

## 품질을 고려한 작업투입에 관한 연구

고효현<sup>1</sup> · 김지현<sup>2\*</sup> · 백준걸<sup>3</sup> · 김성식<sup>1</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 산업시스템정보공학과 / <sup>2</sup>고려대학교 반도체기술연구소

<sup>3</sup>광운대학교 경영학부

## Study on Dispatching with Quality Assurance

Hyo-Heon Ko<sup>1</sup> · Jihyun Kim<sup>2</sup> · Jun-Geol Baek<sup>3</sup> · Sung-Shick Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Industrial Systems and Information Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

<sup>2</sup>Semiconductor Technology Research Center, Korea University, Seoul 136-701, Korea

<sup>3</sup>School of Business, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea

Dispatching rule for parallel machines with multi product is proposed in this paper. In current market, customer's request for higher quality is increasing. In accordance with such demand, manufacturers are focusing on improving the quality of the products. Such shift in production objective is risky. The possibility of neglecting another important factor in customer satisfaction increases, namely due dates. From the aspect of improving quality, frequency of product assignment to limited number of high performance machines will increase. This will lead to increased waiting time which can incur delays. In the case of due date oriented product dispatch, products are assigned to machines without consideration for quality. Overall deterioration of product quality is inevitable. In addition, poor products will undergo rework process which can increase delays. The objective of this research is dispatching products to minimize due date delays while improving overall quality. Quality index is introduced to provide means of standardizing product quality. The index is used to assure predetermined quality level while minimizing product delays when dispatching products. Quality standardization method and dispatching algorithm is presented. And performance evaluation is performed with comparison to various dispatching methods.

**Keywords:** Quality, Dispatching, Scheduling, Rework

### 1. 서론

최근 기업들은 품질 신시대(new era of quality)라는 시장 환경에서 치열한 경쟁을 하고 있다. 품질 신시대는 고객 만족을 최우선 목표로 제품과 서비스의 품질을 중요하게 생각한다. 고객 만족을 통한 경쟁력 확보를 위해 기업은 과거 수행했던 수율(yield) 중심의 생산 관리에서 품질 위주의 변화된 방법으로 관리를 수행하고 있다. 생산 관리의 변화는 과거 수율에 의한 원가계산 방법에서 품질 차이에 따라 고객이 판매가격을 결정하는 시장 평가방식으로 전환되었기 때문이다. 예로 우리나라

의 주력 제품인 반도체와 LCD의 경우 제품의 품질 차이에 따라 고객들에게 차등된 가격으로 판매된다. 품질이 높은 제품은 비싼 가격으로 거래되고 고객에게 높은 만족도를 주며 기업 경쟁력의 원천이 된다. 따라서 기업은 품질 향상과 품질 변동폭을 줄이는 관리를 하여 기업의 이윤을 높이고 경쟁력을 가지려는 노력을 하고 있다 (Ann, 2007). 그러나 기업이 품질을 높이는 노력에도 불구하고 고객에게 전달되는 납기를 준수하지 못하면, 고객의 만족도는 감소하고 기업은 신뢰성이 떨어져 경쟁력 상실을 초래하게 된다.

납기 문제와 관련하여 그동안 많은 연구가 있었고 납기 준

본 과제(결과물)는 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금으로 수행한 최우수 연구실지원사업의 연구결과입니다.

이 논문은 2007년도 광운대학교 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었습니다.

\* 연락처: 김지현, 136-701 서울시 성북구 안암동5가 고려대학교 반도체기술연구소, Fax : 02-3290-3380, E-mail : jihyunk@korea.ac.kr

2007년 10월 접수; 2007년 12월 수정본 접수; 2008년 02월 게재 확정.

수를 중요한 문제로 인식하였다. 특히 품질 신시대의 최대 목적이 고객 만족이라는 면에서 납기 준수의 중요성은 경쟁력을 갖는 중요한 요소 중에 하나이다. 만일 작업능력이 부족하여 납기 지연이 발생하면, 납기 지연에 따른 경제적 손실과 반제품 재고 증가에 따른 제조원가 상승 및 고객만족도 저하로 인한 시장 점유율 감소와 경쟁력 상실을 초래한다. 따라서 기업은 품질을 높이는 노력 외에도 고객의 납기 준수를 필수적으로 이행해야 한다(Pinedo, 1999).

최근 들어 품질의 중요성을 반영하여 일반적인 제조 산업에서도 품질 향상에 대한 연구와 노력이 활발히 이루어지고 있다. 특히 제조 회사들은 SPC(Statistical Process Control), APC(Advanced Process Control), FDC(Fault Detection and Classification) 등의 통계적 기법들을 도입하여 제조과정에서 정밀한 제어와 관리를 통해 품질을 높여려는 노력을 다각적으로 수행하고 있다. 그러나 제조과정은 품질에 영향을 주는 원인들이 무수히 많고 제어할 수 없는 환경요인도 있다. 따라서 다양한 노력에도 불구하고 제조 회사들은 공정에 영향을 주는 수많은 요인을 정확히 규명하지 못하여 목표하는 품질 달성에 많은 어려움을 겪고 있다.

하지만 품질의 영향을 끼치는 원인에 대한 분석 결과 중 하나로 제품과 기계 사이의 관계에서 품질 차이가 발생하는 것을 파악하였다. 제품과 기계의 관계는 특정 제품을 정확히 가공하는 기계가 있는가 하면 그렇지 못하고 불량률 많이 만드는 기계가 존재하는 것이다. 따라서 제조 회사들은 생산 과정에서 목표 품질 달성을 위해 제품과 기계의 관계에 대해 품질 제약을 수행한다. 품질제약은 제품별 기계의 가공수준과 품질 목표를 비교하여 작업이 목표 품질을 달성 할 수 있는 기계로만 가공하도록 제약하는 것이다(Icmeli-Tukel, 1997).

본 논문에서 다루는 제조공정은 <Figure 1>의 순서로 진행된다. 고객으로부터 주문이 발생(Order Release)하면 발생된 주문을 통해 가공에 필요한 단위인 작업을 생성(Job Generation)한다. 생성된 작업은 공정에 투입되어 가공을 위한 작업 대기 공간에 대기한다. 가공 중인 기계가 작업을 완료하고 유희해지면, 대기공간의 작업들은 정의된 투입 방법(Job Dispatching)으로 선택되어 가공을 받게 된다. 가공(Processing)은 제품에 따른 작업준비시간과 작업 가공시간에 따라 수행된다. 가공이

완료된 작업은 측정(Measure)을 통해 작업 결과를 측정 받는다. 검사(Rework Inspection)단계는 품질의 한계를 표현한 공정 관리규격을 이용하여 Rework 여부를 판단한다. Rework을 수행해야할 경우 작업은 가공초기화(Initialization)를 거쳐 작업 대기공간으로 다시 돌아간다. 만일 초기화가 불가능한 경우 작업은 폐기(Scrap)되고 폐기된 작업을 대체할 새로운 작업이 다시 투입되게 된다. 검사에서 합격된 작업이 단순가공 제품인 경우 최종 제품으로 반출되고, 연속 가공 제품은 다음 가공을 위해 이동한다.

<Figure 1>에서 작업투입 선택을 수행할 때 품질을 고려할 경우 <Figure 2>와 같이 설명될 수 있다.

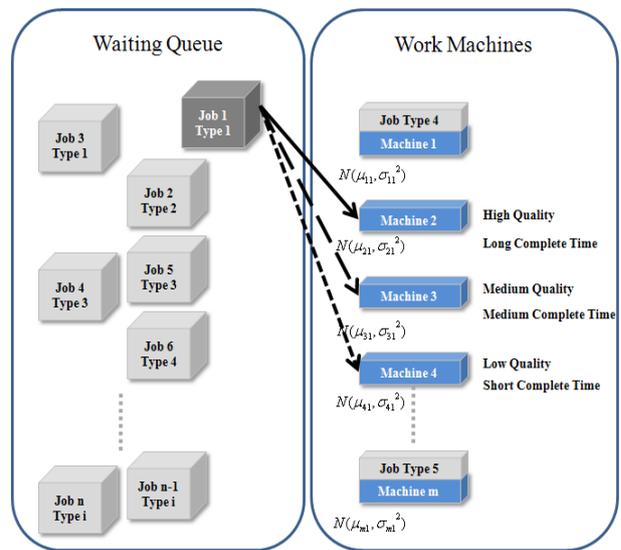


Figure 2. Job Dispatching

<Figure 2>에서 작업들은 대기공간에 작업타입(Job Type)이 1에서  $i$ 까지 존재하고, 기계는 1에서  $m$ 까지 배치되어 있으며 작업은 연속적으로 발생하여 대기공간으로 들어온다. 가용한 기계들이 발생하면 투입방법에 따라서 작업을 선택한다. 작업 투입방법에서 만일 타입 1인 작업이 납기 관련하여 중요하게 선택되면 투입 가능 기계를 찾게 된다. <Figure 2>에서 가용한

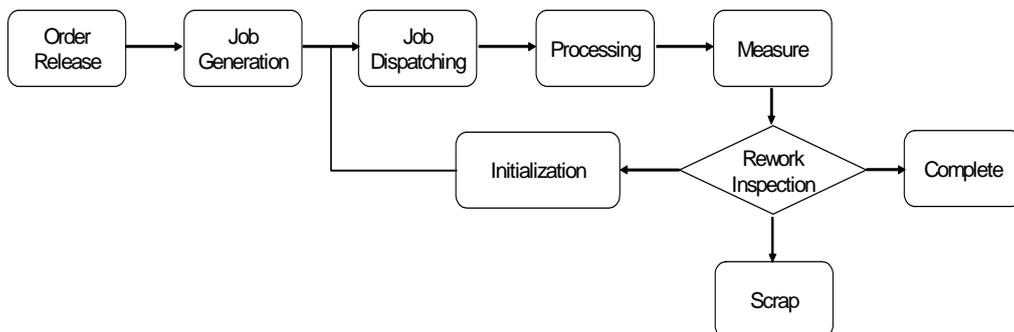


Figure 1. Job progress procedure

기계 2, 3, 4를 제외한 나머지 기계들은 투입이 불가능한 상태이다. 만일 품질이 제품타입과 기계의 관계에 따라 각각 정규 분포  $N(\mu_{mi}, \sigma_{mi}^2)$ 을 따른다고 가정할 때 <Figure 2>에서처럼 각 기계는 타입 1인 제품에 대해 서로 다른 품질 분포를 갖게 된다. 만일 가능한 기계들 중에서 기계 4의 품질 분포가 Rework을 많이 발생시키고 기계 2와 기계 3은 Rework 발생의 비율은 같지만 기계 2의 품질 평균이 목표하는 품질에 가장 근접한 분포를 한다면 타입 1인 작업은 기계 2에 투입 되는 것이 바람직할 것이다.

만일 타입 1인 작업을 투입할 때 투입방법(Job Dispatching)이 품질을 고려하지 않고 기계 4로 작업을 투입한다면 결과는 Rework으로 판정될 가능성이 높아지게 되고 Rework으로 판정될 경우 작업 초기화 및 재작업 시간에 대한 부담이 증가되어 납기 준수에 많은 어려움이 발생하게 될 것이다 또한 높은 품질의 제품 생산을 위해 가공수준에 높은 제약을 두어 작업을 투입 한다면, 가공품질수준이 높은 기계 2로만 제약되어 투입되고 이로 인해 대기공간에 대기 중인 타입 1인 작업들은 가공할 설비 부족으로 인해 대기시간이 증가하게 된다. 또한 타입 1인 작업의 발생이 증가하면 대기공간에서 대기하는 작업들은 점점 더 증가하게 되고 대기시간은 점점 더 늘어나게 된다. 즉, 품질에 제약으로 인해 Rework이 발생할 확률은 감소하지만 대기공간에서의 대기시간 증가로 인해 작업의 납기 준수에 어려움이 발생하게 된다. 따라서 이상의 문제를 해결하기 위해 품질을 고려하며 납기 준수가 가능한 효과적인 작업투입 방법(Job Dispatching)이 필요하여 본 연구를 제안하게 되었다. 본 연구에서 제안하는 작업투입 방법을 통해 기업은 고객이 만족하는 품질과 납기 준수를 통하여 기업의 이윤을 높이고 경쟁력을 강화시킬 수 있을 것으로 기대한다

본 연구의 문제에는 두 가지 고려해야 할 사항이 존재한다. 첫째는 품질제약을 해결해야 하고 둘째는 효율적인 작업투입을 지시해야 한다. 따라서 본 연구의 진행에 필요한 두 가지 고려사항에 대해 기존연구를 통해 효율적인 대안이 존재하는가를 확인한다.

일반적인 작업투입 정책인 FIFO(First in First Out), EDD(Earliest Due Date), MS(Minimum Slack), SPT(Shortest Process Time) 등을 제외하고도 제조회사들은 효율적인 작업투입 방법들에 대해 그동안 많이 연구들을 수행해 왔다 그동안 개발된 대표적인 작업투입 방법으로는, 작업투입을 결정할 때 순서 의존적인 작업준비시간과 작업투입 시점을 고려한 Kim(1994)의 연구가 있었다. Kim(1994)은 작업준비시간이 주문생산과 같은 생산시스템의 성능에 미치는 영향을 연구하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 특히 작업준비시간이 순서 의존적인 경우에는 작업투입 문제를 풀 때 반드시 고려되어야 하는 요소임을 보였다.

정해진 작업 수를 가지고 작업준비시간이 존재하지 않는 단일기계 문제에서 최대 납기지연시간(Maximum Lateness Tardiness 이하  $L_{Max}$ )을 최소화하는 방법들은 지금까지 많이 연구되어

왔다. 단일기계 문제는 작업투입시점( $r_j$ )의 제약이 없을 경우 EDD규칙을 이용하면 쉽게 최적 해를 구할 수 있다(Baker, 1974). 그러나 단일 기계에서 작업투입시점의 제약이 존재하는 문제( $|r_j|L_{Max}$ )는 NP-hard이다(Garey, 1979).

$L_{Max}$ 를 목적 함수로 하는 일반적인 병렬기계(Parallel Machine) 문제( $P||L_{Max}$ )는 NP-hard이다(Pinedo, 1999). 또한 순서 의존적인 작업준비시간( $s_{ij}$ )이 함께 존재하는 문제( $|r_j, s_{ij}|L_{Max}$ ,  $P|r_j, s_{ij}|L_{Max}$ )는 더욱 어렵다(Ovacik, 1995).

Uzsoy(1991)는 ( $|r_j, s_{ij}|L_{Max}$ ) 문제에 대한 최적 해를 찾기 위해 분지한계법(Branch and Bound Algorithm)을 제시하였다. 하지만 분지한계법은 작업수가 대략 15개 이상으로 증가하면 수행 속도상 큰 부담을 갖는다는 어려움이 있었다.

Ovacik(1994)은 주어진 예측 구간(Forecast Window) 내에서 가능한 작업들의 정보를 이용하여 작업 가능 시점과 순서 의존적인 작업시간이 존재하는 단일기계에서  $L_{Max}$  문제를 풀었다. 그리고 Ovacik(1995)은 알고리즘의 수행속도상의 문제점을 해결하기 위하여 같은 문제에 대해 RHP(Rolling Horizon Procedure) 알고리즘을 제시하였다. Ovacik(1995)이 제시한 RHP알고리즘은 근시안적인 작업투입 방법보다 적절한 시간 내에서 매우 우수한 성능을 보인다는 것이 입증되었다.

납기지연가중치의 합(Total Weighted Tardiness : 이하 TWT)의 최소화를 목적으로 하는 연구들도 또한 수행되어 왔다 Kim(1995)은 TWT를 최소화하는( $|s_{ij}|TWT$ ) 문제를 풀기 위한 방안으로 할당규칙과 신경망(Neural Networks)을 결합한 혼합적인 방법(Hybrid Approach)을 사용하였다. 신경망을 이용한 할당 방법은 신경망 학습에 따라 성능의 편차가 크게 발생하고 신경망의 학습이 어렵다는 단점이 있다.

Lee(1997)는 역시( $|s_{ij}|TWT$ ) 문제의 해법으로 ATCS(Apparent Tardiness Cost With Setup) 규칙을 사용하는 3단계 발전적 기법 절차를 제안하였다. 또한 Lee and Pinedo (1997)는 병렬기계에서 TWT를 최소화하는 ( $P|s_{ij}|TWT$ ) 문제를 풀기 위해 할당규칙과 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing)기법을 결합한 기법을 제시하였다. Lee and Pinedo(1997)의 ( $P|s_{ij}|TWT$ ) 문제는 Lee(1997)가 단일 기계 문제에서 제안하였던 ATCS규칙을 병렬 기계로 확장하여 사용하였다. Schutten(1996)은 동종 병렬기계의 납기지연의 합을 최소화하는 문제( $P|s_{ij}|TWT$ )를 분지한계법을 이용하여 해결하였다. 그러나 분지한계법을 이용하면 수많은 이웃해를 생성해서 수행 속도상의 문제를 가지게 된다.

품질을 고려한 기존의 연구들은 Rework에 대한 연구가 주류를 이루고 있다. 특히 1990년대 이후 Rework 제품의 재고관리와 투입정책에 관한 많은 연구가 진행되었다 또한 지금까지도 Rework에 관한 연구는 재고정책과 경제적 실익에 따른 Rework 작업 Lot의 크기 결정 문제가 대부분이다. 여러 제품이 동시에 생산되고, 생산계획이 계속해서 변경되며 Rework 제품이 무작위로 발생하는 현실을 감안한 Rework 제품 작업투

입정책에 관한 연구는 거의 없는 실정이다 또한 Rework이 아닌 양품에 대하여 품질의 차이를 표현하는 연구도 거의 없다

Rework 대기제품의 재고관리에 대한 기존의 연구로는 Flapper (2004)의 연구가 있다. Flapper(2004)는 폐기전략 및 Rework 전략에 따른 단위시간당 평균이익을 산출하였다. 하지만 일반제품과 Rework 제품의 Lot 수량은 항상 일정하다고 가정하였고 주문 제품의 생산계획 조정에 따른 납기차질을 고려하지 않았다. Jamal(2004)은 Rework 주기에 따른 공정 재고비용과 소비자 위험확률을 연구하였다. 하지만 Rework 주기를 일정한 시간으로 정하는 경우나 정해진 Rework Lot 수량만큼 모였을 때로 한정하였다.

Rework 제품 투입정책에 관한 연구는 주로 재고정책에 따라 최적의 Lot 수량을 결정하는 문제에 초점을 두었다. Liu (1996)와 Teunter(2003)은 단일제품 생산 조건에서 단위시간당 평균이익을 최대화하는 최적의 Rework Lot 수량결정 방법을 제시하였다. Hayek(2001)는 공정 재고 비용을 최소화하는 Rework 제품 진행방안을 제시하였다. 하지만 Rework 제품의 발생 비율은 항상 일정하다고 가정하였다.

Rework이 아닌 품질을 표기했던 연구로는 Everett(2001)의 연구가 있다. Everett(2001)은 품질 표기를 표준화하여 광석에 함유된 광물의 함유량을 비율로 표기하여 기준치와 비교하여 일정계획 수립에 사용하였다. Everett(2001)의 연구는 일반적인 제조환경과는 다르게 Rework이 없고 가공에 대한 품질을 표기하지는 않지만 품질 표기를 수치화 하였다는데 의미를 가진다.

이상의 연구에서 살펴보듯이 작업투입 방법에서 납기를 고려한 연구와 품질에 관한 연구는 분리되어 진행되어 왔다. 또한 품질에 관한 연구는 Rework 관리에 국한된 것들이 대부분이다. 실제 Rework 발생에 따른 작업투입 방법의 연구도 재고정책이나 Lot 수의 문제로 국한되어 작업이 가지는 납기는 전혀 고려되지 않았다. 또한 작업투입방법을 이용한 일정계획 수립 문제에서는  $n$ 개의 작업을 가지고 초기해 생성단계와 해의 개선 단계로 구성된다. 일정 계획 수립 문제는 해의 개선 단계를 거치기 때문에 초기해가 큰 영향을 주지는 못하고 개선에 필요한 많은 수행시간을 요구한다. 하지만 본 문제처럼 실시간으로 작업투입을 수행할 때는 작업의 개수는 제한이 없고 많은 시간을 필요로 하는 해의 개선을 수행할 수 없다. 특히 해의 개선단계에 널리 사용되는 메타휴리스틱(Meta-heuristic)은 수행속도가 오래 걸려 실시간 작업투입 방법에는 적합하지 못하다. 따라서 초기 투입될 작업 선택은 매우 중요하게 된다.

이상의 살펴본 것처럼 본 연구에서 다루는 문제에 대해 유사한 연구들은 없었으며, 이에 따라 본 연구에서는 품질을 고려하며 납기 준수가 가능한 실시간 작업투입 방법을 제안한다. 본 연구에서 제시하는 작업투입방법은 품질을 표준화시켜 품질제약을 만족시키며 납기를 준수하는 효율적인 작업투입 방법이다.

## 2. 본 론

### 2.1 문제의 정의

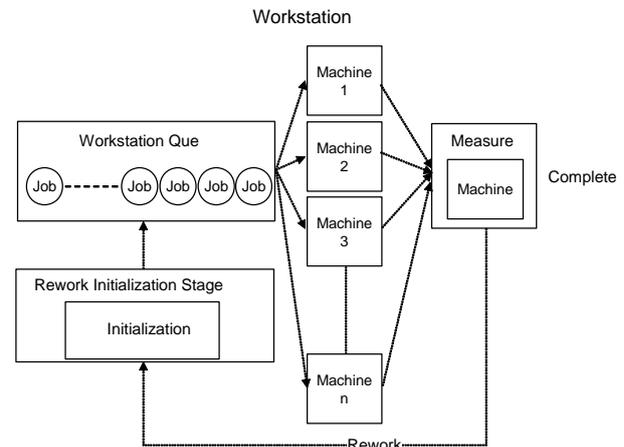


Figure 3. Workstation and Job flow Layout

품질을 고려한 작업투입을 위해 본 연구에서 다루는 자세한 공정 환경은 <Figure 3>과 같다. 워크스테이션(Workstation)은 동일 공정을 가공하는 기계들의 집합이다 워크스테이션은 작업이 대기하는 큐(Queue)와 가공을 수행하는 기계 및 결과를 측정하는 검사장(Measure Stage)과 Rework에 필요한 Rework 초기화 영역(Rework Initialization Stage)으로 구성된다.

워크스테이션의 큐는 기계의 대수와 상관없이 하나의 큐로 되어있다. 워크스테이션을 구성하는 기계는 제품타입에 따라 가공시간, 작업준비시간 및 작업 가공품질수준을 가지고 있다. 가공시간은 제품타입 별로 차이가 있으며 기계별로는 동일하다. 준비시간은 기계에서 바로 이전에 가공했던 작업의 제품타입과 현재 투입되는 작업의 제품타입에 따라 서로 다른 작업준비시간을 가진다. 작업준비시간은 제품타입과 관련이 있고 기계별로 이전 제품타입과 투입 되는 제품타입이 같으면 동일하다. 작업 가공품질수준은 기계와 제품타입별로 다르고 가공품질수준은 정규분포를 한다.

작업은 제품타입, 시작시간(Release Time)과 납기(Due Date)가 존재한다. 또한 작업은 가공이 완료되고 Rework이 아니면 작업완료시간을 갖는다. 작업완료시간은 기계에 투입되는 시간에 준비시간과 가공시간을 더한 시간이다. 만일 Rework이 발생하면 완료시간은 작업 가공에 소요됐던 시간에 초기화시간, 대기 공간으로 돌아가는 이동시간과 대기시간 및 Rework에 필요한 준비시간과 가공시간이 추가로 더해진다. Rework이 계속 발생하면 완료시간은 Rework을 위해 필요한 시간과 가공을 위해 필요한 시간만큼이 추가로 더해져서 늘어난다.

작업발생은 사전에 계획되어 발생하지 않는다. 따라서 작업 발생에 대한 정보는 알 수 없다. 또한 작업이 완료되거나 발생한 시점에서 향후 발생될 작업을 고려하여 투입을 지시할 수 없다. 작업투입은 대기공간에 존재하는 작업만을 대상으로 투

입될 작업을 결정한다. 또한 작업 결과는 가공이 끝나야 알 수 있어 미리 Rework에 대한 계획도 수립할 수 없다

기계에 투입될 작업의 결정은 작업 발생 시점에서 대기 공간에 대기하는 작업이 없고 가공 가능한 유틸 기계가 존재할 경우와 유틸 기계가 발생하였을 때 대기 작업이 존재할 경우에 정의된 투입방법에 따라 작업을 결정하여 투입한다. 작업 투입 결정은 미리 계획할 수 없으며 실시간으로 대기 공간 내의 작업들만을 가지고 계산하여 지시한다.

기계에서 가공을 완료한 작업은 계측을 수행하여 결과를 얻는다. 결과는 목표점과 계측점의 차이로 표현하고 차이의 정도를 품질이라 한다. 품질이 높으면 작업 결과는 0에 근접한다.

작업 결과는 공정의 관리규격수와 비교하여 한계를 넘어선 작업은 Rework을 수행한다. 작업 결과는 기계에서 제품, 기계의 가공수준에 따라 결정된다. 기계에서 가공수준의 평균은 공정관리규격 안에 있으며 편차는 0이상이다. 또한 Rework으로 판정된 작업은 폐기처분하지 않고 모두 Rework을 수행한다.

<Figure 3>의 흐름을 살펴보면 고객으로부터 주문이 발생하면 발생한 주문은 제품타입과 납기를 가지는 작업이 된다. 발생한 작업은 대기 공간(Workstation Queue)으로 입력되어 대기한다. 만일 가공이 완료되어 기계가 유틸(Idle)하게 되면 대기 중인 작업들을 대상으로 투입방법에 따라 작업을 선택한다. 선택된 작업은 기계에 투입되고 제품에 따른 준비시간과 가공 시간만큼 가공을 받는다. 가공이 완료된 작업은 계측기계로 이동하여 계측을 수행하고 작업 결과를 받는다. 작업 결과에 따라 불량인 작업은 가공 초기화를 거쳐 재가공을 위해 작업 대기공간으로 이동한다. 작업 결과가 양품이면 현재 공정은 완료된다.

품질은 제조회사에서 제품의 가치를 평가하는 기준으로 수익의 원천이다. 제조회사에서는 판매될 제품의 높은 품질을 요구하여 기업의 수익을 올리기를 원한다. 그러나 지나치게 높은 품질의 요구는 소유하고 있는 기계들의 한계를 넘어서게 되어 가공에 필요한 기계를 찾을 수 없게 된다. 가공 기계의 부족으로 인해 납기를 지킬 수 없는 것은 경쟁력 상실의 원인이 된다. 따라서 공정 설비들의 한계를 고려한 적절한 품질제약을 실시해야 한다.

이상의 문제 상황에 대하여 본 연구는 Rework이 존재하는 공정 환경에서 기업의 수익과 관련되어 제품의 품질제약을 달성하며, 납기 준수가 가능하도록 효율적인 실시간 작업투입을 수행한다.

## 2.2 전체 알고리즘 구성

본 연구는 문제 정의에서 제시된 공정 환경에서 품질을 높이기 위해 품질제약을 달성하면서 납기 준수가 가능한 생산이 될 수 있는 효율적인 작업투입 방법을 제안한다. 납기와 관련된 지표로는 총 납기 지연시간의 합(Total Tardiness), 최대 납기 지연시간( $L_{Max}$ ), 평균 납기 지연시간(Mean Tardiness)이 있다.

이들 중에 본 연구의 문제 상황처럼 계획된 작업수를 가지지 않고 시간에 따라 계속해서 발생하는 작업들의 납기 준수 정도를 비교하는 척도는 평균 납기 지연시간이다. 따라서 본 연구의 수행 성능을 판단하는 지표로 평균 납기 지연시간을 사용한다. 본 연구에 대한 목적함수와 제약식을 수식으로 정리하면 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$\text{Min} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \text{Max}(C_j - D_j, 0) \quad (1)$$

st

$$\text{Quality}_i > \text{Threshold}_i$$

$j$ : 작업 인덱스

$i$ : 제품타입 인덱스

$n$ : 완료 작업의 수

$C_j$ : 작업  $j$ 의 완료시간

$D_j$ : 작업  $j$ 의 납기

$\text{Quality}_i$ : 제품타입  $i$ 의 품질

$\text{Threshold}_i$ : 제품타입  $i$ 의 최소 품질 임계값

식 (1)에서 목적은 완료된 작업에 대해 품질의 제약을 만족하며 평균 납기 지연 시간을 최소화하는 것이다. 식 (1)에서  $\text{Max}(C_j - D_j, 0)$ 은 작업의 완료시간에서 작업의 납기를 뺀 것으로 완료 작업의 납기 지연 시간을 표현한다. 또한 납기 지연 시간의 총합을 완료 작업의 수로 나누어 평균 납기 지연 시간을 표현한다.

제약식에서  $\text{Threshold}_i$ 는 제조회사에서 요구하는 제품타입  $i$ 의 최소 품질 임계값이다. 최소 품질 임계값은 완성된 제품 품질을 최대한 보증하기 위한 것이다. 따라서 품질에 대한 최소 한계를 규정함으로써 평균적인 품질은  $\text{Threshold}_i$  값보다 상회하게 된다.

본 연구의 목적인 품질의 제약을 만족하며 평균 납기 지연 시간을 최소화하는 문제를 풀기 위해 전체 알고리즘은 3단계로 나누어 수행된다.

첫 번째 단계는 품질에 대한 제약을 해결하고 투입되는 작업간의 품질의 차이를 비교하기 위해 품질을 표준화시킨 품질 인덱스를 계산하는 것이다. 품질인덱스는 공정 내의 기계들이 가지는 제품별 상이한 가공수준을 동일한 기준으로 수치화하는 것이다. 이를 활용하여 작업투입을 결정할 때 품질제약을 달성하는 작업이 우선적으로 투입 될 수 있게 한다.

두 번째 단계는 품질인덱스를 통해 품질제약을 만족시키는 작업들 중에서 납기, 준비시간 및 가공시간을 고려하여 효율적인 작업투입이 가능하도록 작업을 선택하게 된다. 본 연구의 목적은 품질 제약 달성도 있지만 궁극적으로 납기 준수를 수행하는 것이다. 따라서 납기 준수 관련 작업 선택은 필수적이다. 기존 연구 중에서 납기 준수에 효율적인 방법으로는 Lee(1997)가 제안한 ATCS(Apparent Tardiness Cost With Setup)

가 있다. ATCS는 순서 의존적인 작업준비시간과 작업의 납기를 고려하여 TWT 및  $L_{Max}$ 를 최소화하는 문제를 풀기위해 제안되었고 성능의 우수함을 보였다. 따라서 본 연구에서는 납기 준수를 위해 ATCS에 품질을 반영하여 개선한 ATCSQ(Apparent Tardiness Cost With Setup and Quality)를 제안하여 사용한다. 또한 ATCSQ를 이용하여 납기 관련 중요도를 계산하여 수치화하고 중요도에 따라 투입 작업을 선택한다

마지막 단계에서는 ATCSQ를 이용하여 선택한 작업을 1단계 국부탐색(Local Search)를 통해 보다 최적에 근사한 작업투입이 되도록 개선한다. 비록 ATCS가 최적의 해를 제시하지는 않지만 일정계획 문제를 풀 때 최적에 근사한 초기해를 제공하여 해의 개선을 수행하는 탐색 방법들이 빠르게 최적의 해를 찾도록 한다. 따라서 본 연구도 ATCSQ를 통해 선택된 작업에 대해 해의 개선을 통하여 목적하는 품질제약을 만족 시키며 평균 납기지연시간을 줄여가는 해를 구하도록 한다

본 문제는 실시간 작업할당을 수행하기 때문에 일정계획의 문제와 같이 정해진 작업들에 대해서 해의 개선에서 많은 수행 시간이 필요한 메타휴리스틱을 사용할 수 없다. 따라서 1단계 국부탐색인 MCTS(Machine Completion Time Search)를 사용하여 선택된 작업의 기계별 완료시간과 품질제약을 재검토하는 방법을 통해 해의 개선을 수행한다. MCTS를 통한 개선은 품질제약의 만족과 평균 납기지연시간 사이에서 투입 가능한 설비를 비교하여 목적함수인 평균 납기지연시간을 품질이 만족되는 범위에서 최소화하기 위한 방법이다

즉, 본 연구는 품질인덱스를 계산하고 납기 준수의 중요도에 따라 작업을 선택하며, 선택된 작업의 개선을 수행하는 효율적인 작업투입 방법을 제시하는 것으로 이를 EATCSQ(Effective Apparent Tardiness Cost With Setup and Quality)라 정의하고자 한다.

### 2.3 품질의 표준화

본 연구는 문제를 해결하기 위한 첫 번째 단계로 품질에 대한 제약 조건을 만족여부 확인 및 투입되는 작업간의 품질의 차이를 비교하기 위해 품질을 표준화하는 품질인덱스를 계산한다.

일반적인 제조공장에서는 생산 모델의 성능을 측정하기 위해 대기 작업의 수, 완료 작업의 수, 사이클 타임(Cycle Time), 가동률, 재가공률(Rework rate) 등의 지표를 사용하고 있다. 이상의 지표들은 제조공장의 생산성을 평가하는 좋은 지표가 될 수 있다. 그러나 품질과 관련된 지표는 Rework rate 뿐이고, 특히 품질의 차이와 관련된 표준화된 지표는 없다. 따라서 품질에 대한 차이를 표현하며 작업의 품질을 측정하거나 비교할 수 있는 표준화된 품질 지표가 필요하다. 품질 표준화는 품질 정의로부터 수행된다. 본 연구에서 품질은 목표점과 가공후의 계측점에 대한 오차로 정의된다. 이를 수식으로 표현하면 식(2)와 같다.

$$q_{ji} = (T_i - M_{ji}) \tag{2}$$

$i$ : 제품타입 인덱스

$q_{ji}$ : 제품타입이  $i$ 인 작업  $j$ 의 품질

$T_i$ : 제품타입  $i$ 의 공정 목표값

$M_{ji}$ : 제품타입이  $i$ 인 작업  $j$ 의 계측값

식(2)에서 작업품질  $q_{ji}$ 는 제품타입  $i$ 의 가공에 필요한 공정 목표값  $T_i$ 와 가공 후의 결과를 계측한  $M_{ji}$ 의 차이이다. 작업 품질은 가공하는 기계의 제품타입에 따른 가공품질수준으로 결정된다. 가공품질수준은 분포로 주어지므로 평균만을 사용하기에는 변동성이 존재하여 정확한 품질의 차이를 구별하기 힘들다. 또한 변동성만으로 평가할 경우 목표치와의 차이를 반영할 수 없다. 따라서 가공품질수준의 평균과 변동성을 이용하여 품질을 대표할 수 있는 지표가 필요하다. 또한 동일 기계에서 서로 다른 제품타입의 작업들 간에 품질 차이를 표현할 수 있는 표준화된 품질지표가 필요하다.

본 연구에서는 공정 전체를 대표하는 표준화된 품질지표로 Juran(1980)이 공정의 안정성을 측정하기 위해 개발한 공정능력지수(Cpk : Process Capability Index)를 이용한다. 공정능력지수는 제품타입별로 설계 시에 규정된 공정관리규격을 기준으로 공정의 품질 능력을 평가한다. 또한 공정관리규격은 제품타입별로 동일한 평가가 가능하도록 설계 시에 규정된 값이다. 공정능력지수에 대한 수식을 정리하면 식(3)과 같다.

$$Q_i = \text{Min}\left(\frac{USL_i - \mu_i}{3\sigma_i}, \frac{\mu_i - LSL_i}{3\sigma_i}\right) \tag{3}$$

$$\mu_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} q_{ji}, \quad \sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n_i - 1} \sum_{j=1}^{n_i} (q_{ji} - \mu_i)^2}$$

$Q_i$ : 제품타입  $i$ 의 공정능력지수

$USL_i$ : 제품타입  $i$ 의 상위 공정관리규격 한계(Upper Spec Limit)

$LSL_i$ : 제품타입  $i$ 의 하위 공정관리규격 한계(Lower Spec Limit)

$\mu_i$ : 제품타입  $i$ 의 품질의 평균( $LSL_i \leq \mu_i \leq USL_i$ )

$\sigma_i$ : 제품타입  $i$ 의 품질의 표준 편차( $\sigma_i \geq 0$ )

$q_{ji}$ : 제품타입  $i$ 인 작업의 개별 품질

$n_i$ : 제품타입  $i$ 인 작업의 총 완료 개수

식(3)은 Juran(1980)이 제시한 공정능력지수를 본 연구의 상황에 맞게 정리한 것이다. 공정능력지수는 상·하위 공정관리규격에서 공정변동에 대한 규격변동의 양적인 표현과 산포의 중심에서 벗어난 정도를 표현한 것이다. 공정능력지수는 공정에 있어서 달성할 수 있는 능력이고 공정이 최상을 이룰 때 작업들의 변동이 어느 정도인지를 표시하는 값이다 또한 공정

능력은 공정이 만들어 낼 수 있는 품질에 대한 달성 가능 능력이라고 말할 수 있다.

공정능력지수가 개별 작업의 품질을 표현하지는 않지만 공정의 전반에 걸쳐 제품타입  $i$ 인 작업들의 목표 품질에 대한 달성 정도를 표현한다. 본 연구의 가공품질수준도 변동성과 목표점에서의 치우침이 존재함으로 공정능력지수를 이용하면 품질에 대한 표준화 된 계수를 계산할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 공정능력지수를 표준품질지표로 사용하는 품질인덱스를 정의 한다. 공정능력지수 값은 목표점에 공정의 품질 평균이 근접하고 변동이 작으면 높게 나타나고, 목표점으로부터 공정의 품질 평균이 멀고 변동이 크면 작은 값을 가지게 된다. 본 연구에서는 공정능력지수를 사용하여 작업투입 시점에서 과거 진행된 기계별 제품들의 품질 분포와 품질제약을 기반으로 표준품질지표를 계산하여 비교한다. 또한 완료된 작업들에 대한 품질평가도 공정능력지수로 표현한다.

**2.4 Apparent Tardiness Cost With Setup and Quality**

두 번째 단계에서는 표준화된 품질과 제약을 가지고 대기하는 작업들에 대해 납기, 준비시간, 가공시간을 고려한 효과적인 작업 선택을 수행한다.

작업 선택에 대한 방법으로 Lee(1997)가 제안한 ATCS에 품질을 반영하여 개선한 ATCSQ(Apparent Tardiness Cost With Setup and Quality)규칙을 제안하여 사용한다. ATCSQ는 가공시간, 여유시간, 순서의존적인 작업준비시간과 품질인덱스를 이용하여 작업가중치를 계산한다. 또한 ATCSQ는 작업들에 대하여 기계별 품질제약의 만족 유무를 표현한다. 투입을 위해 선택될 작업은 ATCSQ로 계산된 작업가중치가 높은 작업이다. 또한 선택된 작업은 해당 기계에서 대기하는 작업들 중 가공시간, 여유시간, 작업준비시간이 작고 품질이 높은 작업이다. ATCSQ를 수식으로 표현하면 식 (4)~식 (6)과 같다.

$$I_{j,m}(t, l) = \frac{f_{j,m}}{p_j} \exp\left(-\frac{\text{Max}(d_j - p_j - t, 0)}{k_1 \bar{p}}\right) \exp\left(-\frac{s_{l_j}}{k_2 \bar{s}}\right) \quad (4)$$

$$f_{j,m} = \begin{cases} \sqrt{(\exp(-Q_{j,m}) - 1)^2} & Q_{j,m} \geq \text{Threshold}_i \\ 0 & Q_{j,m} < \text{Threshold}_i \end{cases} \quad (5)$$

$$Q_{j,m} = \text{Min}\left(\frac{USL_i - \mu_{mi}}{3 \times \sigma_{mi}}, \frac{\mu_{mi} - LSL_i}{3 \times \sigma_{mi}}\right) \quad (6)$$

$I_{j,m}(t, l)$ : 시간  $t$ 시점에, 유희기계  $m$ 에서 이전 작업이  $l$ 인 경우, 작업  $j$ 의 작업가중치

$\bar{p}$ : 전체 평균 가공시간

$p_j$ : 타입  $i$ 인 작업  $j$ 의 가공시간

$d_j$ : 작업  $j$ 의 납기

$\bar{s}$ : 전체 평균 작업준비시간

$s_{l_j}$ : 작업  $l$ 이후 작업  $j$ 의 작업준비시간( $s_{l_j} \neq s_{j_l}$ )

$Q_{j,m}$ : 타입  $i$ 인 작업  $j$ 가 기계  $m$ 에서 갖는 품질인덱스

$f_{j,m}$ : 타입  $i$ 인 작업  $j$ 가 기계  $m$ 에서 갖는 정규품질계수

$\text{Threshold}_i$ : 품질제약을 위해 사용되는 제품타입  $i$ 의 품질임계값 ( $\text{Threshold}_i > 0$ )

$\mu_{mi}$ : 기계  $m$ 에서 타입  $i$ 의 평균 품질

$\delta_{mi}$ : 기계  $m$ 에서 타입  $i$ 의 품질 표준편차

$m$ : 가공기계 ( $m = 1, 2, \dots, c$ )

$i$ : 제품타입 ( $i = 1, 2, \dots, n$ )

$k_1, k_2$ : 조정 모수 ( $k_1, k_2 > 0$ )

식 (4)는 ATCSQ를 통해 작업  $j$ 가 기계  $m$ 에서 계산된 가중치를 표현한다. 식 (5)는 계산된 품질인덱스를 이용하여 품질 제약조건을 만족유무를 판단한다. 또한 품질제약을 만족하는 작업에 대해 품질인덱스를 정규화시켜 식 (4)에 반영될 정규품질계수를 산출한다. 식 (6)은 품질인덱스를 계산하는 것으로 기계  $m$ 에서 제품타입  $i$ 인 작업  $j$ 의 가공 품질 수준을 공정능력지수를 이용하여 수치화 하는 것이다

ATCSQ를 계산하기 위해 먼저 식 (6)을 통해 작업들의 품질을 공정능력지수로 계산하여 품질인덱스를 구한다. 품질인덱스는 해당 기계를 통해 가공된 작업들의 과거데이터를 사용한다. 기계  $m$ 에서 가공된 제품타입  $i$ 의 누적품질평균을  $\mu_{mi}$ 라고 하고 표준편차를  $\delta_{mi}$ 라 정의한다. 각  $\mu_{mi}, \delta_{mi}$ 는 동일 제품타입이라 하더라도 기계별로 모두 다르게 나타난다. 특히 기계와 잘 맞는 제품타입일수록  $\mu_{mi}, \delta_{mi}$ 는 목표점에 가까우며 변동이 작은 안정 상태를 가진다. 또한  $\mu_{mi}, \delta_{mi}$ 는 시간에 따른 과거의 누적 품질을 반영하므로 설비의 변화가 발생하였을 경우 누적된 과거 작업들의 데이터에 의해 실시간으로 갱신한다. 따라서 실시간 작업투입에 품질도 기계의 변화를 반영할 수 있게 과거 변화를 반영한 제품타입별 기계의 가공품질수준인  $\mu_{mi}, \delta_{mi}$ 를 이용하여 품질인덱스를 계산한다.

계산된 품질인덱스는 식 (5)를 통해 미리 정의된 제품타입  $i$ 의 품질제약 만족여부를 판단하는데 사용된다. 식 (5)는 작업의 품질인덱스가 임계값 이상인 작업들을 선별한다. 또한 식 (5)는 임계값 이상인 작업들의 품질인덱스를 가지고 작업가중치를 계산하는 식 (4)에 반영될 수 있도록 정규품질계수로 변환한다. 정규품질계수는 ATCSQ에서 사용되는 각 항의 표현 범위와 동일한 0에서 1사이의 값을 가진다. 식 (5)와 식 (6)을 통해 계산된 정규품질계수는 식 (4)의 첫 번째 항에 있는  $f_{j,m}$ 에 품질 만족 유무와 차이로 반영된다.

식 (4)에서 첫 번째 항은 품질과 SPT(Shortest Process Time) 규칙을 반영하여 품질이 높고 가공시간이 작으면 높은 값을 가지게 한다. 첫 번째 항의 품질 계수( $f_{j,m}$ )는 식 (5)을 통해 0에서 1의 범위를 가지며, SPT 규칙인  $\frac{1}{p_j}$  또한 0에서부터 1사

이의 값을 가진다. 두 번째 항은 여유시간을 표현하는 MS (Minimum Slack) 규칙을 반영하여 납기까지의 여유정도를 파악한다. 만일 납기까지의 여유가 없으면 1에 가까운 높은 값을 가지고 납기까지의 여유가 많으면 0에 가까운 값을 가지게 된다. 세 번째 항은 SST(Shortest Setup Time) 규칙을 표현하며 순서 의존적 작업준비시간이 작으면 1에 가까운 값을 가지고 작업준비시간이 크면 0에 가까운 값을 가지게 된다. 두 번째 항과 세 번째 항에서 사용된  $k_1$ ,  $k_2$ 는 조정모수(Scaling Parameter)로서 두 번째 항과 세 번째 항이 전체 인덱스 값에 미치는 영향을 조절해주는 가중치 역할을 한다. 본 연구에서는 Lee (1997)의 연구에서 검증된 결과를 토대로  $k_1$ 과  $k_2$ 의 값을 1.6과 3.0으로 정의하여 사용한다.

## 2.5 Machine Completion Time Search

ATCSQ는 유휴 기계가 존재하면 기계별로 작업들의 중요도를 산출한다. 산출된 중요도는 해당 기계에서의 품질과 SPT, MS, SST가 반영된 것이다. 그러나 ATCSQ도 ATCS와 마찬가지로 선택된 작업이 최적의 작업은 아니고 최적에 근사한 작업을 선택하게 된다. 또한 ATCSQ로 계산된 중요도가 높은 작업을 해당 기계에 투입하더라도 작업완료시간이 가장 빠른 것이 아닐 수 있다. 동일한 작업이라도 기계별로 품질 및 작업준비시간이 다르기 때문에 중요도의 차이가 발생할 수 있다.

본 연구의 목적은 평균 납기지연시간을 최소화 하는 것이다. 평균 납기지연시간을 최소화하기 위한 기본적인 방법은 작업의 완료시간을 줄이는 것이다. 따라서 본 연구의 목적을 충족시키기 위해서는 작업 중요도만으로 작업을 투입해서는 최적의 해를 구할 수 없다.

만일 다른 유휴기계가 존재하지 않을 경우, 가장 높은 중요도를 갖는 작업의 투입은 품질과 납기에 관련하여 좋은 정보를 제공해 줄 수 있다. 하지만 다른 유휴 기계들이 존재할 경우 중요도가 높은 작업이라도 각 기계들에서 품질제약의 만족여부 및 작업완료시간들과 비교할 필요가 있다.

완료시간은 유휴 기계들에서 순서 의존적인 작업준비시간에 따라 기계별로 차이를 가질 수 있다. 따라서 선택된 중요 작업을 기준으로 품질제약이 만족되는 유휴 기계들에서 작업완료시간들을 계산한다. 또한 유휴 기계들의 작업완료시간들 중에서 최적의 작업완료시간을 갖는 기계를 찾아야 본 연구에서 목적하는 평균 납기지연시간을 줄일 수 있다. 유휴 기계에서 작업완료시간이 빠르다는 것은 식(4)에서 작업준비시간이 작은 것이다.

본 연구에서는 최종 투입 결정을 위한 마지막 단계로 ATCSQ로 계산된 높은 중요도의 작업을 1단계 국부탐색 방법인 MCTS (Machine Completion Time Search)를 사용하여 작업완료시간이 최적인 기계를 찾는다. 최종 투입 결정은 품질인덱스와 작업완료시간을 유휴기계별로 비교하여 본 연구의 목적이 만족 되도록 효과적으로 작업투입을 결정하는 것이다. MCTS의 기

본적인 탐색 방법은 식(7)과 같다.

$$C_{j,m} \geq C_{j,c}, Q_{j,c} \geq Threshold_i \quad (7)$$

$c$  : 유휴 기계

$m$  : 투입대상 기계

$C_{j,m}$  : 제품타입  $i$ 인 작업  $j$ 가 기계  $m$ 에서 갖는 작업완료시간

MTCS의 개선 절차는 ATCSQ에 의해 선택된 작업을 투입대상 작업으로 선정하고 현재의 기계를 투입대상 기계로 선정하여 계산한 작업완료시간을 Best Completion Time으로 선정한다. 작업완료시간은 현재시간에 작업준비시간과 가공시간을 더한 합으로 계산한다. MCTS는 투입대상 기계 이외의 모든 유휴기계를 대상으로 현재 작업의 품질을 식(6)를 통해 계산하고, 각 기계의 이전 제품타입을 고려하여 작업완료시간을 계산한 후 비교한다.

만일  $Q_{j,c} \geq Threshold_i$ 인 기계  $c$ 에서 작업완료시간이  $C_{j,m} \geq C_{j,c}$ 이면 투입대상 기계를 작업완료시간이 작은 기계  $c$ 로 변경하고 Best Completion Time을 기계  $c$ 에서의 작업완료시간으로 교체한다. 또한 동일한 방법으로 다른 유휴 기계를 대상으로 탐색을 수행한다. MCTS를 통한 최종 작업투입 결정은 품질제약의 달성 및 작업의 납기 만족과 공정의 효율적인 운영을 가능하게 한다.

본 연구는 이상의 3단계 방법을 통한 작업투입을 EATCSQ라 정의하였고, 이를 통해 품질의 제약을 만족시키며 평균 납기지연시간의 최소화를 달성할 수 있는 방법을 제시하였다.

EATCSQ는 공정능력지수를 기반으로 제품타입별 기계별 품질 표준화를 수행한 품질인덱스를 포함하고 있다. 품질인덱스는 서로 다른 가공수준을 비교할 수 있으며 품질제약을 해결할 수 있다. 또한 EATCSQ는 한계 품질 조건을 만족시키며 납기 준수를 위한 작업 선택 방법을 포함하고 있다. 작업 선택 방법은 ATCS를 개선하여 품질의 만족 여부와 납기 준수를 동시에 표현할 수 있는 ATCSQ를 이용한다. 마지막으로 ATCSQ에서 선택된 작업을 초기해 조건으로 설정하여 본 연구의 목적함수가 최적이 되도록 개선하는 MCTS를 포함하고 있다. 각 단계별 과정을 통해 EATCSQ는 목적하는 품질제약을 만족할 수 있으며, 평균 납기지연시간을 최소화하며 효율적인 실시간 작업투입이 가능하게 된다.

자세한 EATCSQ의 절차를 정리하면 다음과 같다.

### [EATCSQ의 작업투입 절차]

- Step 0 : 대기 공간에 있는 모든 작업들의 품질 인덱스를 유휴 기계별로 계산한다.
- Step 1 : 품질인덱스를 이용하여 유휴기계들에 대한 품질 만족 여부를 확인하고 품질 계수를 계산한다.
- Step 2 : ATCSQ를 이용하여 가중치를 계산하고 가장 높은 가중치의 작업과 유휴기계를 선택한다.

- Step 3 : 선택된 작업을 Best\_Job으로 설정하고 기계를 Best\_Machine으로 설정한 후에 작업완료시간을 계산하여 Best\_Complete\_Time으로 설정한다.
- Step 4 : 선택된 작업에 대하여 가능한 다른 유희기계를 검색하고 유희기계가 있다면 첫 번째 유희기계를 선택하고 Step 5로, 유희기계가 없다면 Step 8로 이동한다.
- Step 5 : 유희기계에서 선택된 작업의 완료시간을 계산하여 Compete\_Complete\_Time으로 설정하고, 해당 기계의 품질인덱스( $Q_{j,m}$ )를 계산한다.
- Step 6 : Best\_Complete\_Time > Compete\_Complete\_Time이고  $Q_{j,m} > Threshold_i$ 이면 Best\_Complete\_Time을 Compete\_Complete\_Time으로 교체하고 Best\_Machine을 해당 유희기계로 교체한다.
- Step 7 : 또 다른 유희기계가 있다면 Step 5로, 없다면 Step 8로 이동한다.
- Step 8 : Best\_Job을 Best\_Machine에 해당하는 기계에 할당하고 대기 공간에서 작업을 제거한다.
- Step 9 : 공정 내에 유희 기계가 존재하고 대기공간에 대기 중인 작업이 존재하면 Step 0으로 이동, 유희 기계가 존재하지 않거나 대기 작업이 없으면 작업투입을 종료한다.

### 3. 실험 및 결과 분석

#### 3.1 실험 대안 설정

본 연구는 연속적으로 발생하는 작업들을 병렬기계에서 품질을 고려하여 실시간으로 할당하는 효율적인 작업투입 방법을 제안하고 있다. 지금까지 발표된 연구들 중에서 본 연구와 같은 조건을 갖는 작업투입 문제에 대한 연구는 없었다 따라서 제안된 알고리즘에 대한 객관적인 성능 평가를 위해 품질 및 납기와 관련된 기존의 우수한 작업투입 대안들을 가지고 동일한 환경에서 비교를 수행하고자 한다

먼저 납기관련 대안으로 Lee(1997)가 제안한 ATCS를 사용한다. ATCS는 품질을 고려하지는 않지만 납기와 관련된 기존 연구 중에서 성능의 우수함을 인정받고 있다 또한 본 연구에서도 납기 준수를 위한 방법으로 ATCS를 응용하여 사용하였으므로 적절한 대안으로 사용될 수 있다.

품질관련 대안으로는 지금까지의 연구에서는 품질을 반영한 연구가 없었고 특히 품질 위주의 작업투입을 지지하는 연구가 없어 적절한 대안은 찾을 수 없었다. 그러나 본 연구는 품질을 고려하기 위해 품질인덱스를 사용한다. 따라서 본 연구에서 제시한 품질인덱스를 사용하여 품질 우선의 대안을 결정하는 방법을 비교대안으로 사용한다. 품질 우선의 대안은 대기공간에 존재하는 작업들을 대상으로 유희 기계에서의 품질인덱스를 계산하여 가장 높은 품질인덱스를 갖는 작업을 투입

하는 방법이다. 본 연구는 품질 우선의 투입방법을 Quality\_Rule이라 정의하고 대안 알고리즘으로 사용한다.

또한 본 연구는 품질을 고려한 초기 작업 선택 방법으로 ATCS를 개선한 ATCSQ를 사용한다. 본 연구에서 제시한 작업 선택 방법인 ATCSQ는 품질과 납기에 대하여 동일한 비중으로 작업을 선택하는 방법이다. 따라서 납기와 품질위주의 기존 대안들과 비교되는 좋은 대안으로 사용될 수 있으며, 특히 본 연구에서 제시한 EATCSQ의 개선 효과를 검증하는데 좋은 대안이 될 수 있다.

따라서 이상의 ATCS, Quality\_Rule, ATCSQ를 이용하여 본 연구에서 제안한 EATCSQ와 성능 평가를 실시하도록 한다. 수행도 측정을 위하여 목적함수인 평균 납기 지연시간과 평균 대기시간, 재가공률(Rework Rate) 및 품질을 제안하는 측정하여 비교한다. 또한 품질제약 조건을 변경 시키면서 각 평가 척도들의 변화를 살펴보고 본 연구의 목적을 달성할 수 있는 최상의 품질제약 조건을 살펴본다.

#### 3.2 실험 설계

본 연구는 품질을 고려한 작업투입 방법의 효과를 검증하기 위하여 다음과 같은 실험 환경을 설정한다. 대상 공정은 10가지 종류의 작업 타입을 가지고, 단일 워크스테이션을 사용하며 워크스테이션의 기계는 10대로 구성된다. 기계들은 제품타입  $i$ 에 따라  $U[40 + 15i - 5, 40 + 15i + 5]$  형태로 서로 다른 가공시간의 분포를 가진다. 또한 준비시간은 이전 제품타입  $l$ 과 투입 제품타입  $i$ 에 따라 동일 타입인 경우는 0으로 설정하고 다를 경우 <Table 1>과 같이 인덱스  $x_{il}$ 을 부여하여 각  $x_{il}$ 값에 따라  $U[15x_{il} - 5, 15x_{il} + 5]$ 인 분포에서 서로 다른 작업 준비시간을 가지며,  $s_{lj} \neq s_{jl}$ 인 순서의존적인 준비시간으로 구성한다. 품질 분포는  $N(\mu, \sigma^2)$ 의 정규 분포이며 Cpk값에 따라 10개의 기본 분포를 기준으로 제품타입과 기계별로 서로 다른 10가지의 분포로 세분된다. 따라서 전체 품질 분포는  $10 \times 10$  매트릭스 형태로 구성된다.

본 연구의 문제는 Rework이 존재하는 상황이므로 공정관리 규격 한계를 사용한다. Rework은 제품 · 기계의 가공품질수준의 분포를 통한 가공 결과와 제품타입의 공정관리규격한계를 비교하여 결정된다. 또한 Rework을 수행할 때의 작업 이동시간과 재가공 초기화시간은 모든 제품타입에 따라 동일한 고정값을 사용한다.

본 연구는 실시간으로 발생하는 작업에 대하여 효율적인 작업투입을 수행하는가를 확인하기 위한 것이다. 따라서 정해진 작업 수 대신에 시뮬레이션 기간 동안 발생하는 작업과 완료된 작업에 대하여 평가한다. 또한 작업 발생 간격은 제품타입에는 관계없이 평균 가공시간과 평균 준비시간 및 기계대수를 고려한 구간의 분포를 사용한다. 이상의 실험 설계에서 정의한 실험조건을 요약하면 <Table 2>와 같다.

**Table 1.**  $x_{il}$  index matrix for Sequence dependent setup time

$i \backslash l$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	0	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	1	10	0	2	3	4	5	6	7	8	9
3	1	9	10	0	2	3	4	5	6	7	8
4	1	8	9	10	0	2	3	4	5	6	7
5	1	7	8	9	10	0	2	3	4	5	6
6	1	6	7	8	9	10	0	2	3	4	5
7	1	5	6	7	8	9	10	0	2	3	4
8	1	4	5	6	7	8	9	10	0	2	3
9	1	3	4	5	6	7	8	9	10	0	2
10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	0

**Table 2.** Experiment Data

Experiment data List	Data values
Simulation Time	1000000
Number of Job types	10
Number of Machine in Workstation	10
Processing time of Job types	$U[40 + 15i - 5, 40 + 15i + 5]$
Setup time of Job types	$U[15x_{il} - 5, 15x_{il} + 5]$
Interarrival distribution	$U[1, 150]$
Specification limit	$\pm 10$
Number of simulations Seed	100
Rework entering time(Moving Time + Initialization Time)	5

**Table 3.** Base Quality Distribution of each case

High Quality			Low Quality			Normal Quality		
CPK	Mean	Stdev	CPK	Mean	Stdev	CPK	Mean	Stdev
2.0	0.5	1.6	1.0	0.5	3.2	2.0	0.5	1.6
1.9	1.0	1.6	0.9	1.0	3.3	1.8	1.0	1.7
1.8	1.5	1.6	0.8	1.5	3.5	1.6	1.5	1.8
1.7	2.0	1.6	0.7	2.0	3.8	1.4	2.0	1.9
1.6	2.5	1.6	0.6	2.5	4.2	1.2	2.5	2.1
1.5	3.0	1.6	0.5	3.0	4.7	1.0	3.0	2.3
1.4	3.5	1.5	0.4	3.5	5.4	0.8	3.5	2.7
1.3	4.0	1.5	0.3	4.0	6.7	0.6	4.0	3.3
1.2	4.5	1.5	0.2	4.5	9.2	0.4	4.5	4.6
1.1	5.0	1.5	0.1	5.0	16.7	0.2	5.0	8.3

본 연구는 품질을 고려하여 작업을 투입하게 된다. 공정의 품질은 기계와 제품에 따라 경향이 다르게 나타날 수 있다. 따라서 공정의 품질을 상, 중, 하로 나누어 품질분포를 구분한 후, 품질 분포에 의해 생성될 데이터를 기반으로 대안들과의 비교평가를 수행한다. 공정의 품질이 상인 경우 공정 내에 존

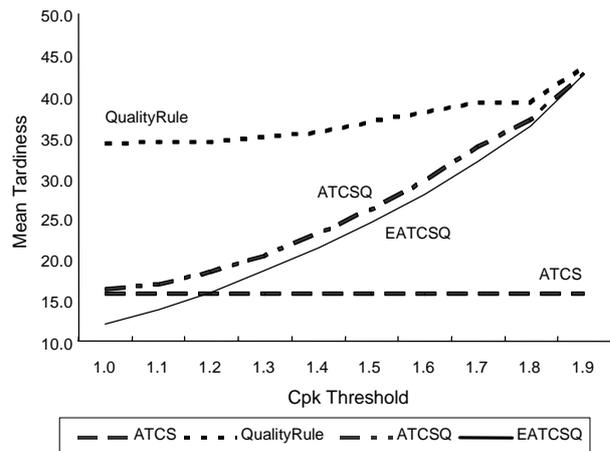
재하는 모든 기계들의 공정능력지수를 1 이상으로 설정하고, 공정의 품질이 하인 경우는 1 이하로 설정한다. 공정의 품질이 중인 경우는 상과 하의 절충된 품질을 갖는다. <Table 3>은 가공품질수준 분포에 사용될 기본 분포를 공정능력지수와 관련하여 나타내었다.

알고리즘의 성능 비교는 각 공정품질 환경에서 결정모수인 품질제약을 변화시켜 가면서 나온 결과 값 중에서 경향이 아주 다른 것들을 제외한 평균값으로 비교를 수행한다. 본 연구에서 제시한 알고리즘은 C#을 이용하여 구현하였고, 펜티엄4 3.4GHz 컴퓨터에서 실험하였다.

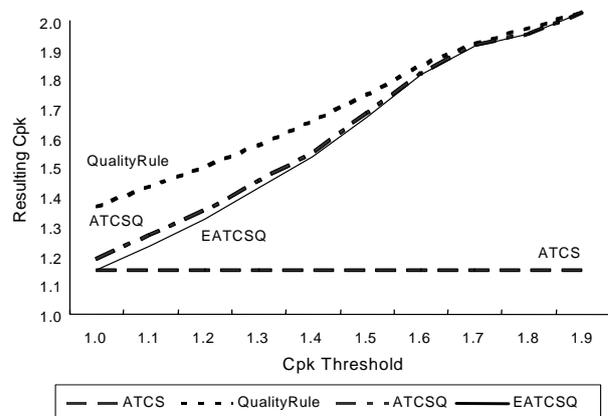
### 3.3 실험 결과 및 분석

3.2에서 제시한 실험 환경을 기반으로 본 연구에서 제안한 EATCSQ와 대안들과의 성능비교를 수행한 결과를 정리하면 다음과 같다.

<Figure 4>와 <Figure 5>는 공정내의 품질 상황이 제품에 따라 최소  $Cpk \geq 1$ 인 가공 품질을 가지는 기계들만 존재하는 높은 공정품질에 대한 실험결과이다.



**Figure 4.** Mean Tardiness for High Quality Case



**Figure 5.** Cpk for High Quality Case

<Figure 4>는 높은 공정품질 상태에서 품질제약이 증가할 때 평균 납기지연시간의 변화를 나타내고 <Figure 5>는 Cpk의 변화를 나타낸다. 공정품질을 Cpk로 평가할 때 Cpk가 1 이상이면 Rework Rate이 최대 0.1% 이하로 거의 모든 제품은 가공 후에 양품으로 판정된다. <Figure 4>와 <Figure 5>에서 ATCS방법은 품질제약이 반영되지 않으므로 일정한 품질과 일정한 평균 납기지연시간을 갖는다. 품질 우선의 Quality\_Rule은 높은 평균 납기지연시간을 가지며 품질도 높은 품질 수준을 유지한다. 또한 품질제약이 증가하면서 품질 결과도 증가하는 것을 볼 수 있다. ATCSQ는 ATCS보다는 높고 Quality\_Rule보다는 낮은 평균 납기지연시간을 가지며 품질은 ATCS보다 높고 Quality\_Rule보다 낮은 품질을 나타낸다.

본 연구에서 제한한 EATCSQ는 대안 알고리즘들에 비하여 낮은 평균 납기지연시간을 가지며 품질은 ATCSQ와 Quality\_Rule보다 낮지만 제약조건은 만족시키는 것을 알 수 있다. Rework이 거의 없는 높은 공정품질 상황에서 ATCS가 EATCSQ보다 높은 평균 납기지연을 갖는 것은, ATCS가 병렬기계 문제에서 좋은 초기해를 제시하지만 최적의 해는 아니기 때문에 해의 개선이 필요하다는 것을 보여준다. 또한 기존의 병렬기

계 문제처럼 정해진 작업의 수를 가지고 해의 탐색을 수행할 수 없으므로 1차 국부 탐색을 통해 개선된 해를 제시한 EA-TCSQ가 평균 납기지연시간에서 좋게 나타난다. 또한 Quality\_Rule은 품질 우선으로 작업을 투입하기 때문에 작업의 납기에 따라 긴급 여부를 판단하지 못하여 평균 납기지연시간이 높게 된다. ATCSQ는 작업의 긴급 여부와 품질의 중요도를 동일하게 계산하기 때문에 품질의 차이와 목표하는 납기의 긴급 여부가 혼재할 경우 본 연구의 목적에 해당하는 최적 해를 제시할 수 없게 된다. 따라서 본 연구에서 제시한 EATCSQ가 품질제약 조건과 목적을 만족하는데 좋은 대안이라고 할 수 있다.

<Figure 6>과 <Figure 7>은 공정내의 품질 상황이 제품에 따라 최대 Cpk ≤ 1인 가공 품질을 가지는 기계들이 존재하는 낮은 공정품질에 대한 실험 결과이다.

공정품질을 Cpk로 평가할 때 1이하인 공정은 Rework Rate을 계산하면 평균 10% 정도로 많은 Rework이 발생하는 공정이다. 따라서 품질을 고려하여 투입을 결정하는 것이 매우 필요한 상황이다. 품질이 고려되지 않을 경우 많은 Rework으로 인하여 평균 납기지연시간이 길어지기 때문이다. <Figure 6>에서 보면 ATCS가 가장 높은 평균 납기지연시간을 보인다. ATCS는 납기와 관련하여 좋은 초기해를 제시하지만 품질을 고려하지 않기 때문에 오히려 많은 Rework을 발생시켜 납기지연을 증가시킨다. 기존의 Lee(1997) 연구는 Rework이 없는 것을 가정하기 때문에 납기와 관련하여 좋은 초기해를 생성하였으나 품질로 인해 Rework이 존재하는 경우 ATCS는 좋은 대안이 될 수 없게 된다. 또한 작업투입에서 품질 반영에 대한 필요성을 인식하게 하는 결과를 보여준다. ATCS는 <Figure 7>에서 보듯 품질 면에서도 가장 낮은 품질 수준을 유지하고 있다. 반면 Quality\_Rule은 낮은 공정품질 환경에서는 좋은 대안이 될 수 있다. 높은 공정품질 상황에서는 납기에 대한 고려가 매우 필요한 상황이지만 낮은 공정품질 환경에서는 품질 고려를 통한 Rework 감소가 매우 필요한 상황이기 때문이다. 그러나 동일 품질을 갖는 작업들 사이에는 납기에 대한 고려도 필요하므로 ATCS보다는 낮은 평균 납기지연시간을 갖지만 ATCSQ보다는 높다.

낮은 공정품질 상황에서는 ATCSQ가 모든 품질제약 범위에서 안정적이며 고른 성능을 보인다. ATCSQ는 품질에 대한 고려와 납기에 대한 고려를 동시에 수행하므로 Rework을 줄여 납기지연을 감소시키는 역할과 동일 품질에서의 납기의 차이를 구분하여 주기 때문이다. 또한 품질은 Quality\_Rule보다 낮지만 EATCSQ와 ATCS보다는 높은 결과를 보여준다.

EATCSQ는 낮은 품질제약에서는 높은 평균 납기지연시간을 보이다가 품질제약이 증가하면서 대안들보다 낮은 평균 납기지연시간을 갖는다. EATCSQ가 낮은 품질에서 높은 평균 납기지연시간을 보이는 것은 ATCSQ로 좋은 초기해를 구했음에도 품질제약만 만족하면 빠른 완료시간의 기계를 선택하는 탐색 문제로 평균 납기지연시간이 증가하기 때문이다. 그러나 품질제약이 높아지면서 적정 Rework 수준이 되면 Rework 으

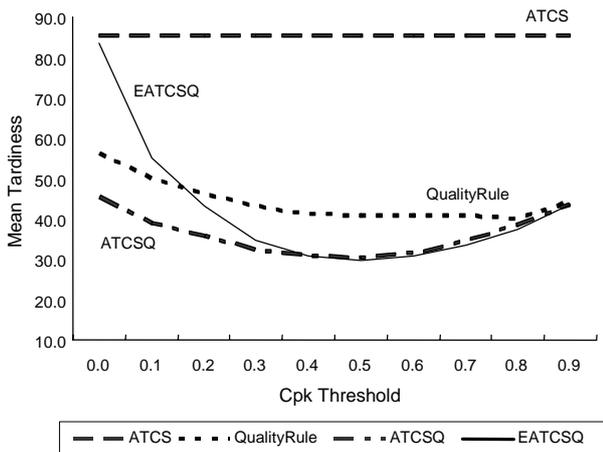


Figure 6. Mean Tardiness for Low Quality Case

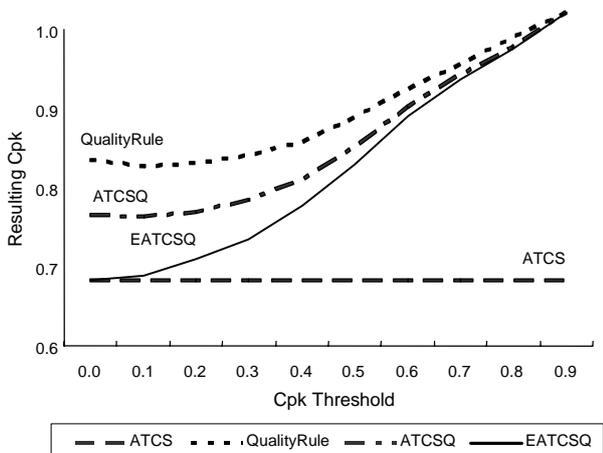


Figure 7. Cpk for Low Quality Case

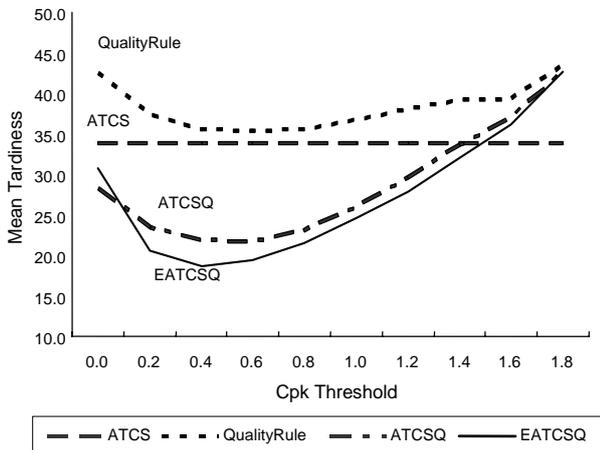


Figure 8. Mean Tardiness for Normal Quality Case

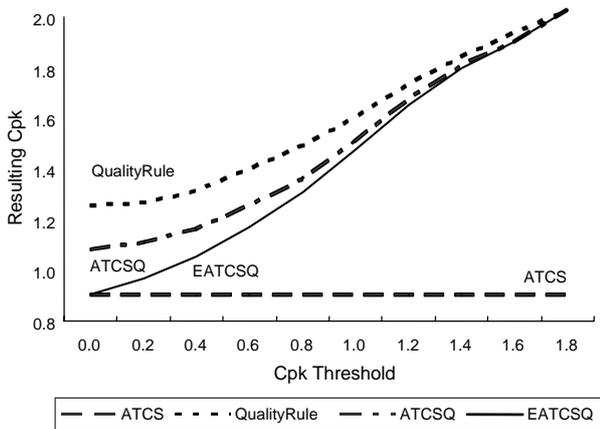


Figure 9. Cpk for Normal Quality Case

로 인한 손실이 감소하고 작업투입의 효율이 증가되어 작은 평균납기지연 시간을 가지게 된다.

따라서 낮은 공정품질 상황에서 어떠한 품질제약도 없다면 ATCSQ가 좋은 대안일 수 있다. 그러나 품질제약이 존재하고 적절한 품질임계값이 주어지면 EATCSQ가 품질제약 달성과 목적함수를 만족시키는데 좋은 대안이라고 할 수 있다.

<Figure 8>과 <Figure 9>는 공정내의 품질이 일반적인 상황으로 제품에 따라 다양한 품질을 가지는 기계들이 존재하는 일반적인 공정품질의 결과이다.

공정내의 품질 조건이 일반적인 상황으로 다양한 영역의 가공수준을 가지는 기계가 존재한다. 일반적인 공정품질의 경우 본 연구에서 제시한 품질 조건에서는 평균4.3%의 Rework이 발생한다. 따라서 납기 준수 문제를 Rework의 영향을 줄일 수 있는 넓은 품질제약 구간에서 살펴 볼 수 있다. <Figure 8>과 <Figure 9>에서 ATCS를 제외한 결과를 살펴보면 평균 납기지연시간은 초기에 조금 높다가 품질제약이 증가하면서 감소하는 모습을 보인다. 그러나 품질제약이 증가하면서 평균 납기지연시간이 증가하게 된다. 반면 품질은 제약 조건에 따라 ATCS를 제외하고 전 영역에서 조건을 만족하고 있으며 Quality\_

Rule, ATCSQ, EATCSQ의 순서로 나타난다.

일반적인 공정품질의 경우 본 연구에서 제시한 품질 조건에서는 Quality\_Rule의 평균 납기지연시간이 가장 높게 나타난다. Quality\_Rule이 높게 나타나는 것은 품질 우선을 통한 Rework 감소의 영향이 납기 위주의 투입 효율보다 감소하여 발생하는 것이다. 그 결과 <Figure 8>에서 ATCS가 Quality\_Rule보다 낮은 평균 납기지연시간으로 나타나게 된다. 그러나 다양한 가공품질수준이 존재하더라도 ATCSQ와 EATCSQ는 ATCS나 Quality\_Rule에 비해 평균 납기지연시간 면에서 좋은 결과를 보인다. 특히 EATCSQ는 매우 낮은 제약 상황이 아니면 전반적으로 가장 낮은 평균 납기지연시간을 보인다.

본 실험에서 다양한 공정 상황을 가정하여 각 대안을 살펴본 결과 높은 품질의 공정 상황에서는 EATCSQ가 본 연구의 목적인 납기지연에서 좋은 성능을 보였으며, 낮은 공정품질과 일반적인 공정품질 상황에서는 품질제약에 따라 ATCSQ와 EATCSQ가 좋은 성능을 보였다. 그러나 낮은 공정품질의 경우 품질을 고려하지 않은 ATCS도 공정 관리규격 한계에 의해 Cpk가 0.68수준을 가진다. 따라서 품질을 고려하는 대안들의 경우 품질에 대한 제약을 수행한다면 Cpk는 최소 0.68이상이어야 한다. 또한 Cpk를 0.68이상으로 설정할 경우 낮은 공정품질이라도 대안들 보다 EATCSQ가 납기와 관련하여 좋은 성능을 보인다.

본 실험에서 평균 납기지연 시간의 경우 높은 품질의 공정 상황을 제외하고 품질제약이 변함에 따라 감소하다 증가하는 모습을 보여주고 있다. 평균 납기지연시간의 변화는 품질제약에 따라 납기에 영향을 주는 여러 요인이 복합적으로 작용한 것이다. 평균 납기지연시간에 영향을 주는 요인으로 평균 대기시간과 Rework Rate는 밀접한 관련을 가진다. <Figure 10>과 <Figure 11>은 EATCSQ에 대하여 낮은 공정품질 상황과 일반적인 공정품질 상황에서 품질제약에 따른 평균 대기시간과 Rework Rate 및 평균 납기지연시간을 정규화하여 표현하였다.

<Figure 10>과 <Figure 11>에서 보듯이 평균 납기지연은 감소하다 증가하는 모습을 보인다. 평균 납기지연시간의 감소와 유사한 형태로 평균 대기시간 또한 변한다. 반면 품질제약이 증가하면 작업의 Rework Rate는 줄어드는 것을 볼 수 있다. 또한 하나의 제품타입에 대해 서로 다른 분포를 가지는 기계들이 존재할 경우 품질제약을 수행하면 제약수준에 따라 가용 기계의 수는 줄어들게 된다.

일반적으로 가용 기계의 수가 줄어들면 작업들은 투입되지 못하고 대기하게 되어 평균 대기시간은 증가하게 된다. 그러나 <Figure 10>과 <Figure 11>에서 보듯이 품질제약에 따라 평균 대기시간은 감소하다가 늘어나는 것을 볼 수 있다. <Figure 10>과 <Figure 11>에서 평균 대기시간이 감소하다가 증가하는 것은 Rework Rate의 영향이 반영된 것이다. 대기공간은 최초 투입되는 작업과 재투입되는 Rework 작업들이 모여서 대기하게 된다. 낮은 품질제약 구간에서는 Rework Rate가 높아 많은 Rework이 발생한다. 따라서 최초 발생된 작업과 많은 Rework

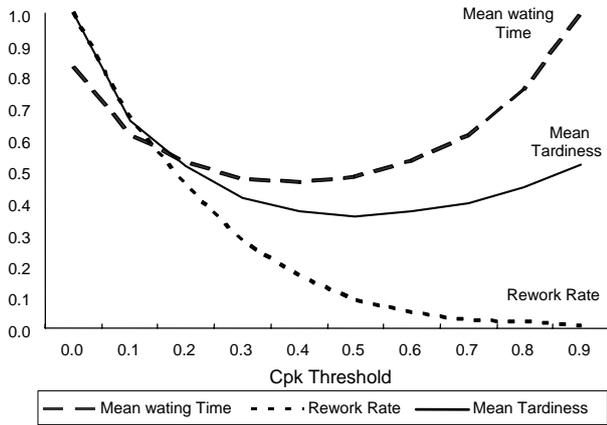


Figure 10. Variation of other criteria as quality constraint increase on EATCSQ in low quality case

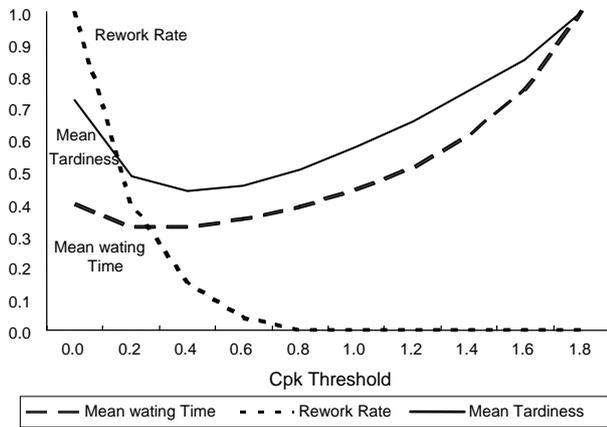


Figure 11. Variation of other criteria as quality constraint increase on EATCSQ in normal quality case

으로 인해 대기공간의 작업수가 증가하여 처리되는 작업에 비해 대기하는 작업이 늘어나 평균 대기시간이 증가하게 된다. 그러나 품질제약이 증가하면 대기공간으로 돌아오는 Rework 이 줄어들고 가용 설비의 제약에 따른 처리능력 저하보다 Rework Rate의 감소 영향이 크게 작용하여 평균 대기시간이 줄어들게 된다. 하지만 품질제약이 계속적으로 증가하면 Rework Rate의 감소 영향보다 가용 설비의 부족으로 처리능력이 감소의 영향이 커져 평균 대기시간은 증가하게 된다. 따라서 <Figure 10>과 <Figure 11>보듯이 적절한 제약을 수행하여 Rework Rate와 평균 대기시간의 변화를 조정하면 본 연구에서 목적하는 평균 납기지연시간을 최소화할 수 있다.

품질제약을 만족하며 평균 납기지연시간을 최소화하는 본 연구의 목적에 부합하여 각 공정품질 환경에서 제안하는 방법과 대안들이 갖는 최선의 결과를 <Table 4>에 표현하였다.

<Table 4>에서 보듯이 모든 공정품질 상황에서 EATCSQ가 대안들과 비교하여 품질제약을 만족하며 평균 납기지연시간이 좋은 것을 볼 수 있다. 평균 납기지연시간은 공정의 효율을 평가하며 고객에게 납기에 대한 신뢰를 줄 수 있는 지표이다.

Table 4. Best case of mean tardiness at each algorithm satisfied with quality constraint

		Mean Tardiness	CPK	Cpk Threshold
Low Quality	ATCS	85.26	0.68	0.5
	QualityRule	40.88	0.89	0.5
	<b>EATCSQ</b>	<b>29.66</b>	<b>0.83</b>	<b>0.5</b>
Normal Quality	ATCS	33.8	0.90	0.6
	QualityRule	35.4	1.40	0.6
	<b>EATCSQ</b>	<b>18.6</b>	<b>1.05</b>	<b>0.4</b>
High Quality	ATCS	15.74	1.15	1.0
	QualityRule	34.15	1.36	1.0
	<b>EATCSQ</b>	<b>12.07</b>	<b>1.15</b>	<b>1.0</b>

따라서 좋은 성능을 보이는 EATCSQ가 생산성의 향상과 고객에 대한 만족도를 높이는 효율적인 작업투입이 될 수 있다.

EATCSQ의 품질은 제약 조건을 만족하지만 품질 위주의 투입에 비해서는 조금 떨어지는 것을 볼 수 있다. 납기와 품질을 동시에 만족 시키는 것은 실험에서 보듯 평균 대기시간과 Rework Rate의 상충 관계로 인해 해결할 수 없는 문제이다. 또한 품질은 기계적 특성이 강한 영향을 미치는 반면 납기 만족은 투입 방법과 기업의 생산 정책이 영향을 크게 미치기 때문이다. 따라서 제시된 품질제약을 만족하는 것은 품질 목표의 달성을 의미하고, <Table 3>에서 보듯이 제시된 대안들과 비교하여 제안한 EATCSQ가 품질제약을 달성하며 평균 납기 지연시간이 우수함을 알 수 있다.

#### 4. 결론 및 추후 연구

본 연구는 작업의 품질을 고려하여 작업투입을 결정하는 효율적인 EATCSQ를 제안하였다.

본 연구에서 제시한 EATCSQ는 3단계 과정을 통해 품질제약을 달성하며 납기 준수가 가능하도록 한다. EATCSQ는 문제 해결을 위해 품질 차이를 표현하는 공정능력지수를 사용하여 품질인덱스를 계산하였고, 품질인덱스를 반영하여 작업 중요도를 결정하는 ATCSQ로 작업을 선택하였다. 또한 1단계 국부 탐색인 MCTS를 통해 최적의 작업투입이 가능하도록 선택된 초기해의 개선을 수행하였다.

본 연구에서는 제안한 EATCSQ를 모의 실험 통해 대안 알고리즘과 비교하였다. 실험 결과에서 본 연구에서 제안한 EATCSQ가 품질제약을 만족하며 평균 납기지연시간이 우수함을 확인하였다. 또한 품질제약 조건을 조절하여 품질과 작업 평균 납기지연시간 사이의 변화를 확인하였다. 또한 적절한 품질제

약을 수행할 때 품질과 평균 납기 지연시간이 최적의 상태를 가지는 것을 실험을 통하여 확인하였다.

그러나 일반적인 공정 환경에서 모든 경우의 품질 수준을 알 수 없으므로 최적화된 품질계약의 임계값을 구할 수 없었고 향후 이에 대한 연구가 필요하다. 또한 해의 개선을 위해 1 단계 국부탐색의 방법을 적용하였으나 실시간 작업투입에 효율적인 탐색방법에 대한 연구가 필요하다.

## 참고문헌

- Ann, Y. J. (2007), *Six Sigma and Quality Management*, Parkyoungsa, Seoul, Korea.
- Baker, K. R. and Su, Z. S. (1974), Sequencing with due-dates and early start times to minimize maximum tardiness, *Naval Research Logistics Quarterly*, **21**, 171-176.
- Everett, J. E. (2001), Iron ore production scheduling to improve product quality, *European journal of operational research*, **129**(2), 355-361.
- Flapper, S. D. P. and Teunter, R. H. (2004), Logistics planning of rework with deteriorating work-in-process, *International journal of production economics*, **88**(1), 51-59.
- Garey, M. R. and Johnson, D. S. (1979), *Computers and intractability : A guide to the theory of NP completeness*, San Francisco.
- Hayek, P. A., Salameh, M. K. (2001), Production lot sizing with the reworking of imperfect quality items produced, *Production planning & control*, **12**(6), 584-590.
- H.Teunter, Ruud, Flapper, and Simme Douwe P. (2003), Lot-sizing for a single-stage single-product production system with rework of perishable production defectives, *OR Spektrum : Organ der Deutschen Gesellschaft für Operations Research*, **25**(1), 85-96.
- Icmeli-Tukel, O. and Rom, W. O. (1997), Ensuring quality in resource constrained project scheduling, *European journal of operational research*, **103**(3), 483-496.
- Jamal, A. M. M., Sarker, B. R. and Mondal, S. (2004), Optimal manufacturing batch size with rework process at a single-stage production system, *Computers & industrial engineering*, **47**(1), 77-89.
- Juran, J. M. and Gryna, F. M. Jr. (1980), *Quality Planning and Analysis* 2nd ed, *McGraw-Hill, New York*.
- Kim, S. Y., Lee Y. H. and Agnihotri, D. (1995), A hybrid approach to sequencing jobs using heuristic rules and neural networks, *Production Planning & Control*, **6**, 445-454.
- Kim S. C. and Bobrowski, P. M. (1994), Impact on sequence-dependent setup time on job shop scheduling performance, *International Journal of Production Research*, **32**(7), 1503-1520.
- Liu, J. J., Ping, Y. (1996), Optimal lot-sizing in an imperfect production system with homogeneous reworkable jobs, *European journal of operational research*, **91**(3), 517-527.
- Lee, Y. H., Bhaskran, K. and Pinedo, M. (1997), A heuristic to minimize the total weighted tardiness with sequence-dependent setups, *IIE Transactions*, **29**, 45-52.
- Lee, Y. H. and Pinedo, M. (1997), Scheduling jobs on parallel machines with sequence-dependent setup times, *European Journal of Operations Research*, **100**, 464-474.
- Ovacik, I. M. and Uzsoy, R. (1994), Exploiting shop floor status information to schedule complex job shops, *Journal of manufacturing systems*, **13**(2), 73-84.
- Ovacik, I. M. and Uzsoy, R. (1995), Rolling Horizon Procedures for dynamic parallel machine scheduling with sequence-dependent setup times, *International Journal of Production Research*, **33**(11), 3173.
- .Pinedo M and Chao X, (1999), *Operations Scheduling with Applications in Manufacturing and Services*, *McGraw-Hill, New York*. ISBN 0-07-289779-1.
- Schutten, J. M. J. and Leussink, R. A. M. (1996), Parallel machine scheduling with release dates, due dates and family setup times, *International Journal of Production Economics*, **46**, 119-126.
- Uzsoy, R., Martin-Vega, L. A., Lee, C. Y. and Leonard, P. A. (1991), Production scheduling algorithms for a semiconductor test facility, *IIE Transaction on Scheduling and Logistics*, **4**(4), 270-280.