

## 자동생산체제의 작업장운영문제에서 부품의 납기를 고려한 가공속도 결정

-The Shop Floor Control Problem in Automated Manufacturing Systems : Determination of Machining Speed with Due Date of Parts-

노 인 규\*

Ro, In Kyu

박 찬웅\*\*

Park, Chan Woong

### Abstract

The breakdown of machines lead to the lateness of parts and the change of schedules. Its treatment is very important problem in the shop floor control system. In this study, we present an algorithm minimize the lateness, earliness and change of schedule by controlling machining speed of available machines.

Production time and production cost required to manufacture a piece of product are usually expressed as a unimodal convex function with respect to machining speed, and each has its minimal point at the minimum time speed or the minimum cost speed, and a speed range between these two speeds is called 'efficiency speed range'. Therefore, the algorithm determines the machining speed in the efficiency speed range. An example is demonstrated to explain the algorithm.

### 1. 서론

현대기업의 생산환경은 제품의 고품질화, 제품의 다양화, 짧아지는 제품수명주기, 격심한 경쟁력등의 상호작용으로 더욱 복잡해지고 있다. 이러한 생산환경과 더불어 생산자중심의 시장환경은 수요자중심의 시장환경으로 전환되고 있다. 따라서 기업의 경쟁력을 확보하기 위해서는 변화하는 생산환경에 적용할 수 있는 생산시스템이 절실히 요구되며, 수요자에게 신뢰성을 제공할 수 있는 운영체제가 필요하다. 자동생산시스템은 이러한 기업의 생산환경에 부응하기 위해 등장하였다.

자동생산시스템의 운영문제는 크게 생산계획문제(Production Planning)와 작업장운영문제(Shop Floor Control)로 구분할 수 있다. 작업장운영시스템(Shop Floor Control System)은 작업장에서 발생하는 제반문제를 관리하는 시스템으로 부품의 가공, 운반, 저장등의 문제를 주어진 수

\* 한양대학교 산업공학과 교수

\*\* 한양대학교 산업공학과 박사과정

행도를 향상시키기 위하여 시스템을 효율적으로 관리하는 기능을 수행한다. 특히 작업장에서 발생하는 문제중에서 기계의 고장과 같은 시스템 중단상태가 발생하였을 경우에는, 현재 가공 중이던 부품의 처리문제, 부품들의 생산일정계획의 변동문제, 기계의 수리문제와 같은 문제를 야기시킨다. 이러한 문제중에서 가장 중요한 것은 생산일정계획의 변동문제이다. 즉 생산 일정계획을 다시 수립하여야 하며, 이러한 일정계획의 변동은 부품들에 대한 납기지연과 같은 많은 문제를 초래하게 된다. 따라서 생산일정계획을 재수립할 경우에는 시스템의 수행도를 충분히 고려한 효율적인 의사결정이 이루어져야 한다. 그러나 생산일정계획을 효율적으로 재수립한다고 할 지라도 일정계획의 수정만으로는 납기지연의 문제를 해결하지 못하는 경우가 빈번히 발생한다. 따라서, 본 연구에서는 기계의 고장이 발생하였을 경우, 생산일정계획을 재수립한 후의 납기지연문제에 대해서 사용한 기계들의 가공속도를 조절하여 부품의 납기지연을 절감하는 해법을 제시하고자 한다.

시스템에 설치되어 있는 기계들은 부품의 특성 및 제반비용요소를 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 주어진 부품들의 일정계획하에서 비용중심으로 시스템내에 존재하는 기계들의 최적의 절삭가공 파라메터를 결정하는 것이었다. 본 연구에서는 작업장 운영시스템에서 기계의 고장이 발생할 경우, 재일정계획수립 이후에 발생하는 부품들의 납기지연을 최소화할 수 있도록 기계의 가공속도를 결정하고자 한다.

## 2. 절삭가공모델

본 연구에서 고려하는 시스템은 절삭가공을 수행하는 4대의 NC기계와 운반수단으로는 무인운반차 1대가 설치된 시스템이다.

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 파라메터들은 가공될 부품들의 규격, 공정의 종류 및 사용되는 공구등을 기초로 가공속도, 이송속도등이 있다.

작업장에 도착하는 부품들에 대한 최적의 가공속도 및 파라메터들은 생산성 및 여러가지 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 파라메터의 선택을 위해 사용되어지는 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) 최대이익률기준(maximum profit rate) : 단위시간당 발생하는 이익을 최대화한다.

기준(1)의 관점에서 볼 때, 제품 1개마다의 제작시간을 최소로 하는 최대 생산성 가공속도를 능률적 가공속도( $v_f$ )라고 한다. 마찬가지로 기준(2)의 관점에서, 제품 1개마다의 가공 총 비

용을 최소로 하는 가공속도를 경제적 가공속도( $v_e$ )라고 한다. 그럼 1은 경제적 가공속도와 능률적 가공속도사이의 고효율영역(efficiency speed range)을 나타낸다. 따라서 본 연구에서의 가공속도의 조절은 고효율영에서만 이루어진다[6].

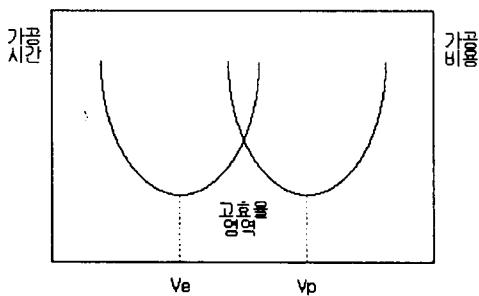


그림 1. 가공속도의 고효율영역

절삭가공에 있어서 가공속도계산 및 가공속도 결정해법에 필요한 기호는 다음과 같다.

$t(v_i)$  : 부품  $i$ 의 정상가공시간

$v_i$  : 부품  $i$ 의 가공속도

$v_L$  : 기계의 최저 가공속도

$v_U$  : 기계의 최대 가공속도

$a$  : 준비시간

$b$  : 기계상수

$TR$  : 예상수리시간

$TL_j$  : 기계  $j$ 에서의 납기지연시간

$DMT_j$  : 기계  $j$ 의 단축가공시간

$DD$  : 납기

$C_j$  : 기계  $j$ 의 작업완료시간

절삭공정에서의 부품의 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.

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

$D$ 는 작업물의 가공직경이고,  $L$ 은 가공길이이며,  $s$ 는 회전당 이송속도(mm/rev)를 의미한다.

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

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

기계의 고장이 발생하였을 경우, 가용한 기계들의 가공속도를 조절하므로써 부품들의 납기지

연을 절감하는 데 목적이 있으므로 가용한 기계들의 가공속도를 적절한 수준으로 유지하여야 한다. 가공속도를 최대한으로 증가시키게 되면, 조기생산 및 가공비용이 증가하게 되고, 가공속도를 너무 낮은 수준으로 결정하게 되면, 납기지연등의 문제가 발생한다. 따라서, 단축하여야 할 가공시간이 결정되면 식(3)에 의해 고효율영역내에서 효율적인 가공속도를 결정할 수 있다.

### 3. 알고리듬의 개발

기계의 고장이 발생하면, 일정계획모듈은 재일정계획을 수립한다. 재일정계획의 수립은 부품을 기계에 할당하는 부품할당규칙으로 수행되며, 본 연구에서는 부품들의 총처리시간(makespan)을 최소화하는 LPT(Latest Processing Time)할당규칙을 사용한다[7]. 재일정계획에 따라 부품들이 기계에 할당되면, 이때 발생하는 각 기계에서의 납기지연시간을 산출할 수 있다. 일정계획모듈에서 산출된 납기지연시간은 각 기계에서 단축시켜야 할 시간이 되며, 이를 기초로 하여 각 기계모듈은 납기를 만족시킬수 있도록 각 부품에 대한 가공속도를 결정하게 된다. 그림 2는 가공속도 결정에 대한 절차를 나타낸다.

알고리듬의 절차는 크게 두 절차로 구분된다. 첫 절차에서는 기계고장이 발생하였을 때, 일정계획모듈에서 재일정계획을 수립하고 납기지연시간을 산출하는 절차이며, 두 번째 절차는 각 기계모듈에서 납기단축에 필요한 가공속도를 결정한다.

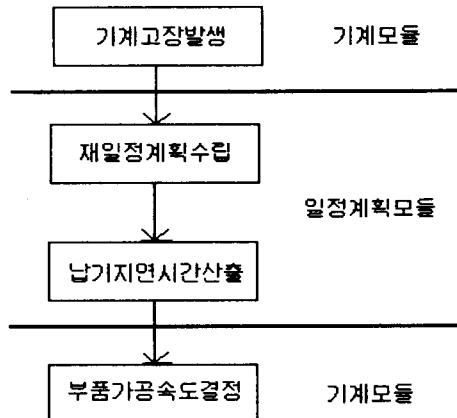


그림 2. 알고리듬의 전개 절차

<알고리듬>

(절차 1) 일정계획모듈에서의 재일정계획 수립

(단계 1) 작업이 완료되지 않은 부품에 대해 LPT 규칙으로 부품을 각 기계에 할당  
고장발생기계에는 예상수리시간 이후부터 부품을 할당

(단계 2) 재일정계획에 대한 각 기계에서의 납기지연시간 산출

$$TL_j = |DD - C_j|$$

(절차 2) 각 기계모듈에서의 가공속도의 결정

(단계 1) 부품 i의 가공시간 수정

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

만일  $t(v_i)^* > 0$  이면, (단계 2)로 간다.

그렇지 않으면 (단계 3)으로 간다.

(단계 2) 부품 i의 가공속도 산출

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

만일,  $v_L \leq v_i^* \leq v_U$  이면, (단계 5)로 간다.

그렇지 않으면, (단계 3)으로 간다.

(단계 3) 가공속도를 최대가공속도로 쟁신하고 가공시간을 수정

$$v_i^* = v_U$$

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

(단계 4) 단축가공시간의 계산

$$DMT_i = t(v)_i - t(v_i^*)^*$$

만일  $DMT_i \geq TL_i$  이면, (단계 5)로 간다.

그렇지 않으면,  $TL_i = TL_j - DMT_i$ ,

$i = i+1$ , (단계 1)로 간다.

(단계 5) 결정된 가공속도로 부품 i의 가공이 완료되면 다음 부품들의 가공속도는 정상속도를 유지한다.

#### 4. 수치예제

본 장에서는 가공속도 결정 알고리듬의 각 절차를 수치예제를 통하여 보여준다. 수치예제의 간편성을 도모하기 위하여 필요한 기본적인 가정은 다음과 같다

- 1) 시스템은 모든 작업을 처리할 수 있는 4대의 NC기계로 구성된다.
- 2) 각 부품의 가공은 단일 공정으로 이루어져 있다.
- 3) 부품의 운반시간은 고려하지 않는다.
- 4) 기계고장시점에서의 기계들은 모두 가용하다.
- 5) 계획기간동안에 발생하는 기계고장은 한번만 발생한다.
- 6) 부품들의 납기는 모두 동일하다.

기계의 고장은 기계 1에서 발생하며, 고장기계의 예상수리시간은 20분이며, 부품들의 납기는 기계고장이 발생한 시점에서 30분이다. 또한 가공속도 산출에 필요한 자료들을 다음과 같이 가정한다.

$$v_e : 100 \text{ m/min} \quad v_L : 80 \text{ m/min} \quad v_U : 120 \text{ m/min}$$

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

표 1은 기계 1의 고장이 발생하였을 때 작업이 완료되지 않은 부품들의 정보를 나타낸다. 이상과 같은 자료와 가정사항으로 본 연구에서 제시한 가공속도 결정알고리듬의 절차는 아래와 같다.

표 1. 부품의 가공정보

부 품	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
D(mm)	200	250	150	150	300	100	250	300	250	300
L(mm)	300	400	350	350	350	300	300	350	300	400
$t(v_i)$ (min)	8.5	13.5	7.5	7.5	14.1	4.8	10.4	14.1	10.4	16.0

## (절차 1) 재일정계획 모듈

## (단계 1) 재일정계획의 수립

작업이 완료되지 않은 부품들과 예상수리시간을 고려하여 LPT 규칙으로 부품들을 각 기계에 할당하면 그림 3과 같이 재일정계획을 수립할 수 있다.

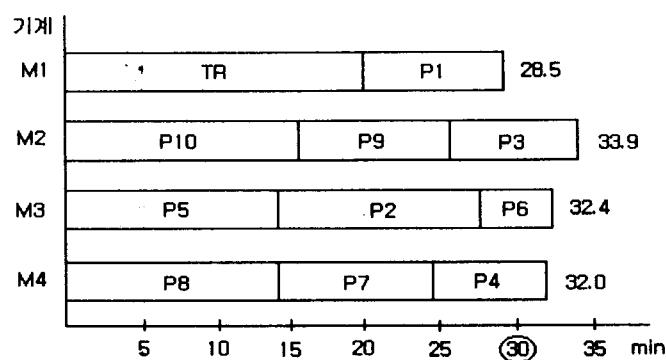


그림 3. 재일정계획수립의 결과

(단계 2) 재일정계획에서 납기를 초과하여 가공하는 기계는 M2, M3, M4이며 각각의 납기 지연시간은 3.9, 2.4, 2.0 분이므로 단축하여야 할 가공시간은 다음과 같다.

$$TL_2 = 3.9 \quad TL_3 = 2.4 \quad TL_4 = 2.0$$

## (절차 2) 기계 M2에서의 가공속도 결정

$$(단계 1) t(v_{10})^* = t(v_{10}) - TL_2 = 16.0 - 3.9 = 12.1 \text{ (min)}$$

$t(v_{10})^* > TL_2$  이므로 (단계 2)로 간다.

$$(단계 2) v_{10}^* = \frac{1.502.0}{12.1 - 1.0} = 135.3 \text{ (m/min)}$$

$v_{10}^* > v_U$  이므로 (단계 3)으로 간다.

$$(단계 3) v_{10}^* = v_U = 120 \text{ (m/min)}$$

$$t(v_{10}^*)^* = 1.0 + \frac{1.502.0}{120.0} = 13.5 \text{ (min)}$$

$$(단계 4) DMT_{10} = t(v_{10}) - t(v_{10}^*)^* = 16.0 - 13.5 = 2.5 \text{ (min)}$$

$DMT_{10} < TL_2$  이므로,

$$TL_2 = TL_2 - DMT_{10} = 3.9 - 2.5 = 1.4 \text{ (min)}$$

다음 가공부품 P9의 가공속도 결정을 위해 (단계 1)로 간다.

$$(단계 1) t(v_9)^* = t(v_9) - TL_2 = 10.4 - 1.4 = 9.0 \text{ (min)}$$

$t(v_9)^* > TL_2$  이므로 (단계 2)로 간다.

$$(단계 2) v_9^* = \frac{938.7}{9.0 - 1} = 117.3 \text{ (m/min)}$$

$v_L < v_9^* < v_U$  이므로 (단계 5)로 간다.

(단계 5) 다음 가공할 부품 P6의 가공속도는 정상속도를 유지한다.

- 기계 M2 모듈에서의 수치예제의 결과

납기지연시간 : 0.0 (min)  
 조기생산시간 : 0.0 (min)  
 부품 P10의 가공속도 : 120.0 (m/min)  
 부품 P9의 가공속도 : 117.3 (m/min)  
 부품 P6의 가공속도 : 100.0 (m/min)

## 5. 결론

본 연구에서는 기계고장이 발생할 경우 야기되는 제반 문제 특히, 납기지연과 일정계획의 변동 및 조기생산을 최소화할 수 있는 기계의 가공속도를 결정하는 해법을 제시하였다.

기계의 고장은 작업장의 생산용량을 감소시키므로써 계획된 부품의 납기지연을 유발한다. 또한 이는 장래의 생산계획에 변동을 초래한다. 따라서 납기지연을 절감시키기 위해서 재일정계획을 수립하여야 한다. 그러나 재일정계획의 수립으로는 납기지연에 효과적으로 대처할 수 없다. 본 연구에서의 해법은 재일정계획을 수립한 이후의 납기지연에 대해 가용한 기계들의 가공속도를 증가시키므로써 부품의 가공시간을 단축시키면서 납기지연을 최소화할 수 있다.

기계의 가공속도의 증가 및 감소는 비용과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 가공속도는 비용과 콘벡스 함수관계에 있다. 이는 최소비용의 경제적인 가공속도가 존재함을 의미한다. 또한 최대의 생산율을 달성할 수 있는 최대가공속도가 존재한다. 두 가공속도 사이를 고효율영역이라하며, 본 연구에서는 이 가공속도의 영역내에서 가공속도를 결정하므로써 최대가공속도를 유지할 경우 발생되는 조기생산을 방지할 수 있는 해법을 제시하였으며, 수치예제를 통하여 가공속도 조절에 의한 납기지연 방지의 구체적인 절차를 소개하였다.

추후 연구과제로는 가공속도를 평준화하므로써 최소의 비용으로 납기를 만족시킬 수 있는 가공속도결정에 관한 연구가 필요할 것으로 예상된다.

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