

# 절삭 가공에서의 불량 발생 비용을 고려한 가공속도 결정에 관한 연구

박 찬 응<sup>†</sup>

경원대학교 산업정보시스템공학과

## Determination of Machining Speed Considering Failure Cost

Chan-Woong Park<sup>†</sup>

Dept. of Industrial Information System Engineering, Kyungwon Univ.

This study presents a single machine scheduling algorithm to minimize total cost (lateness cost, earliness cost and failure cost) by controlling machining speed. Generally, production scheduling uses the information of process planning and machining speed is not changed at production scheduling. And failure cost is not considered for scheduling algorithm. Therefore, the purpose of this study is to consider the change of machining speed for efficient production scheduling. And performance criteria for algorithm considers total cost. Especially, failure cost of product by increasing machining speed is considered.

**Keywords** : Machine Scheduling, Machining Speed, Failure Cost

### 1. 서 론

오늘날의 제조산업은 자동화된 생산설비로 구성되어 컴퓨터의 통제하에 생산되고 있다. 또한 기업 솔루션들의 등장으로 제조라인에서 필요한 각종 의사결정들이 컴퓨터 프로그램에 의해 자동으로 수행되고 있다. 즉, 현재 많이 알려져 있는 ERP와 같은 프로그램에 의해 기업의 전반적 업무들이 추진되고 있다. 이는 제조라인에서도 마찬가지이다. ERP를 구성하고 있는 모듈에서 생산모듈은 제품의 공정계획 뿐만 아니라 생산계획에 대한 의사결정을 수행한다. 본 연구는 이러한 환경의 자동생산시스템에서 공정계획과 생산계획간의 연동적인 정보교환을 통해 동적인 생산일정계획을 수립하고자 한다.

주문된 제품을 생산하여 납품하기까지의 일반적 절차는 다음과 같다. 제품에 대한 주문이 고객으로부터 도착하게 되면, 제품을 제조하기 위한 공정계획을 수립

하게 되고 공정계획의 결정사항에 맞추어 생산계획을 수행하게 된다. 생산계획에 필요한 대표적인 공정계획의 의사결정 내용은 가공시간이라고 할 수 있다. 생산일정계획을 수립하기 위해서는 각 기계에서 수행되는 제품의 가공시간이 필요하기 때문이다. 주문생산체제에서는 고객의 주문이 언제 어떠한 형태로 발생할 것인지 예측이 불가능하다. 따라서 이러한 동적 주문도착에 대응하기 위해서는 생산시스템의 의사결정이 동적 모델로 구성되어져야 한다. 또한 기업입장에서는 가능한 많은 주문을 접수하려 할 것이다. 그렇게 하기 위해서는 기계의 가공속도를 증가시켜야 하나 이는 결정적으로 기계 가공비용을 증가 시키는 원인 및 불량 발생율을 높이는 원인이 되기도 한다. 기존 연구들에서는 단순히 생산일정계획의 수행도인 납기지연발생 비용과 조기생산비용만을 고려하였다. 이는 기계의 가공속도 증가에 따른 불량 발생비용을 고려하지 않았으므로 비현실적이라

논문접수일 : 2010년 11월 05일    논문수정일 : 2010년 12월 01일    게재확정일 : 2010년 12월 06일

<sup>†</sup> 교신저자 cwpark@kyungwon.ac.kr

※ 이 연구는 2010년도 경원대학교 지원에 의한 결과임.

할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기계의 가공속도 증가에 따른 제품의 불량 발생비용을 고려하고자 한다.

본 연구에서는 먼저, 기계의 가공속도 결정에 관한 기본적인 내용을 살펴보고자 한다. 시스템에 설치되어 있는 기계는 제품의 특성 및 제반 비용요소를 고려하여 가장 경제적인 가공속도로 설정되어 있다. 기계들의 경제적인 절삭가공 문제에 대한 최초의 연구는 Taylor에 의해 제시되었으며, 그는 절삭속도와 이송속도함수로 공구수명을 표현하였다[1]. 그 후에 최근까지 많은 연구들이 수행되어 왔다[7]. 그러나 지금까지의 대부분의 연구는 생산일정계획의 반영없이, 비용중심으로 시스템내에 존재하는 기계들의 최적의 절삭가공 파라미터를 결정하는 것이었다. 또한 생산일정계획의 수립시 마찬가지로 공정계획의 정보를 단순히 이용만 하였을 뿐이다[2, 5, 9]. 따라서 본 연구에서는 공정계획에서의 의사결정문제인 가공속도 결정과 생산일정계획 수립에 있어서 기본적인 납기 지연 비용과 조기생산비용 뿐만 아니라 기계가공에 따른 불량발생 비용을 고려하여 현실적인 비용문제를 반영하고자 한다. 기존 연구에서는 가공속도의 변화를 고려하지 않으므로 가공속도 증가에 따른 불량발생 비용을 고려할 필요가 없으나, 본 연구에서는 가공속도 조절을 고려하므로, 불량발생비용을 반영하여야 한다.

제 2장에서는 기계가공에 필요한 절삭가공 모델과 가공속도 증가에 따른 불량 발생을 고려한 총비용 모델을 수립하고 제 3장에서는 공정계획시스템과 생산 계획시스템의 동적 연계에 의한 해법을 소개하며 제 4장에서는 수치예제를 통해 해법의 진행 절차를 예시한다. 마지막으로 제 5장에서는 결론 및 추후 연구 과제를 언급하고자 한다.

## 2. 모델의 설정

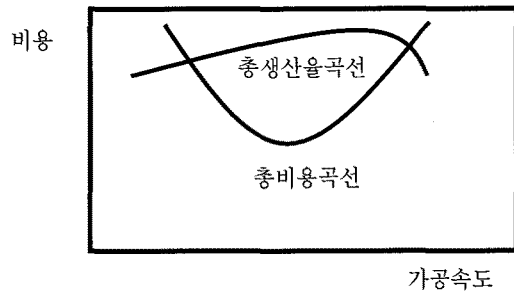
### 2.1 절삭가공 모델

본 장에서는 기계에서 절삭속도를 조절하기 위한 절삭속도 및 가공시간에 대한 기계가공 모델과 본 연구의 목적인 비용에 대한 수리모델을 설명한다.

일반적으로 공작기계의 절삭조건은 주축(공구)의 회전수와 작업대의 이송량으로 구성된다. 절삭공정에서 결정되어야 할 파라미터들은 가공될 부품들의 규격, 공정의 종류 및 사용되는 공구 등을 기초로 가공속도, 이송속도 등이 있다.

작업장에 도착하는 제품들에 대한 최적의 가공속도 및 파라미터들은 생산성 및 여러 가지 비용요소를 고려하여 결정하게 된다. 가공속도를 증가시키게 되면, 가공

시간이 감소하므로 생산성을 높일 수 있으나 공구의 마모로 인하여 공구비용이 증가하게 되고, 가공속도를 감소시키면, 가공시간이 증가하여 생산성이 감소하고 공구비용이 적게 소요된다. 또한 가공속도의 증가는 정밀도를 떨어뜨리게 되어 제품의 불량을 발생시키는 원인을 제공하기도 한다[3, 4, 8]. <그림 1>은 총비용을 제고한 적절한 가공속도의 결정에 대한 필요성을 보여주는 내용이다[6].



<그림 1> 가공속도에 따른 총비용 및 생산율

본 연구에서 고려하는 가공속도의 조절은 가공속도의 하한치(경제적 가공속도)와 능률적 최대 가공속도 사이에서만 이루어진다. 이 범위에서 증가하는 가공속도에 따른 불량 발생 비용만을 고려하고자 한다.

절삭가공에 있어서 가공속도 계산 및 가공속도 결정에 필요한 기호는 다음과 같다.

- $v_i$  : 제품 i의 가공속도
- $t(v_i)$  : 제품 i의 속도  $v_i$ 에서의 가공시간
- $s$  : 기계 가공 준비시간
- $m$  : 제품 특성에 따른 기계상수

절삭공정에서의 제품의 가공작업 수행에 필요한 가공시간은 일반적으로 식 (1)과 같이 표현된다[5].

$$t(v_i) = s + \frac{m}{v_i} \tag{1}$$

여기서 기계상수 m은 식 (2)와 같이 계산된다.

$$m = \frac{\pi dL}{1000r} \tag{2}$$

d는 작업물의 가공직경이고, L은 가공길이이며, r은 회전당 이송속도(mm/rev)를 의미한다.

가공시간에 영향을 주는 파라미터는 가공속도 및 이송속도로 본 연구에서는 이송속도를 상수로 가정한다. 따라서 기계의 가공시간이 주어질 경우 이에 해당하는 가공속도를 결정할 수 있다.

$$v_i = \frac{t(v_i) + s}{m} \quad (3)$$

### 2.2 총 비용 모델

기계가공 시 발생하는 불량율에 대한 모형의 연구는 미미한 실정이다. 불량 발생율은 기계의 가공속도와 원자재의 재질과 제품의 정밀도 규격 등에 의해 결정된다. 아직 이에 대한 구체적인 연구결과는 없는 것으로 생각되며, 이에 대한 추후 연구가 절실히 필요하다.

본 연구에서의 불량 발생비용의 반영은 경제적 가공속도와 최대 가공속도(능률적 가공속도)의 범위에서 가공속도의 증가를 반영하는 비례상수를 사용하고자 한다. 그러나 실제 문제 있어서는 공구의 재질, 재료의 재질과 제품의 정밀도 규격을 반영하여야 할 것이다. 그러나 이 문제는 본 연구에서는 다루기 힘든 부분으로 추후 연구과제로 남겨놓고자 한다. 그러므로 본 연구에서는 단순화된 형태로 불량 발생 함수를 다음 수식으로 표현하고자 한다. 즉, 불량 발생 비율은 가공속도에 비례한다고 가정하면, 제품 i의 불량 발생 비율은 식 (4)와 같이 수립할 수 있다. 식 (4)에 불량비용을 곱한 값으로 불량발생비용을 표현하고자 한다.

$$\text{불량발생비율} : X_i = \frac{v_i^* - v_{\min}}{v_{\max} - v_{\min}} \quad (4)$$

- $X_i$  : 제품 i의 불량 발생 비율
- $v_i^*$  : 제품 i의 결정된 가공속도
- $v_{\min}$  : 최소가공속도(경제적 가공속도)
- $v_{\max}$  : 최대 가공속도

본 연구의 목적은 불량 발생비용을 반영한다는 데 그 의의가 있으므로 본 연구에서는 가공속도 증가에 따른 일정의 비율에 의해 불량률을 제고하고 이를 통해 불량 발생비용을 반영하고자 한다. 본 연구에서는 주문에 대한 납기 지연 비용, 조기생산 비용 뿐만 아니라 기계가공속도의 증가 시 발생하는 제품 불량발생 비용을 반영하는 것을 목적으로 하고 있으므로 다음과 같은 목적식을 갖고 있다고 할 수 있다.

$$\text{Min} \sum_i (CT(C_i - D_i) + CE(D_i - C_i) + Q_i X_i) \quad (5)$$

- $CT$  : 단위 시간당 납기지연비용
- $CE$  : 단위 시간당 조기생산 비용
- $Q_i$  : 제품 i의 불량발생 비용
- $C_i$  : 제품 i의 가공완료시간
- $D_i$  : 제품 i의 납기
- $T_i$  : 제품 i의 납기지연시간

### 3. 해법의 개발

본 연구에서 고려하는 생산시스템은 한 대의 기계에서 단일 공정을 수행함으로써 가공이 완료되는 단일가공에 의한 주문생산시스템으로, 생산일정계획의 수행도는 총 비용이며, 총비용에는 납기지연 비용, 조기생산 비용과 불량발생 비용을 고려한다.

본 연구에서의 알고리즘은 다음과 같다. 먼저 EDD(Earliest Due Date)규칙[3]에 의해 생산일정계획을 수립하고 각 제품에 대한 납기지연시간, 조기생산시간 및 총비용을 계산한다. 생산일정계획의 목록에서 최초로 납기지연이 발생된 제품에 대해 납기지연시간을 제거할 수 있는 가공시간을 산출한다. 산출된 가공시간을 달성할 수 있는 가공속도를 식 (3)에 의해 결정하고, 결정된 가공속도와 가공속도영역을 비교하여 영역내에 존재하게 되면 다시 일정계획을 수립하고, 그렇지 않으면, 생산일정계획 목록에서 납기지연이 발생한 바로 전 제품의 가공시간을 단축하여 납기지연을 제거하게 된다. 그 다음 가공속도 조절 이후의 총비용을 계산한다.

<해법의 단계>

- (단계 1) : EDD규칙으로 일정계획을 수립
- (단계 2) : 제품의 완료시간 및 납기지연시간을 산출하고 일정계획 목록에서 최초로 납기지연된 제품 i를 선정
- (단계 3) : 제품 i의 가공시간을 수정

$$t(v_i)^* = t(v_i) - T_i$$

- (단계 4) : 제품 i의 가공속도 산출

$$v_i^* = \frac{m}{t(v_i)^* - s}$$

만일,  $v_{\min} \leq v_i^* \leq v_{\max}$  이면, 제품 i의 가공속도를  $v_i^*$ 로 갱신하고 (단계 8)로 간다. 그렇지 않으면, (단계 5)로 간다.

- (단계 5) : 가공속도를 최대가공속도로 갱신하고 가공

시간을 수정

$$v_i^* = v_{\max}$$

$$t(v_i^*) = s + \frac{m}{v_i^*}$$

(단계 6) : 제품 i의 가공완료시간과 납기지연시간을 수정

$$C_i^* = C_i - (t(v_i) - t(v_i^*))$$

$$T_i^* = C_i^* - D_i$$

(단계 7) : 일정계획 목록의 순서에서 제품 i의 이전 순서에 할당된 제품 i-1의 가공속도 수정을 위해  $i=i-1$ 로 갱신하고 (단계 3)으로 간다.

(단계 8) : 갱신된 가공속도 및 가공시간으로 생산일정계획 목록의 각 제품들의 가공시작시간, 가공완료시간을 수정한다.

(단계 9) : 납기지연 비용, 조기생산 비용과 불량발생 비용을 계산하여 총비용을 계산한다. 만일 총비용이 이전 계획의 총비용보다 작으면 종료하고 그렇지 않으면, (단계 10)으로 간다.

$$\text{Min} \sum_i (CT(C_i - D_i) + CE(D_i - C_i) + Q_i X_i)$$

(단계 10) : 정해진 단위에 따라 가공속도를 감소시킨다.

$$v_i^* = v_m$$

$$t(v_i^*) = s + \frac{m}{v_i^*}, \text{ (단계 6)으로 간다.}$$

### 4. 수치예제

본 장에서는 불량발생비용을 고려한 가공속도 조절에 의한 생산일정계획 수립 및 가공속도 결정 알고리즘의 각 절차를 수치예제를 통하여 보여준다. 수치예제의 간편성을 도모하기 위하여 필요한 기본적인 가정은 다음과 같다.

- 1) 시스템은 다수의 작업을 가공할 수 있는 1대의 NC기계로 구성된다.
- 2) 각 제품의 가공은 단일 공정으로 이루어져 있다.
- 3) 제품의 운반시간은 고려하지 않는다.
- 4) 생산일정계획의 최초 가공시작시간은 0으로 한다.
- 5) 가공비용은 고려하지 않는다.
- 6) 기계의 최소 가공속도 및 최대 가공속도는 제품별로 모두 동일한 것으로 가정 한다
- 7) 제품의 불량 발생 비용은 동일한 것으로 가정한다.

최소(경제적) 가공속도  $v_{\min}$  : 100m/min

최대 가공속도  $v_{\max}$  : 120m/min

$s$  : 1.0min

$r$  : 0.251mm/rev

주문 완료된 제품의 가공정보 및 비용자료는 기존 연구의 것을 사용하며, 다음과 같다. 지연비용, 조기비용 및 불량비용은 제품에 의존적이므로 임의의 값 또는 동일한 값으로 처리하였다.

<표 1> 제품의 가공정보와 납기  $t(v_i)$

부 품	P1	P2	P3	P4	P5	P6
d(mm)	200	100	150	100	250	300
L(mm)	300	300	350	300	300	350
(min)	8.51	4.76	7.57	4.76	10.39	14.14
m	751.97	375.49	657.11	375.49	938.72	1314.21
납기(D)	10	24	21	15	47	39
지연비용	10	10	10	15	5	10
조기비용	8	10	5	8	10	8
불량비용	5	5	5	5	5	5

이상과 같은 자료와 가정사항으로 본 연구에서 제시한 해법의 절차는 아래와 같다.

(단계 1) EDD규칙에 의한 생산일정계획

제품순서	P1	P4	P3	P2	P6	P5
index (i)	1	2	3	4	5	6

(단계 2) 납기지연 제품 선정

제 품	P1	P4	P3	P2	P6	P5
흐름시간	8.51	13.27	20.84	25.60	39.74	50.13
납기지연시간	-	-	-	1.60	0.74	3.13

$$T_4 = C_4 - D_4 = 25.6 - 24 = 1.60$$

(단계 3)

$$t(v_4)^* = t(v_4) - T_4 = 4.76 - 1.60 = 3.16$$

(단계 4)

$$v_4^* = \frac{m}{t(v_4)^* - s} = \frac{357.49}{120} = 165.50, \quad v_4^* \geq v_{\max} \text{ (단계 5)}$$

로 간다.

$$\text{(단계 5)} \quad v_4^* = v_{\max} = 120$$

$$t(v_4^*) = s + \frac{m}{v_4^*} = 1.0 + \frac{357.49}{120} = 3.98$$

(단계 6)  $C_4^* = C_4 - (t(v_4) - t(v_4^*))$   
 $= 25.60 - (4.7 - 3.98) = 24.82$   
 $T_4^* = C_4^* - D_4 = 24.82 - 24 = 0.82$

(단계 7)  $i = i - 1 = 4 - 1 = 3$   
 $T_3 = T_4^* = 0.82$  (단계 3)으로 간다.

(단계 3)  $t(v_3)^* = t(v_3) - T_3 = 7.57 - 0.82 = 6.75$

(단계 4)  $v_3^* = \frac{m}{t(v_3)^* - s} = \frac{657.11}{6.75 - 1} = 114.28$

$v_{\min} \leq v_3^* \leq v_{\max}$  이므로 가공속도를  $v_3^*$ 로 갱신하고 (단계 8)로 간다.

(단계 8) 일정계획의 재작성

제 품	P1	P4	P3	P2	P6	P5
가공속도	100	100	114.28	120	100	100
가공시간	8.51	4.76	6.75	3.98	14.14	10.39

(단계 2) 납기지연시간의 산출

제 품	P1	P4	P3	P2	P6	P5
가공완료시간	8.51	13.27	20.02	24.00	38.14	48.53
납기지연시간	-	-	-	-	-	1.53

$T_5 = C_5 - D_5 = 48.53 - 47 = 1.53$

(단계 3)  $t(v_5)^* = t(v_5) - T_5$   
 $= 10.39 - 1.53 = 8.86$

(단계 4)  $v_5^* = \frac{m}{t(v_5)^* - s}$   
 $= \frac{938.72}{8.86 - 1.0} = 119.43$

$v_{\min} \leq v_5^* \leq v_{\max}$  이므로 가공속도를  $v_5^*$ 로 갱신하고 (단계 8)로 간다.

(단계 8) <표 2>와 같이 생산일정계획을 수립한다.

<표 2> 최종 공정계획 및 일정계획

제 품	P1	P4	P3	P2	P6	P5
가공속도	100.00	100.00	114.28	120.00	100.00	119.43
가공시간	8.51	4.76	6.75	3.98	14.14	8.86
가공시작시간	0.00	8.51	13.27	20.02	24.00	38.14
가공완료시간	8.51	13.27	20.02	24.00	38.14	47.00
납 기	10	15	21	24	39	47
납기지연시간	-	-	-	-	-	-
불량발생 비용			3.57	5		4.85

(단계 9) 총비용을 계산한다.

가공속도 조절 이전의 총비용 = 65.61

가공속도 조절 이후의 납기지연 및 조기생산 비용 = 37.74

가공속도조절 이후의 불량발생 비용 = 8.57

가공속도 조절 이후의 총비용 = 37.74 + 13.42 = 51.16

총비용이 감소하였으므로 종료한다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 제품의 공정계획에서의 의사결정 문제인 기계의 가공속도 증가에 따른 불량발생 비용을 생산 일정계획 수립에 반영하였다. 또한 기계의 가공속도 조절이라는 공정계획상의 의사결정을 생산계획과 함께 연동함으로써 주문생산체제에서의 주문 투입일정계획의 효율성을 제고하였다.

즉, 본 연구에서는 자동생산시스템에서 공정계획 모듈과 생산계획 모듈간의 연동적인 시스템을 구성함으로써 효율적인 생산계획 및 공정계획을 수립하고자 하였으며, 그 수행평가 기준으로 납기지연 비용, 조기생산 비용 및 불량 발생비용을 고려하였다. 불량발생비용은 기계의 가공속도 증가에 따라 발생하는 비용으로 본 연구에서는 가공속도에 비례하는 것으로 가정하여 고려하였다.

추후 연구과제로는 가공속도 증가에 따른 불량 발생비용의 구체적인 수리적 모형이나 실험에 의한 현실적 모형의 설정이 필요할 것으로 예상된다.

## 참고문헌

- [1] 김동향, 기계공작법, 청문각, 1994.
- [2] 오세호, 이근부, 양희중, “동적도착의 총 납기지연 초최소화 문제”, 산업경영시스템학회지, 제28권, 제1호, 2005.
- [3] 손덕수, 이안호, 이정길, 이우영; “고속가공 시스템의 정밀도 평가방법에 관한 연구”, 한국공작기계학회 2004년도 춘계학술대회논문집, Apr. 01 : 335-340, 2004.
- [4] 송호봉, 김태호, 김수용, 한민식, 전언찬; “Influence of Surface Roughness as Cutting Condition on Cutting Processing using Micro-End mill”, “한국정밀공학회 2009년도 춘계학술대회논문집, June 03 : 97-98, 2009.
- [5] Baker, K. R.; Introduction To Sequencing and Scheduling, John Wiley and Sons, Inc., 1974.
- [6] Hitomi, P. E.; “Analysis of optimal machining speeds for automatic manufacturing,” Int. J. Prod. Res. 27(12) : 1685-1691, 1989.

- [7] Koulamas, C. and Iakovou, E.; "Machining economics with interference considerations," *Int. J. of Prod. Res.*, 33(1) : 71-78, 1995.
- [8] Lin, S. Y., Cheng, S. H., and Chang, C. K.; "Construction of a surface roughness prediction model for high speed machining," *Journal of mechanical science and technology*, 21(10) : 1622-1629, 2007.
- [9] Rodelicks, L. M., D. T. Phillips, and G. L. Hogg; "A comparison of order release strategies in production control systems," *Int. J. of Prod. Res.*, 30 : 611-626, 1992.