

# 단일공정에서의 가공속도 조절에 의한 생산일정계획 (An Algorithm for Single Machine Scheduling Using The Control of Machining Speed)

박 찬 응\*

## Abstract

This study presents an single machine scheduling algorithm minimize lateness of product by controlling machining speed. Generally, production scheduling uses the information of process planning. But the production scheduling algorithm has not considered the control of machining speed in its pcedures. Therefore, the purpose of this study is to consider the machining speed in production scheduling algorithm for efficient production scheduling.

Machining time and machining cost required to manufacture a piece of a product are expressed as a unimodal convex function with respect to machining speed, so it has minimal point at minimum time speed or the minimum cost speed. Therefore, because of considering the machining cost, the control of machining speed for the algorithm is executed between minimum speed and maximum speed. An example is demonstrated to explain the algorithm.

---

\* 경원전문대학 공업경영과

## 1. 서 론

현대 기업의 생산환경은 수요자에 대한 만족과 생산성 향상이라는 커다란 질충과제에 직면하고 있으며, 이외에도 제품의 다양화, 제품 수명주기의 단축화, 제품의 고품질화 등으로 인해 많은 어려움에 처해 있다. 따라서 기업들은 생산시스템의 변화를 통해 이를 해결하여 경쟁력을 향상시키는데 노력을 경주하고 있다. 이러한 차원에서 볼 때, 생산시스템의 자동화 및 정보화에 의한 정보의 공유화로 의사결정을 수행함으로써 시스템의 수행도를 향상시키는 문제가 많이 대두되고 있다.

생산시스템의 중요한 의사결정은 크게 공정계획 수립과 생산일정계획 수립이라고 할 수 있다. 일반적으로, 생산일정계획의 수립은 주어진 공정계획을 바탕으로 여러 가지 방법에 의해 수행되고 있다. 공정계획에서 기본적으로 수행되는 의사결정문제들은 가공방법, 가공순서, 가공기계, 가공공구 등과 이를 기초로 한 가공속도 및 가공시간등의 결정문제로 분류할 수 있다. 이러한 공정계획은 수요자가 요구한 제품의 품질 및 가격에 따라 결정되며, 이와 더불어 제품 및 공정의 특성상 공정계획 수립자에 의해 결정되어지는 문제와 그렇지 못한 문제로 분류할 수 있다.

본 연구에서는 공정계획의 의사결정 문제 중에서 계획수립자에 의해 임의적인 변경이 가능한 가공속도를 생산일정계획 수립에 이용함으로써 생산일정계획의 수행도를 향상시키는데 목적이 있다. 즉, 공정계획과 생산일정계획 정보를 동시에 이용, 결정함으로써 시스템의 수행도를 향상시키고자 한다.

본 연구에서의 대상 생산시스템은 단일기계에 의

한 단일공정 시스템으로, 생산일정계획의 수행도는 납기를 고려한다. 즉, 주어진 생산일정계획 수립방법에 따라 생산일정계획을 수립하고 납기의 만족여부를 결정하여, 납기 지연 제품이 발생하게 되면, 납기 지연을 제거 또는 최소화할 수 있는 기계의 가공속도를 결정하게 된다. 결정된 가공속도와 가공시간을 이용하여 생산일정계획을 수정함으로써 납기 지연을 최소화 할 수 있는 생산일정계획을 수립할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 먼저, 기계의 가공속도 결정에 관한 기본적 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]. Gilbert[2]는 최대생산율과 최소생산비용이라는 두 가지 기준을 사용하여 절삭가공 공정의 최적화에 대한 이론적 분석을 처음으로 제시하였다. 그후에 최근까지 많은 연구들이 수행되어 왔다[3][4][5]. 그러나 지금까지의 대부분의 연구는 생산일정계획의 반영 없이, 비용중심으로 시스템 내에 존재하는 기계들의 최적의 절삭가공 파라미터를 결정하는 것이었다. 또한 생산일정계획의 수립시 마찬가지로 공정계획의 정보를 단순히 이용만 하였을 뿐이다. 따라서 본 연구에서는 공정계획에서의 의사결정문제인 가공속도 결정과 생산일정계획 수립을 연계함으로써 시스템의 효율성을 제고하고자 한다.

본 연구에서 제시하는 가공속도 조절을 이용한 생산일정계획의 수립은 자동화, 정보화에 의한 생산시스템 의사결정의 추세에 비추어 볼 때, 매우 효율적으로 적용되고 기대효과도 클 것으로 예상된다.

## 2. 절삭가공모델

일반적으로 절삭가공(machining)은 공구를 이용하여 공작물을 원하는 형태로 가공하는 것으로 공구를 고정하고 소재를 회전시켜 가공하는 방법, 소재를 고정하고 공구를 회전시켜 가공하는 방법으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 후자의 방법으로 소재를 가공하는 공작기계를 고려한다. 일반적으로 공작기계의 절삭조건은 주축의 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 비용요소(기계비용, 공구비용, 간접비용)를 고려하여 결정하게 된다. 가공속도를 증가시키게 되면, 가공시간이 감소하므로 생산성을 높일 수 있으나 공구의 마모로 인하여 공구비용이 증가하게 되고, 가공속도를 감소시키면, 가공시간이 증가하여 생산성이 감소하고 공구비용이 적게 소요된다. 따라서 생산성과 가공비용을 적절한 수준으로 유지시키는 가공속도의 결정이 필요하다. 기계의 가공속도 및 절삭공정의 파라미터의 선택을 위해 사용되어 지는 기준은 일반적으로 다음과 같다[3].

(1) 최소생산시간기준(minimum production time) : 가장 빠른 시간 비율로 단위당 공작물을 생산한다.

(2) 최소비용기준(minimum production cost) : 최소비용으로 단위당 공작물을 생산한다.

(3) 최소이익률기준(minimum profit rate) : 단위 시간당 발생하는 이익을 최대화한다.

기준(1)의 관점에서 볼 때, 제품 1개마다의 제작시

간을 최소로 하는 최대 생산성 가공속도를 능률적 가공속도( $v_p$ )라고 한다. 마찬가지로 기준(2)의 관점에서, 제품 1개마다의 가공 총 비용을 최소로 하는 가공속도를 경제적 가공속도( $v_e$ )라고 한다. 그림 1은 가공속도와 가공시간 및 가공비용과의 관계를 나타낸다[6]. 본 연구에서 고려하는 가공속도의 조절은 가공속도의 하한치( $v_L$ )와 능률적 가공속도 사이에서만 이루어진다. 이는 가공비용을 고려하여야 하기 때문이다.

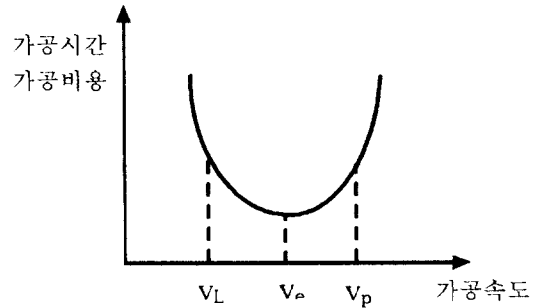


그림 1. 가공속도의 조절영역

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

$v_L$  : 기계의 최저 가공속도

$v_p$  : 기계의 최대 가공속도

$a$  : 기계 가공 준비시간

$b$  : 제품의 특성에 따른 기계상수

절삭공정에서의 제품의 가공작업 수행에 필요한 가공시간은 일반적으로 식(1)과 같이 표현된다[3].

$$t(v_i) = a + \frac{b}{v_i} \quad (1)$$

여기서 기계상수  $b$ 는 식(2)와 같이 계산된다.

$$b = \frac{\pi dL}{1000s} \quad (2)$$

$d$ 는 작업물의 가공직경이고,  $L$ 은 가공길이이며,  $s$ 는 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.

$$v_i = \frac{t(v_i) + a}{b} \quad (3)$$

### 3. 알고리즘의 개발

본 연구에서 고려하는 생산시스템은 한 대의 기계에서 단일 공정을 수행함으로써 가공이 완료되는 단일가공에 의한 생산시스템으로, 생산일정계획의 수행도는 납기지연시간이다.

본 연구에서 고려하는 공정계획에서의 의사결정문제는 가공속도 및 가공시간으로 이는 고객이 주문한 제품의 특성에 따라 결정되어진다. 따라서 초기에는 경제적 가공속도를 모든 제품들의 가공속도로 결정

하고 이에 따라 가공시간을 결정한다. 결정된 가공시간을 이용하여 생산일정계획을 수립한다. 본 연구에서는 납기지연시간의 최소화를 수행도로 하므로 단일공정에서 납기지연시간을 최소화하는 일정계획 규칙으로 EDD(Earliest Due Date)규칙을 사용한다.

본 연구에서의 알고리즘은 다음과 같다. 먼저 EDD규칙에 의해 생산일정계획을 수립하고 각 제품에 대한 납기지연시간을 계산한다. 생산일정계획의 목록에서 최초로 납기지연이 발생한 제품에 대해 납기지연시간을 제거할 수 있는 가공시간을 산출한다. 산출된 가공시간을 달성할 수 있는 가공속도를 식(3)에 의해 결정하고, 결정된 가공속도와 가공속도영역을 비교하여 영역 내에 존재하게 되면 다시 일정계획을 수립하고, 그렇지 않으면, 생산일정계획 목록에서 납기지연이 발생한 바로 전 제품의 가공시간을 단축하여 납기지연을 제거하게 된다. 이와 같은 과정을 납기지연이 발생한 모든 제품에 대해 수립한다. 그림 2는 공정계획 시스템과 생산일정계획 시스템간의 정보의 흐름을 나타낸다. 본 연구에서 제시하는 알고리즘은 그림 2에서와 같이 정보의 교류를 통해 양 시스템간의 의사결정이 수행된다.

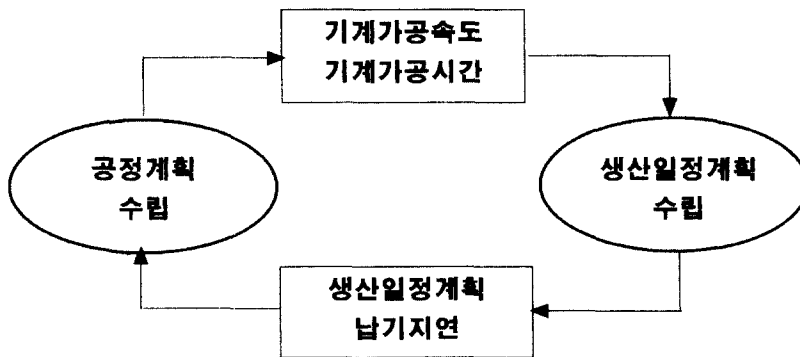


그림 2. 공정계획과 생산일정계획의 정보교환

본 연구에서 제시하는 알고리즘에 필요한 기호는 다음과 같다.

$B_i$  : 제품  $i$ 의 가공시작시간

$C_i$  : 제품  $i$ 의 가공완료시간

$D_i$  : 제품  $i$ 의 납기

$T_i$  : 제품  $i$ 의 납기 지연시간

<알고리즘 절차>

(단계 1) EDD규칙에 의해 생산일정계획을 수립한다.

(단계 2) 제품의 완료시간 및 납기 지연시간을 산출하고 생산일정계획목록에서 최초로 납기 지연된 제품  $i$ 를 선정한다.

$$T_i = C_i - D_i$$

(단계 3) 제품  $i$ 의 가공시간을 수정한다.

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

(단계 4) 제품  $i$ 의 가공속도 산출

$$v_i^* = \frac{b}{t(v_i)^* - a}$$

만일,  $v_L \leq v_i^* \leq v_p$ 이면, 제품  $i$ 의 가공속도를  $v_i^*$ 로 갱신하고 (단계 8)로 간다. 그렇지 않으면, (단계 5)로 간다.

(단계 5) 가공속도를 최대가공속도로 갱신하고 가공시간을 수정한다.

$$v_i^* = v_p$$

$$t(v_i^*) = a + \frac{b}{v_i^*}$$

(단계 6) 제품  $i$ 의 가공완료시간과 납기 지연시간을 수정한다.

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

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

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

(단계 8) 갱신된 가공속도 및 가공시간으로 생산일정계획 목록의 각 제품들의 가공시작시간, 가공완료시간을 수정한다. 만일, 납기 지연 제품이 더 이상 없으면 종료하고 그렇지 않으면, (단계 2)로 간다.

## 4. 수치예제

본 장에서는 가공속도 조절에 의한 생산일정계획 수립 알고리즘의 각 절차를 수치예제를 통하여 보여 준다. 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.

$$v_e : 100 \text{ m/min} \quad v_L : 80 \text{ m/min}$$

$$v_p : 120 \text{ m/min}$$

$$a : 1.0 \text{ min} \quad s : 0.251 \text{ mm/rev}$$

주문 완료된 제품의 가공정보 및 납기는 표 1과 같다.

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

표 1. 제품의 가공정보와 납기

부 품	P1	P2	P3	P4	P5	P6
d(mm)	200	100	150	100	250	300
L(mm)	300	300	350	300	300	350
$t(v_i)$ (min)	8.51	4.76	7.57	4.76	10.39	14.14
기계상수(b)	751.97	375.49	657.11	375.49	938.72	1314.21
납기(D)	10	24	21	15	47	39

(단계1) EDD규칙에 의한 생산일정계획

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

(단계2)

제 품	P1	P4	P3	P2	P6	P5
흐 름 시 간	8.51	13.27	20.84	25.60	39.74	50.13
납기지 연시간	-	-	-	1.60	0.74	3.13

$$T_4 = C_4 - D_4 = 25.6 - 23 = 1.60$$

(단계3)

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

(단계4)

$$v_4^* = \frac{b}{t(v_4)^* - a} = \frac{375.49}{2.16} = 173.84$$

$$v_4^* \geq v_p \text{ (단계 5)로 간다.}$$

(단계5)  $v_4^* = v_p = 120$

$$t(v_4^*) = a + \frac{b}{v_4^*} = 1.0 + \frac{375.49}{120} = 4.13$$

(단계6)

$$C_4^* = C_4 - (t(v_4) - t(v_4^*)) \\ = 25.60 - (4.76 - 4.13) = 24.97$$

$$T_4^* = C_4^* - D_4 = 24.97 - 24 = 0.97$$

(단계 7)  $i = i - 1 = 4 - 1 = 3$

$$T_3 = T_4^* = 0.97 \quad \text{(단계 3)으로 간다.}$$

(단계3)

$$t(v_3)^* = t(v_3) - T_3 = 7.57 - 0.97 = 6.60$$

(단계4)

$$v_3^* = \frac{b}{t(v_3)^* - a} = \frac{657.11}{6.60 - 1} = 117.34$$

$$v_L \leq v_3^* \leq v_p \text{ 이므로 가공속도를}$$

$v_3^*$ 로 갱신하고 (단계 8)로 간다.

(단계8) 일정계획의 제작성

제품	P1	P4	P3	P2	P6	P5
가공 속도	100	100	117.34	120	100	100
가공 시간	8.51	4.76	6.60	4.13	14.14	10.39

표 2. 최종가공속도 및 생산일정계획

제 품	P1	P4	P3	P2	P6	P5
가공속도	100.00	100.00	117.34	120.00	100.00	119.43
가공시간	8.51	4.76	6.60	4.13	14.14	8.86
가공시작시간	0.00	8.51	13.27	19.87	24.00	38.14
가공완료시간	8.51	13.27	19.87	24.00	38.14	47.00
납 기	10	15	21	24	39	47
납기지연시간	-	-	-	-	-	-

(단계2) 납기지연시간의 산출

제 품	P1	P4	P3	P2	P6	P5
가공완 료시간	8.51	13.27	19.87	24.00	38.14	48.53
납기지 연시간	-	-	-	-	-	1.53

$$T_6 = C_6 - D_6 = 48.53 - 47 = 1.53$$

(단계3)

$$t(v_6)^* = t(v_6) - T_6 = 10.39 - 1.53 = 8.86$$

(단계4)

$$v_6^* = \frac{b}{t(v_6)^* - a} = \frac{938.72}{8.86 - 1.0} = 119.43$$

$v_L \leq v_6^* \leq v_p$  이므로 가공속도를  $v_6^*$ 로 갱신하고 (단계 8)로 간다.

(단계8) 더 이상의 납기지연 제품이 없으므로 종료한다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 제품의 공정계획에서의 의사결정 문제인 작업의 가공속도 및 가공시간을 생산일정계획

의 수립과 함께 고려함으로써 시스템의 수행도인 납기를 최소화할 수 있는 해법을 제시하였다.

일반적으로 생산일정계획의 수립은 공정계획의 의사결정이 끝난 후 공정계획 정보를 이용하여 수행하여 왔다. 그러나 이러한 계획 수립 절차에 의하면, 공정계획 정보와 생산일정계획 정보와의 일방적인 흐름으로 각 계획의 의사결정 수립에 서로의 정보를 반영하지 못하게 된다. 공정계획의 의사결정문제중 하나인 기계의 가공속도의 증가 및 감소는 가공시간과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 또한 비용과도 관계를 가지고 있다. 이는 최소비용의 경제적인 가공속도가 존재함을 의미한다. 이러한 관계들로 인해 수용할 수 없는 가공속도가 존재한다. 따라서 본 연구에서의 가공속도의 조절은 가공속도의 하한치와 능률적 가공속도 사이의 영역에서만 수행함으로써 비용 및 시간에 대한 요소를 고려하였다.

본 연구에서는 생산일정계획의 결과를 토대로 공정계획의 의사결정 문제인 가공속도를 조절함으로써 기존의 생산일정계획 수립 방법으로 해결할 수 없는 납기지연문제를 최소화할 수 있으며, 수치예제를 통하여 해법의 구체적인 절차를 소개하였다. 본 연구에서 제시한 가공속도 조절에 의한 생산일정계획 수

립은 생산시스템의 자동화, 정보화의 추세에 비추어 볼 때, 생산시스템의 통합에 매우 큰 기여를 할 것으로 생각된다.

추후 연구과제로는 가공속도를 평균화함으로써 최소의 비용으로 납기를 최소화할 수 있는 연구가 필요할 것으로 예상된다.

7. K. R. Baker, *Introduction To Sequencing and Scheduling*, John Wiley & Sons, Inc., 1974.

## 참 고 문 헌

1. T. C. Chang and R. A. Wysk, *Process Optimization : An Introduction to Automated Process Planning Systems*, Prentice Hall Inc., 1985.
2. W. W. Gilbert, "Economics of Machining," *Machining Theory and Practice, American Society of Metals*, pp.465-485, 1950.
3. P. E. Hitomi, "Analysis of Optimal Machining Speeds for Automatic Manufacturing," *Int. J. Prod. Res.*, Vol.27, No.12, pp.1685-1691, 1989.
4. K. Okusima, and P. E. Hitomi, "A Study of Economic Machining : An Analysis of The Maximum-Profit Cutting Speed," *Int. J. Prod. Res.*, Vol.3, pp.73-78, 1964.
5. S. M. Wu and D. S. Ermer, "Maximum Profit As The Criterion in The Determination of The Optimum Cutting Conditions," *J. Eng. for Ind., Trans. Asme*, Nov., pp.435-442, 1966.
6. Machinability Data Center, *Machining Data Handbook*, Vol.II, 3rd Ed., Institute of Advanced Manufacturing Sciences, Inc., 1980.