynamic)
고려하는 납기의 종류	제조 납기	제조 납기 및 고객 납기
우선 순위 규칙	선입 선출법	선입 선출법, 최소 납기일 규칙

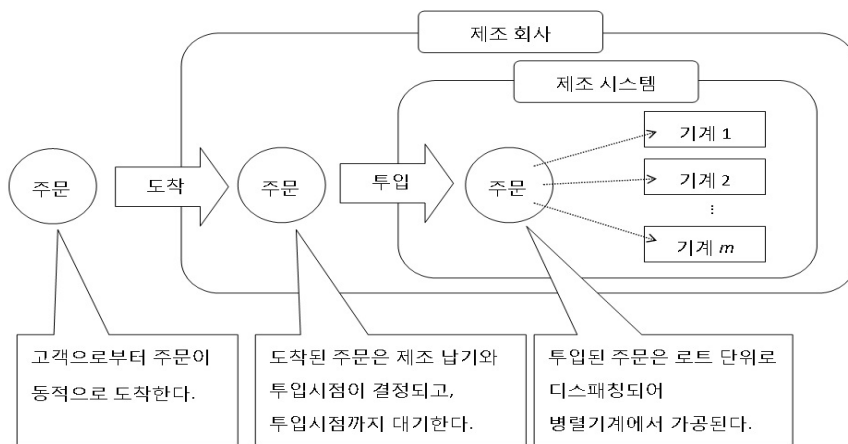
본 논문의 나머지 부분은 다음과 같다. 먼저, 다음 장에서는 본 연구에서 다루고 있는 문제를 상세히 기술하고, 제 3장에서는 제안 방법론을 소개한다. 제 4장에서는 제안된 방법론에 대한 계산 실험 및 결과를 소개한다. 마지막으로 제 5장에서 본 연구의 결론과 향후 연구 계획에 대해 언급한다.

2. 연구 내용

본 연구에서는 동적으로 주문의 도착이 이루어지는 병렬 기계 공정(Parallel Machine Shop)으로 이루어진 제조 시스템에서 선입 선출법과 최소 납기일 규칙을 일정 계획 방법으로 사용할 때, 투입 대기 중인 주문의 고객 납기를 고려하여 주문의 투입 시점과 제조 납기를 결정하는 방법을 제안한다.

병렬 기계 공정은 병렬 처리가 가능한 복수개의 기계로 구성되었기 때문에 한 번에 복수개의 작업을 진행할 수 있다. 따라서 병목 공정이나 사이클 타임을 단축하고자 하는 공정들을 병렬 기계 공정으로 구성하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 동종 병렬 기계(Identical Parallel Machines), 즉 모든 병렬 기계가 동일한 성능을 갖는 상황을 고려한다.

납기 산정의 대상이 되는 주문은 당연히 현재 도착한 주문이 될 것이다. 하지만, 동적인 주문 도착



<그림 1> 연구에서 고려하는 문제 상황 개념도

상황을 고려하고 있으므로, 도착한 주문의 납기 산정 시, 미래에 도착할 것으로 예상되는 주문을 감안할 필요가 있다. 특히, 제조 시스템 내에서 우선 순위 규칙으로 선입 선출법이 아닌 최소 납기일 규칙 등을 사용하는 경우에는 주문의 작업 순서가 도착 순서와 다를 수 있기 때문에, 미래에 도착할 주문을 고려하여 납기 산정을 해야 한다. <그림 1>은 연구에서 고려하고 있는 문제 상황을 도식화하여 나타내고 있다.

주문이 도착한다는 것은 제조 시스템에 주문의 정보가 등록이 되는 것을 의미한다. 주문에는 제품의 종류, 생산해야 하는 양(주문량), 고객이 원하는 납기일 등의 정보를 담고 있는데, 고객이 원하는 납기일을 고객 납기, 납기 산정 방법에 의해 정해지는 납기일을 제조 납기라 칭하도록 한다. 통상 주문이 도착하면, 그 즉시 납기 산정 방법이 실행되어 제조 납기와 투입 시점을 정하는 것을 고려하고 있다.

주문이 도착하면, 투입 계획에 의해 투입 시점이 결정되고, 투입 시점이 되면 해당 주문의 제품이 주문량 만큼 제조 시스템에 투입된다. 한번 주문이 투입되면, 해당 주문은 가공이나 운송의 최소 단위인 로트(Lot) 사이즈에 맞게 물리적으로 분리되고 각각의 로트에는 로트 ID(Identification)가 발부되어 주문의 정보와 연결이 되는 페깅(Pegging)의 절차를 따르게 된다. 따라서 주문과 연결되어 있는 제품의 종류에 따라 각 로트의 공정별 가공 시간은 정해지게 된다. 주문의 완료 시점은 해당 주문에 속한 로트 중 가장 마지막에 작업이 이루어지는 로트의 가공 완료 시점으로 결정되며, 주문을 투입해서 완료할 때까지의 시간을 주문의 흐름 시간(Flow Time)이라고 한다.

주문과 연결되어 있는 로트가 제조 시스템에 투입이 되면, 각각의 로트들은 재공(Work in Process, WIP)의 형태로 제조 시스템에서 가공을 기다리게 된다. 이러한 재공들은 설비가 유힘해지는 시점마다 제조 시스템에서 사용하는 일정 계획 방법(또는 우선 순위 규칙)에 의해 작업 순서가 정해

진다. 가령, 선입 선출법을 사용하는 경우에는 주문이 도착한 순서에 따라, 설비에서 해당 주문에 속하는 로트를 선택하여 작업을 하게 된다. 반면, 최소 납기일 규칙을 사용하는 경우에는 납기가 빠른 로트가 우선 작업이 수행된다. 기존의 연구에서는 주로 선입 선출법만을 이용한 납기 산정 방법론이 제안되었지만, 본 연구에서는 최소 납기일 규칙이 사용되는 경우에 적합한 납기 산정 방법도 제안하고자 한다. 설비 앞에 존재하는 재공의 버퍼 사이드는 무한하고, 설비나 재공의 불확실성(설비의 고장, 유지 보수, 재공의 불량 등)은 존재하지 않는다고 가정한다.

일반적으로 납기 산정은 제조 시스템 상황을 고려한 생산자 입장의 납기 산정을 의미하는 경우가 많다. 즉, 납품일을 결정하는 것이다. 하지만, 고객이 요구하는 소비자 입장의 고객 납기를 준수하는 것도 매우 중요한 이슈이기도 하다. 다시 말하면, 납기에는 제조 시스템 상황을 반영한 제조 납기와, 고객이 요구하는 고객 납기, 두 가지 종류의 납기가 존재하며, 두 납기간의 차이를 줄일 수 있는 주문의 투입 시점 결정 절차를 아울러 제안하고자 한다.

제안하는 납기 산정 방법론에서는 주문의 도착 시점마다 해당 주문의 완료 시점을 결정하는데, 주문의 완료 시점은 해당 주문의 제조 흐름 시간에 의해 크게 좌우되기 때문에 정확한 제조 흐름 시간의 예측이 중요하다. 그리고 주문의 투입 시점 역시 완료 시간에 영향을 주는 요소로 사용자가 결정 해주어야 하는 변수이다. 주문의 완료 시점을 결정하기 위하여, 주문의 투입 시점을 결정하거나 제조 흐름 시간을 예측할 때, 주문에 속한 로트의 가공 시간, 실시간 재공의 상황, 미래에 도착할 주문, 그리고 사용 중인 우선 순위 규칙 등을 고려하게 된다.

3. 제안 방법

3.1 주문의 흐름 시간 예측

앞서도 언급하였지만, 납기 산정을 위해서는 주

문의 흐름 시간을 정확히 예측하는 것이 필요하다. 본 연구와 기존의 연구와의 가장 큰 차이점 중 하나가 제조 시스템에서 고려하는 일정 계획 방법(우선 순위 규칙)이다. 기존에는 선입 선출법에 의한 일정계획만을 고려하였으나, 본 연구에서는 최소 납기일 규칙도 포함하여 다루고자 한다.

선입 선출법을 사용하는 경우에, 주문의 도착 시점이 매우 중요한 지표이다. 선입 선출법에 의해 도착한 순서대로 로트들이 가공되기 때문에 어떠한 로트도 먼저 도착한 로트보다 먼저 가공될 수 없다. 따라서 대기 중인 로트의 수로 표현되는 재공의 양이 선입 선출법을 사용하는 제조 시스템에서 주문의 흐름 시간을 예측할 때 가장 중요한 요인으로 사용된다. 본 연구에서는 주문의 흐름 시간을 예측하는 방법을 개발하기 위해 기존의 Lee[7]의 연구를 참조한다. 선입 선출법이 제조 시스템의 우선 순위 규칙으로 사용될 때, 주문의 흐름 시간을 예측하는 수식을 표현하기 위해 다음과 같은 기호를 사용한다.

- a 새롭게 도착하여 납기 산정이 필요한 주문의 index
- p_i 주문 i 에 속하는 로트의 가공 시간
- m 제조 시스템 내의 병렬 기계의 수
- Q_i 주문 i 에 속한 로트의 수(주문의 크기)
- q_n 대기중인 로트 중 n 번째로 도착한 로트가 속한 주문의 index
- N 대기중인 로트의 수

q_n 이나 N 같은 재공 재고 정보의 경우에는 시뮬레이션을 통해 실시간으로 얻게 된다. 위와 같은 기호를 사용하여 선입 선출법 하에서 주문 a 의 흐름 시간은 아래 식을 통해 예측할 수 있다.

$$\hat{F}_a^{FIFO} = (\sum_{n=1}^N p_{q_n} + p_a \cdot Q_a) / m \quad (1)$$

식 (1)에서는 주문 a 보다 먼저 도착해서 기다리

고 있는 로트들의 가공 시간의 합과, 주문 a 의 가공 시간을 더한 것을 병렬 기계의 수로 나누어서, 주문 a 의 예측 흐름시간을 산출하고 있다.

선입선출법의 경우 일정계획의 방법이 명확하여, 주문의 흐름 시간을 손쉽게 예측할 수 있으나, 최소 납기일 규칙을 사용할 경우에는 늦게 도착한 주문이라 하더라도 현재 대기 중인 로트의 주문보다 납기가 빠르다면, 먼저 작업이 이루어지기 때문에, 주문의 흐름 시간을 예측하는 것이 어려워지게 된다. 최소 납기일 규칙을 사용할 때 흐름 시간을 예측하는 방법에서 사용하는 기호는 다음과 같다.

- Φ 현재 재공 중 주문 i 보다 납기가 빠르거나 같은 주문에 속한 로트의 집합
- f_i^C 주문 i 와 현 재공에 의한 부하를 반영한 주문 i 의 부분 흐름 시간, 다음과 같이 구할 수 있다.
 $(\sum_{n \in \Phi} p_{q_n} + p_i \cdot Q_i) / m$
- λ 주문의 평균 도착율(Mean Arrival Rate)
- Q 최대 주문 크기
- \bar{p} 로트의 평균 가공 시간
- A_i 주문 i 의 도착 시점
- D_i 주문 i 의 고객 납기
- I_i 주문 i 의 도착 시점과 고객 납기의 차이,
 $D_i - A_i$
- I^{max} 제조 시스템에 있는 주문 중, 고객 납기와 도착 시점의 차이가 가장 큰 값
- I^{min} 제조 시스템에 있는 주문 중, 고객 납기와 도착 시점의 차이가 가장 작은 값
- r_i^C 시점 t 에서 주문 i 의 상대적 긴급도,
 $(I_i - I^{min}) / (I^{max} - I^{min})$
- r_i^f 시점 $t + f_i^C$ 에서 주문 i 의 상대적 긴급도,
 $((I_i - f_i^C) - I^{min}) / (I^{max} - I^{min})$
- ρ f_i^C 시간동안 도착하는 주문 중 주문 i 보다 납기가 빠를 것이라 예상되는 주문의 비율, 만약 $r_i^f > 0$, $(r_i^C + r_i^f) / 2$; 그렇지 않으면, $r_i^C \cdot r_i^C / (r_i^C + r_i^f)$
- f_i^F 미래 주문의 예상 부하를 반영한 주문 i 의 부

분 흐름 시간, $(\lambda \cdot f_i^C) \cdot \rho_i \cdot (Q/2) \cdot (\bar{p}/m)$

위와 같은 수식과 기호를 이용하여, 최소 납기일 규칙 하에서 주문 a 의 예측 흐름 시간은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{F}_a^{EDD} = f_a^C + f_a^F \quad (2)$$

식 (2)는 두 부분으로 이루어져 있다. 먼저, f_a^C 는 주문 a 와 이미 도착해 있던 주문중 주문 a 보다 납기가 빠르거나 같은 주문들로 인한 흐름 시간을 나타내고 있고, 두 번째인 f_a^F 는 미래에 도착할 주문중 주문 a 보다 납기가 빠른 주문으로 인한 흐름 시간을 나타내고 있다. 첫 번째 항인 f_a^C 는 앞서 식 (1)과 유사하게 구할 수 있고, 두 번째 항인 f_a^F 는 다음과 같이 세 부분으로 나누어 설명할 수 있다. 먼저, 주문 a 를 처리하는 시간동안에 도착할 수 있는 예상 주문의 수는 $\lambda \cdot f_a^C$ 로 계산할 수 있으며, 그 시간동안 도착한 주문 중 주문 a 보다 빠른 납기를 가진 주문의 비율은 ρ_a 로 산출할 수 있다. 마지막으로, 이러한 주문들을 처리하는 시간은 평균적으로 $(Q/2) \cdot (\bar{p}/m)$ 가 된다. 결국, 이 세 가지를 모두 곱해서 ‘주문 a 를 처리하는 동안 도착할 주문중 주문 a 보다 빠른 납기를 갖는 주문을 다시 처리하는데 평균적으로 소요되는 시간’을 f_a^F 로 나타낼 수 있다. 선입 선출법에 의한 흐름 시간은 오직 이미 도착한 주문과 막 도착한 현 주문에 의해 영향을 받지만, 최소 납기일 규칙에 의한 흐름 시간은 기 도착 주문뿐 아니라 향후 도착할 주문 중 납기가 빠른 주문에 의해서도 영향을 받는다. 본 연구에서는 선입 선출법과 최소 납기일 규칙 하에서 주문의 흐름 시간을 예측하는 방법을 각각 EF_FIFO, EF_EDD로 부르도록 한다.

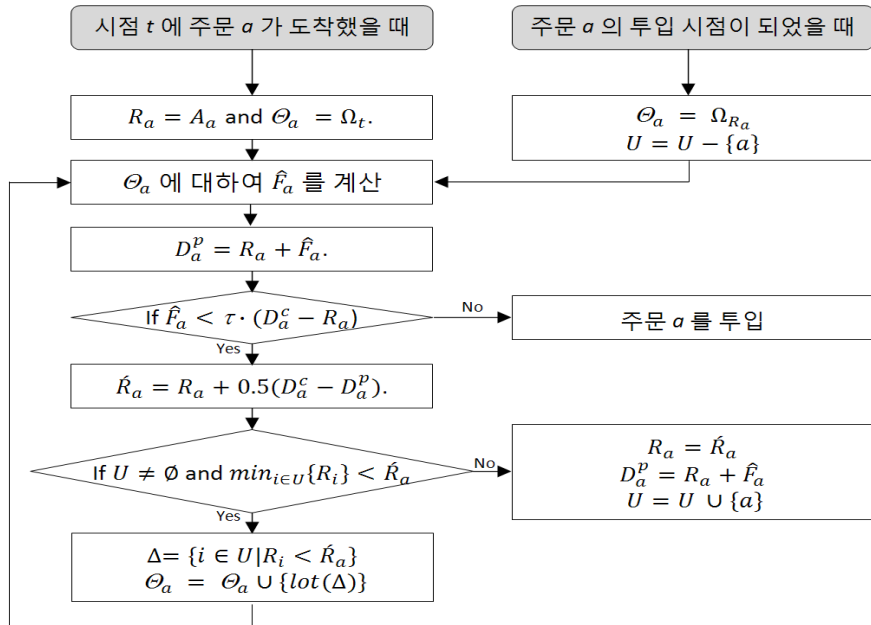
3.2 주문의 제조 납기 결정

만약, 주문이 도착하자마자 제조 시스템에 투입이

된다면, 투입 시점은 주문의 도착 시점이 된다. 이렇게 투입된 주문의 로트들은 우선 순위 규칙(선입 선출법, 최소 납기일 규칙 등)에 의한 순서에 따라 병렬 기계 공정에서 가공이 이루어진다. 그리고 앞서 예측한 흐름 시간을 투입 시점에 더하면, 주문의 완료 시점(주문의 제조 납기)을 결정할 수 있다. 하지만, 본 연구에서는 기존의 연구와는 달리, 납기 산정을 할 때, 주문의 투입 시점을 조정하여 주문 완료 시점을 고객이 원하는 납기일(고객 납기)에 근접시킬 수 있도록 하는 방법을 제안하고자 한다. 즉, 제조 납기와 고객 납기와의 차이를 줄여, 고객이 원하는 납기에 최대한 맞추고자 하는 것이다. 이를 위해서는 주문의 투입 시점의 조정, 흐름 시간 예측, 제조 납기 산출, 고객 납기와의 비교 등의 절차를 반복적으로 수행하여야 한다.

주문 i 의 제조 납기(D_i^p)는, 앞서 언급한대로 주문의 투입 시점(R_i)과 예측 흐름 시간(\hat{F}_i)을 더하여, 즉 $D_i^p = R_i + \hat{F}_i$ 로 산출할 수 있다. 예측 흐름 시간 산출 방법은 앞서 제 3.1절에 소개되었으며, 본 절에서는 투입 시점(R_i)을 결정하는 방법을 소개한다.

가장 이른 투입 시점은 주문의 도착 시점이다(투입 시점은 절대 주문의 도착 시점보다는 빠를 수 없다). 본 연구에서는 먼저 주문의 도착 시점을 초기 투입 시점으로 간주하여 주문의 제조 납기를 산출하고, 이를 고객 납기와 비교하게 된다. 만약 주문의 제조 납기가 고객 납기보다 빠르다면, 고객이 원하는 시점까지는 여유가 있기 때문에 해당 주문의 투입 시점을 어느 정도는 늦춰도 된다는 의미가 된다. 반면, 제조 납기가 고객 납기보다 늦다면, 주문을 도착 즉시 투입하더라도 납기 지연이 발생하기 때문에 투입을 늦춰서는 안될 것이다. 본 연구에서 제안하고 있는 납기 산정 방법에서는 여유가 있는 주문의 경우에는 투입 시점을 재조정하여 다시 제조 납기를 산출하고 고객 납기를 또다시 비교하는 과정을 반복적으로 거치게 된다. 이러한 과정이 <그림 2>에 나타나 있다. 이 절차에서 사용되는 기호는 아래와 같다.



〈그림 2〉 제한한 납기 산정 방법의 흐름도

- \mathcal{O}_a 주문 a 가 투입되기 바로 직전에 시스템 내에 대기 중인 로트의 집합
- \mathcal{Q}_t t 시점에 시스템내에서 대기 중인 로트의 집합
- τ 허용치 파라미터
- U 시스템에 도착했으나 아직 투입되지 않은 주문의 집합
- $lot(\Delta)$ 주문의 집합 Δ 에 속한 로트의 집합을 리턴하는 함수

〈그림 2〉에서 보듯이 납기 산정의 절차는 새로운 주문이 도착하거나, 특정 주문의 투입 시점이 되면 실행된다. 새로운 주문이 도착하게 되면(편의상 주문 a 라 부르도록 한다), 먼저 주문의 도착 시점을 투입 시점으로 정하고($R_a = A_a$) 현재 대기 중인 로트의 집합(\mathcal{Q})을 \mathcal{O}_a 로 설정한다. 다음으로 앞서 소개한 흐름 시간 예측 방법에 의해 \hat{F}_a 를 산출하고 R_a 와 \hat{F}_a 의 합으로 제조 납기 D_a^p 를 결정하게 된다. 제조 납기와 고객 납기(D_a^c)를 비교하여, 예측 흐름 시간(\hat{F}_a)이 고객 납기와 주문 a 의 투입 시

점의 차이($D_a^c - R_a$, 고객 납기까지 남은 시간)의 일정한 비율(τ , 실험을 통해 구하는 파라미터)보다 작다면, 고객 납기까지 제조 납기가 여유가 좀 있다는 의미이므로, 현 투입 시점보다 고객 납기와 제조 납기의 차이의 절반(0.5)만큼 늘려서 새로운 투입 시점(R_a')을 정한다. 그렇지 않다면, 시간적으로 여유가 없다는 의미가 되므로 주문 a 를 도착한 즉시 투입하게 되고 절차는 마무리된다. 새로운 투입 시점(R_a')이 정해진 경우에는, 새 투입 시점까지 새로 도착하는 주문이 없거나, 그 시간 안에 투입될 주문이 없다면, 조정된 투입 시점에 의해 제조 납기를 새로 계산하고 절차는 마무리된다. 그렇지 않고, 새로 도착할 주문이 있거나, 새로운 투입 시점 안에 투입될 다른 주문이 있다면, \mathcal{O}_a 를 새로 업데이트 한 후 예측 흐름 시간(\hat{F}_a)을 계산하는 단계로 돌아간다. 이미 도착하였지만, 아직 투입하지 않은 주문에 대해서도 주문의 투입 시점이 되었을 때, 위와 같은 절차에 따라 제조 납기를 결정하거나 투입 시점을 다시 조정한다.

4. 계산 실험

4.1 시뮬레이션 모델

본 연구에서 제안하는 방법의 성능을 평가하기 위해, 주문의 도착, 로트의 대기 및 작업 등을 표현할 수 있는 시뮬레이션 모델을 C언어로 개발하였다. 다양한 실험 환경을 만들기 위하여, 여러 수준의 제품 종류의 수(P), 주문의 최대 크기(Q), 주문의 납기 tightness(y)의 조합을 고려하였다. 시뮬레이션 수행 시 제조 시스템에 존재하는 병렬 기계의 수와 가공 시간은 다음과 같이 설정하였다. 먼저, 병렬 기계의 수(m)는 이산균등분포 $DU(1, 10)$ 를 이용하여 랜덤하게 발생시켰고, 주문 i 에 속한 로트의 가공시간 p_i 는 $DU(1 \cdot m, 10 \cdot m)$ 를 이용하여 발생시켰다. 각 시뮬레이션은 미리 지정된 종료 시간에 다다를 때까지 수행하였고, 시뮬레이션으로부터 나온 결과는 미리 지정된 Warm up 시간과 종료 시간 사이에 발생한 사건에 대해서만 기록하여 정리하였다.

위와 같은 파라미터를 사용하여 시스템이 구성되면, 주문의 도착 및 로트의 가공도 시뮬레이션 모델을 통해 모사된다. 주문의 도착은 그 간격이 지수분포를 따르는 것으로 가정하였다.(주문의 평균 도착율은 본 연구에서 다루고 있는 제조 시스템의 생산 능력을 고려하여 사전 실험을 통하여 산출한 값을 사용하였다). 도착한 주문의 제품 종류는 앞서 언급한 P 가지 제품 종류 중에 무작위로 정하고, 주문의 크기(Q_i)는 최대 주문 사이즈 Q 를 감안하여, 이산균등분포 $DU(1, Q)$ 를 이용하여 발생시켰다. 도착한 주문의 고객 납기는 다음과 같은 식, $A_i + T \cdot \hat{F}_i^{FIFO}$ 에 의해 결정하였다. 여기서 A_i 는 주문의 도착 시점, \hat{F}_i^{FIFO} 는 선입 선출법에 의해 로트를 가공한다고 가정할 때의 예측 흐름 시간이며, T 는 주문의 납기 tightness와 관련한 파라미터로서 이산균등분포 $DU(0.5y, 1.5y)$ 를 이용하여 결정하였다.

제안된 시뮬레이션 모델은 이산 사건 모델이기 때문에, 시뮬레이션 시각은 다음으로 발생할 이벤

트에 기반하여 진행된다. 본 모델에서는 총 네 가지의 이벤트 종류가 존재한다. 첫 번째 이벤트 종류는 주문의 도착이며, 주문이 도착하면 다음 주문의 도착 시점이 결정된다. 두 번째는 주문의 투입이며 그와 동시에 주문에 속한 로트의 투입(세 번째 이벤트)이 이루어진다. 로트가 투입되어 당장 가용한 설비가 없으면, 대기 재공이 되며, 가용 설비가 존재하면 작업이 즉시 수행되고 해당 작업의 완료 시점이 생성되는데 이것이 마지막 종류의 이벤트이다. 작업이 완료되면 설비가 가용해지는데, 이때, 사용하고 있는 우선 순위 규칙에 따라 로트를 선택하여 작업을 시작하게 된다. 이런 식으로 시뮬레이션 기간 동안 주문의 도착, 로트의 투입, 로트의 작업 등을 반복하게 된다. 물론, 이 과정에서 주문이 도착할 때마다 제안된 납기 산정 방법론을 수행할 수 있도록 납기 산정 절차 역시, 시뮬레이션 모델에 구현되었다.

4.2 실험결과

제안된 방법의 성과를 측정하기 위해, 다음과 같은 방법을 통하여 다양한 조합의 문제를 발생시켰다. 먼저, 주문의 최대 크기(Q)는 20과 60, 납기의 tightness(y)는 1과 1.5, 그리고, 제품 종류의 수(P)는, 10, 50, 100으로 문제의 종류를 구성하였다. 각 문제 종류의 조합 마다 10개의 문제를 반복적으로 발생시켜서 총 $120(2 \times 2 \times 3 \times 10 = 120)$ 개의 문제를 실험하였다. 본 실험에서는 두 가지의 실험을 시행하였는데, 하나는 흐름 시간 예측 방법을 평가하는 실험이며, 다른 하나는 납기 산정 방법을 평가하는 실험이다.

4.2.1 예측 흐름 시간 산출 방법의 성과 측정

제안된 흐름 시간 예측 방법과 기존 방법과의 비교 결과를 <표 1>에 정리하였다. 기존의 방법들로는 Sha and Hsu[7]와 Lawrence[8]에 소개된 TWK, JIQ, ESF를 사용하였다. 각 방법에 대해서 시뮬레이션을 수행하면서, 주문이 도착했을 때 구한 예측

흐름 시간과 주문이 완료 되었을 때 얻어지는 실제 흐름 시간을 비교하였다. 두 가지 성과 지표가 사용되었는데, 첫 번째는 Moses et al.[9]에서 제안한 RER(Relative Error Ratio)으로써, 예측 흐름 시간과 실제 흐름 시간과의 차이를 실제 흐름 시간으로 나눈 것이다. RER의 값이 0에 가까울수록 예측한 흐름 시간 값이 정확함을 의미한다. 다른 척도는 Sha and Hsu[7]에서 제안된 실제 흐름 시간과 예측 흐름 시간 사이의 상관계수(Correlation Coefficient, CC)이다. CC 값이 1에 가까울수록 예측 흐름 시간이 실제 흐름 시간에 가까운 것을 의미한다.

<표 2> 제안한 흐름 시간 예측 방법과 기존 방법간의 비교

	EF_FIFO	EF_EDD	TWK	JIQ	ESF
FIFO	0.03^{a*} (0.9996)^b	0.29 (0.82)	3.98 (0.05)	0.34 (0.99)	0.53 (0.77)
EDD	0.74 (0.79)	0.12 (0.98)	5.37 (0.06)	2.55 (0.67)	1.37 (0.51)

주) ^a 평균 RER.

^b 평균 CC.

* 가장 좋은 결과를 굵은 글씨로 표기.

<표 2>를 보면, 두 우선 순위 규칙(선입 선출법, 최소 납기일 규칙)에 상관없이 본 연구에서 제안한 두 가지의 흐름 시간 예측 방법(EF_FIFO, EF_EDD)이 기존의 세 가지 방법(TWK, JIQ, ESF)보다 두 가지 성과 지표 모두에 대해서 우수한 결과를 보이고 있다. 선입 선출법을 제조 시스템에서 우선 순위 규칙으로 사용하였을 경우에는 EF_FIFO 방법이 가장 우수하였으며, 최소 납기일 규칙을 사용한 경우에는 EF_EDD 방법이 가장 우수하였다. 특히 제안된 방법은 기존 방법들 보다 두 가지 평가 지표(RER 및 CC)에 대해 모두 월등한 결과를 보여주고 있다 (굵은 글씨로 표현한 것이 각 우선 순위 규칙에서 가장 좋은 결과를 보여주는 방법을 의미한다).

4.2.2 납기 산정 방법의 성과 측정

본 연구에서는 제안된 납기 산정 방법을 평가하기

위해 Sha and Liu[7] 연구에서 사용된 MAL(Mean Absolute Lateness)을 성과 척도로 사용한다. MAL은 Vig and Dooley[10]에 의해 처음으로 소개되었는데, 실제 값에 대한 예측 값의 근접도(정확도)를 측정하는 성과 지표로 그 값이 작을수록 예측 값의 성능이 우수하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 주문의 제조 납기와 실제 완료 시점을 비교하고(<표 3> 참조), 주문의 제조 납기와 고객 납기를 비교하였다(<표 4> 참조).

<표 3> 제조 납기와 실제 완료 시점간의 차이

	EF_FIFO	EF_EDD	TWK	JIQ	ESF
FIFO	14.4^{a*}	545.2	1324.6	103.3	475.6
EDD	598.8	168.8	1459.2	1040.4	896.0

주) ^a 제조 납기와 실제 완료 시점간의 평균 MAL.

* 가장 좋은 결과를 굵은 글씨로 표기.

<표 3>은 모든 주문이 도착 시점에 투입이 되었을 때의(투입이 된 후에는 각각의 우선순위 규칙에 의해 로트의 작업이 이루어진다) 제조 납기와 실제 완료 시점간의 평균 MAL 값을 나타내고 있다. 즉, <표 3>의 MAL 값은 제조 납기와 실제 완료 시점의 차이의 평균을 의미한다. 이 결과는 본 연구의 제 3.2절에서 제안하고 있는 고객 납기를 감안한 제조 납기를 결정하는 방법을 적용한 것이 아니므로(주문의 도착 시점이 투입 시점인 경우), 납기 산정 방법에 대한 평가라기보다는 흐름 시간 예측 방법에 대한 또 다른 평가 결과라고 볼 수 있다. 굵은 글씨로 표현한 것은 각각의 우선 순위 규칙을 사용했을 때의 가장 좋은 값을 의미한다. 표에서 확인 할 수 있듯이, 제안된 흐름 시간 예측 방법이 다른 방법들에 비해 실제 완료 시점에 가까운 제조 납기를 산출할 수 있도록 주문의 흐름 시간을 정확하게 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 표에는 없지만, 제조 납기 대신 고객 납기에 대한 평균 MAL 값은, 선입 선출법을 이용한 우선 순위 규칙하에서는 736.8, 최소 납기일 규칙을 사용한 우선 순위 규칙하에서는 567.0으로 결과가 좋지 않았다. 이는 투

입 시점을 조정하지 않아서 고객 납기에 근접하게 주문의 완료 시점을 맞추지 못했기 때문이다.

<표 4>에서는 투입 시점을 조정하여 제조 납기가 고객 납기에 근접할 수 있도록 본 연구에서 제안한 납기 산정 방법을 적용하였을 때 개선된 MAL 값을 표현하고 있다. 시뮬레이션 모델에서는 선입 선출법과 최소 납기일 규칙을 우선 순위 규칙으로 사용하였으며, 각 우선 순위 규칙에 적합한 흐름 시간 예측 방법(EF_FIFO, EF_EDD)을 사용하였다. 표에서 'Off'는 주문이 도착 즉시 투입이 되는 것(도착 시간이 투입 시점)을 의미하며, 'On'의 경우는 주문이 도착했을 때 본 연구에서 제안한 납기 산정 방법을 적용하여 투입 시점을 결정한 것을 의미한다. 세 번째 열의 'RP(Reduction Percentage)'는 납기 산정 방법을 적용한 후에 감소된 MAL 값의 비율을 의미한다. RP 값이 크다는 것은 본 연구에서 제안하고 있는 납기 산정 절차에 의해 고객 납기에 근접하게 주문이 완료될 수 있도록 투입 시점이 조정되고 있음을 의미한다. 표에서 확인할 수 있듯이, 고객 납기와 실제 완료 시점의 차이가 매우 크게 감소되었음을 알 수 있다. 즉, 제안된 납기 산정 절차를 통해 고객이 원하는 시점에 가깝게 주문을 완료할 수 있음을 의미한다. 아울러, <표 4>에서는 제품의 종

류의 수, 주문의 최대 크기의 수준, 납기의 tightness의 수준에 따른 각각의 결과도 확인할 수 있다. 전체적인 결과와 비교하였을 때 각 요소의 수준이 바뀌더라도 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있으며, 이는 본 연구에서 제안한 방법이 문제 상황의 변화에 대해서 일관된 성능을 보인다는 것을 의미한다. 기존 방법들(TWK, JIQ, ESF)은 앞선 결과에서 나타났듯이, 제안 방법보다 성능이 현저히 낮기 때문에 이번 실험에서는 사용하지 않았다.

마지막으로 <표 5>에서는 본 연구에서 제안한 방법을 적용하였을 때와 그렇지 않았을 때의 납기의 지연 정도를 나타내고 있다. 실제 주문이 도착했을 때 제안 납기 산정 방법을 적용하여 고객 납기를 맞출 수 있도록 투입 시점을 조정하게 되면, 납기 지연이 발생할 수도 있을 것이다. 예상대로, 최소 납기일 규칙을 제조 시스템에서 우선 순위 규칙으로 사용할 때는 평균 납기 지연정도가 제안한 방법을 사용하지 않을 때(Off)보다 사용할 때(On) 미세하게 증가됨을 알 수 있었다. 이는 본 연구에서 제안하고 있는 방법에 의해 투입 시점을 적절히 조정하더라도, 고객이 원하는 납기일을 충분히 만족시키고 있음을 의미하고 있으며, 기존의 연구 방법과는 차별화된 부분이라고 볼 수 있을 것이다.

<표 4> 제안 방법을 사용했을 때의 고객 납기에 대한 MAL의 개선 정도

	수준	FIFO			EDD		
		Off ^b	On ^c	RP ^d	Off	On	RP
제품 종류의 수	10	630.2 ^a	351.1	44.3% ^d	508.1	189.0	62.8%
	50	926.9	411.7	55.6%	625.9	217.8	65.2%
	100	653.4	338.5	48.2%	506.5	188.7	62.8%
주문의 최대 크기	20	660.5	349.6	47.1%	506.6	187.7	62.9%
	60	813.1	413.2	49.2%	627.5	219.0	65.1%
납기 tightness	1.0	657.0	349.7	46.8%	501.3	187.9	62.5%
	1.2	816.6	413.1	49.4%	632.7	218.8	65.4%
Overall		736.8	381.4	48.2%	567.0	203.4	64.1%

주) ^a 고객 납기와 실제 완료 시점과의 평균 MAL.

^b 제안된 납기 산정 방법을 적용하지 않은 경우(주문이 도착하자마자 투입 되는 경우).

^c 제안된 납기 산정 방법을 적용한 경우.

^d 제안된 방법론을 적용할 때의 MAL의 감소 비율.

반면, 선입 선출법을 사용할 때는 납기 지연정도가 오히려 감소하였다.

〈표 5〉 제안한 방법을 사용하기 전과 후의 평균 납기 지연 정도

	Off ^b	On ^c
FIFO	153.9 ^a	149.4
EDD	44.1	58.5

주) ^a 평균 납기 지연.

^b 제안된 납기 산정 방법을 적용하지 않은 경우.

^c 제안된 납기 산정 방법을 적용한 경우.

본 연구에서 수행한 계산 실험의 결과를 정리하면 다음과 같다. 첫째, 제안된 주문 흐름 시간 예측 방법, EF_FIFO와 EF_EDD은 각 우선 순위 규칙 하에서 기존의 흐름 시간 예측 방법들에 비해 월등한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 둘째, 제안된 흐름 시간 예측 방법을 이용하여 산정한 제조 납기는 기존 방법들을 이용한 제조 납기에 비해 주문의 실제 완료 시점에 훨씬 근접한 결과를 보였다. 셋째, 제안된 납기 산정 절차를 이용하면, 해당 절차를 적용하기 전에 비해, 고객이 원하는 납기에 제조 납기를 상대적으로 가까이 맞출 수 있었다. 납기 산정 절차의 적용으로 인한 일정 계획의 성능 저하는 없거나 매우 미비함을 확인할 수 있었다. 마지막으로 제안된 모든 방법과 절차는 매우 짧은 시간에 수행될 수 있기 때문에, 본 연구에서 제안하는 방법을 이용하여 실시간으로 납기를 산정하는 것이 가능하다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 병렬 기계 공정으로 이루어진 제조 시스템에서 실시간 납기 산정을 위한 방법론을 제안하였다. 고려하는 시스템에서는 주문이 동적으로 도착하며, 주문에 속한 로트는 선입 선출법이나, 최소 납기일 규칙에 따른 우선 순위 규칙에 의해 작업이 이루어진다. 제안된 방법론에서는 정확한 납기 산정을 위해, 먼저 재공의 상황, 우선 순위 규

칙 등을 고려하여 주문의 흐름 시간을 예측하고, 주문의 투입 시점을 적절히 조정하면서 최종적으로 제조 납기를 결정하게 된다. 본 연구에서 제안하고 있는 방법을 평가하기 위해 시뮬레이션 모델을 개발하였고 모델을 이용하여 실험을 수행하였다. 실험 결과 제안된 방법론이 기존의 방법론들에 비해 우수함을 확인할 수 있었다.

납기 산정의 문제는 투입 계획을 수립하는 문제와 밀접한 관계를 갖고 있기 때문에 본 연구의 결과는 다음과 같은 영역에서 활용될 수 있을 것으로 기대한다. 주문 생산 방식의 회사, 즉 납기 준수가 매우 중요한 회사에서 납기 산정 및 투입 계획 수립에 활용할 수 있을 것이다. 특히, 제품의 납품 규모나 매출액의 단위가 매우 커서 고객의 중요도가 높은 B2B 형태(반도체, LCD 패널, 기계 부속 등)의 사업에서 매우 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

본 연구는 선입 선출법이나, 최소 납기일 규칙을 우선 순위 규칙으로서 사용하였으나, 향후 다양한 일정 계획 방법을 추가하여 개선할 필요가 있다. 또한, 병렬 기계 외에도 복잡도가 높은 공정에 적용할 수 있는 방법론의 개발이 필요할 것이다. 납기 산정은 주문의 투입일과 제조 시스템에서 사용하는 로트의 일정 계획 방법론에 따라 큰 영향을 받으며, 상충관계가 존재한다. 따라서 근본적으로는 일정 계획의 성과와 납기 산정을 동시에 만족할 수 있는 통합된 모델을 개발하는 것이 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] Framinan, J.M. and R. Leisten, "Available-to-promise (ATP) systems : a classification and framework for analysis," *International Journal of Production Research*, Vol.48, No.11 (2009), pp.3079-3103.
- [2] Keskinocak, P. and S. Tayur, "Due-Date Management Policies, in Handbook of Quantitative Supply Chain Analysis : Modeling in the E-Business Era, Norwell," *MA : Kluwer*

- Academic Publishers*, (2004), pp.485-553.
- [3] Kaminsky, P. and D. Hochbaum, "Due-date quotation models and algorithms," *Handbook of scheduling : Algorithms, models, and performance analysis*, Boca Raton : CRC Press Inc., 2004.
- [4] Gordon, V., J.M. Proth, and C. Chu, "A survey of the state-of-the-art of common due-date assignment and scheduling research," *European Journal of Operational Research*, Vol.139, No.1(2002), pp.1-25.
- [5] Cheng, T.C.E. and M.C. Gupta, "Survey of scheduling research involving due-date determination decisions," *European Journal of Operational Research*, Vol.38, No.2(1989), pp. 156-166.
- [6] Lee, G.C., "Estimating order lead times in hybrid flowshops with different scheduling rules," *Computers and Industrial Engineering*, Vol.56, No.4(2009), pp.1668-1674.
- [7] Sha, D.T. and S.Y. Hsu, "Due-date assignment in wafer fabrication using artificial neural networks," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.23, No.9/10(2004), pp.768-775.
- [8] Lawrence, S.R., "Estimating flowtimes and setting due-dates in complex production systems," *IIE Transactions*, Vol.27, No.5(1995), pp.657-668.
- [9] Moses, S., H. Grant, L. Gruenwald, and P. Pulat, "Real-time due-date promising by build-to-order environments," *International Journal of Production Research*, Vol.42, No. 20(2004), pp.4353-4375.
- [10] Vig, M.M. and K.J. Dooley, "Mixing static and dynamic flowtime estimates for due-date assignment," *Journal of Operations Management*, Vol.11, No.1(1993), pp.67-79.