

NC 블록 분포를 이용한 자유곡면의 가공시간 예측

허은영^{1*}, 박선영¹, 김보현², 김동원¹

¹전북대학교 산업정보시스템공학과/ ²한국생산기술연구원

Machining time estimation of sculptured surfaces using NC block distributions

Heo, Eun Young¹, Park, Seon-Young¹, Kim, Bo Hyun², Kim, Dong Won¹

¹Dept. of Industrial Information System Engineering, Chonbuk University, Chonju, 561-756

²Korea Institute of Industrial Technology, Chonan, 330-825

Abstract

The estimation of NC machining time is of significance since it provides shop floor engineers with information for the determination of the productivity of the floor as well as process schedules. The NC machining time commonly depends on NC programs since they have various important information such as tool positions, feed rates, and other miscellaneous functions. Thus, nominal NC machining time can be easily acquired based on the programs. Actual machining time, however, cannot be simply obtained because of the dynamic characteristics of a NC machine controller such as acceleration and deceleration. Hence, this study presents a NC machine time estimation model for sculptured surfaces, considering the dynamic characteristics. The estimation model uses the distribution of NC blocks according to a factor influencing the machining time. Finally, machining time is estimated by a statistical machining time estimation model representing the relationship between the block distribution and the machining time. The parameters in the model are searched out by a genetic algorithm.

1. 서론

금형제작 공정의 일정계획은 작업 순서와 납기를 준수하는 해를 찾는 과정이라 할 수 있고, 작업간 상충되지 않는 장비 사용계획과 작업순서가 주요 결정 사항이라 할 수 있다. 작업관리자는 현재 진행되고 있는 작업진도와 일정계획을 조화시켜야 하므로 작업장의 실제 진도를 일정계획에 반영해야 하지만 수정 및 재작업과 같은 돌발 상황과 금형제작 공정의 복잡성으로 인하여 현실적인 일정계획을 수립하기가 매우 어렵다. 무엇보다도 각 작업의 종료시간을 알아야 하며 실제 가공시간을 정확히 예측할 수 있는 모델이 필수적이라 할 수 있다.

일반적으로 금형제작 현장에서는 NC 가공의 예측 시간으로 명목 가공시간 (nominal machining time)을 사용하고 있다. NC 프로그램은 명목 가공시

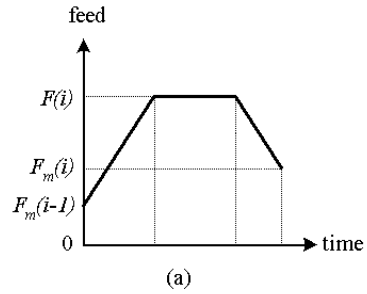
간을 계산할 수 있는 공구의 위치 및 이송속도에 대한 정보를 포함하고 있는 바, 이 정보를 이용하여 쉽게 명목 가공시간을 구할 수 있다(Maropoulos *et al* 2000). 그러나 실제 가공시간은 NC 제어기의 가·감속효과와 같은 기계적인 특성을 고려해야 하므로 NC 프로그램에 의해 쉽게 구할 수 없다. 특히, 자유곡면 가공과 같이 수많은 짧은 NC 블록들로 구성된 NC 프로그램을 가공할 때 가공시간의 예측은 더욱 어려워진다(Heo *et al* 2003).

최근 들어 가·감속을 고려한 실제 가공시간의 예측에 관한 연구가 소개되었다(Erkorkmaz (2001); Heo (2003); Kim (2002); Montreal(2003); Yan (1999)). Erkorkmaz(2001)는 고속가공을 위하여 부드러운 이송속도 궤적을 구할 수 있는 5차 스플라인 보간법을 제시하였지만, 모델이 복잡해서 실제 절삭시간을 예측하는데 사용하기에는 적합하지 않은 부분도 있다. Yan *et al.*(1999)은 가·감속 구간에서 이송속도를 잘 표현할 수 있는 단순한 선형 및 지수함수 이송속도 변화 모델을 제시하였다. Montreal(2003)은 모든 NC 블록의 시작과 끝에서 공구는 정지한다는 가정하에 가·감속 구간에서의 선형적인 이송속도 모델을 사용하여 순환적인 공구경로(cyclic tool path)의 가공시간을 예측하는 방법을 제시하였다. Heo *et al.*(2003)은 가·감속과 NC 블록의 길이에 따라서 4가지 타입으로 구분하고, 최소경유이송속도를 이용하여 가공시간을 예측하였다. 그러나 정확한 최소경유이송속도를 측정하기 위한 장비나 도구의 부재로 인하여 실제 가공시간과 오차를 수반하였다. 따라서 본 연구에서는 부정확한 최소경유이송속도로 인하여 발생하는 가공시간 예측 오차를 NC 블록 분포를 이용하여 보완하도록 한다. 예측모델 수립을 위하여 실제 가공시간과 모델식과의 관계는 ASA (Accelerated Simulated Annealing)를 사용한다.

2. 분석적 방법에 의한 절삭시간 예측모델

가공시간에 영향을 미치는 인자로는 NC 블록 길이, 블록 사이각, 절삭이송속도(Feedrate), 가·감속 상수 등이 있다. NC 블록길이가 긴 경우에는 가공시간은 블록 길이에 의해 주로 결정되어진다. 그러나 블록 길이가 짧은 경우에는 절삭이송 속도와

블록 사이각, 블록 길이가 가공시간의 주요 결정 요인이 된다. 따라서 절삭이송 속도와 블록 사이각에 따른 최소경유이송속도(minimum feedrate) 측정이 가공시간 측정의 주요변수라 할 수 있다. Heo et al(2003)은 정다각형을 이용하여 일정회수 반복하여 최소경유이송속도를 측정하였고, NC블록길이, 이송 속도 및 사이각에 따라 그림1과 같이 이송속도 변화를 네 가지로 분류하였다.



CASE 1. 모든 구간이 존재 하는 경우: 블록 내에 가속구간, 등속구간 및 감속구간이 모두 존재하는 경우로(그림 1(a)) 절삭시간 t_i 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$t_i = \frac{2F(i) - F_m(i-1) - F_m(i)}{a} + \left\{ \frac{d_i}{F(i)} + \frac{2F^2(i) - [F_m^2(i-1) + F_m^2(i)]}{2aF} \right\} \quad (1)$$

CASE 2. 가속구간과 감속구간 만 존재하는 경우: 블록은 가속구간과 감속구간만으로 구성된 경우로(그림 1(b)), 이송속도가 증가하다가 명목 이송속도에 도달하기 전에 감속하기 시작한다. 이 경우 블록의 가공시간은 다음과 같이 계산된다.

$$t_i = \frac{2F_M(i) - F_m(i-1) - F_m(i)}{a} \quad (2)$$

여기서, $F_M(i) = \{ad_i + 0.5[F_m^2(i-1) + F_m^2(i)]\}^{1/2}$

CASE 3. 가속구간 만 존재하는 경우: 그림 1(c)와 같이 가속구간만 존재하는 경우로서 현재 블록의 최소 이송속도가 전 블록의 최소 이송속도보다 매우 클 때 나타난다. 이 경우 이송속도가 계속 증가하더라도 예측 모델에 의해 계산된 최소 이송속도에는 도달할 수 없기 때문에, 최소 이송속도는 증가될 수 있는 최대 이송속도 $F_M(i)$ 로 대체되며 가공시간은 다음과 같이 계산된다.

$$t_i = \frac{F_M(i) - F_m(i-1)}{a} \quad (3)$$

여기서, $F_M(i) = [F_m^2(i-1) + 2ad_i]^{1/2}$

CASE 4. 감속구간만 존재하는 경우: 그림 1(d)와 같이 감속구간만 존재하는 경우로서 현재 블록의 최소 이송속도가 전 블록의 최소 이송속도보다 매우 작을 때 나타난다. 이 경우 이송속도가 계속 감소하더라도 예측 모델에 의해 계산된 최소 이송속도까지 떨어질 수 없기 때문에, 최소 이송속도는 가장 낮은 이송속도 $F_M^*(i)$ 로 대체되며 가공시간은 다음과 같이 계산된다.

$$t_i = \frac{F_m(i-1) - F_M^*(i)}{a} \quad (4)$$

여기서, $F_M^*(i) = [F_m^2(i-1) - 2ad_i]^{1/2}$

분석적 절삭시간 예측모델에서는 정확한 최소 경유이송속도를 전제로 하고 있다. 그러나 예측의 정확도를 제고하기 위해서는 NC 제어기의 최소경유 이송속도를 정확히 측정할 수 있는 측정 장비의 개

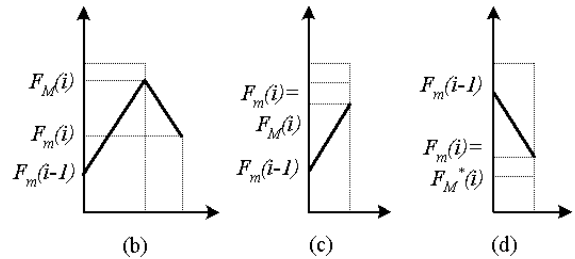


그림 1. 블록길이에 의한 Feedrate 변화

발이 요구된다. 또한, 일반적으로 NC code는 긴 블록과 짧은 블록이 혼용되어 있어, 가공시간 예측이 어려워지게 된다.

따라서 본 연구에서는 가공시간 예측의 정확도를 높이기 위해서 부정확한 최소경유이송속도를 보완하기 위해 NC 블록분포를 이용한다.

그림 1에서 (a)와 (b), (c), (d)의 구분은 주어진 이송속도에 대한 블록길이의 차이를 나타낸다. 그림 1(a)와 같이 블록길이가 충분히 긴 경우 가속의 효과는 무시할 수 있다. 따라서 식 (1)은 다음과 같이 근사시킬 수 있다.

$$t_i \cong \frac{d_i}{F} \quad (5)$$

속도 0에서 주어진 이송속도 F까지 도달거리를 d' 라 하면 d' 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d' = \frac{F^2}{2A}, \quad (A = \text{가} \cdot \text{감속 상수}) \quad (6)$$

따라서 $d^* < d'$ 를 만족하며 예측가공시간의 오차를 최소로 하는 d^* 가 존재하며, 그림 1(a)와 그림 1(b), (c), (d)와의 구분은 최적블록길이 d^* 를 이용하여 구분할 수 있다. d^* 를 크게 하는 경우 실제가공시간 (Actual machining time)보다 짧은 시간을 예측하고 d^* 를 적게 하는 경우에는 실제 가공시간보다 긴 시간을 예측하게 된다.

3. 최적블록길이 d^* 의 계산

최적블록길이 d^* 를 가공예측시간의 오차를 최소로 하는 블록길이라 할 때, 다음과 같은 절차에 의해 구할 수 있다.

단계 1. 식 (6)에 의해 d' 를 구한다.

단계 2. d' 를 10개의 구간으로 나누고 NC 프로그램의 구간별 블록 수를 구한다(그림 2).

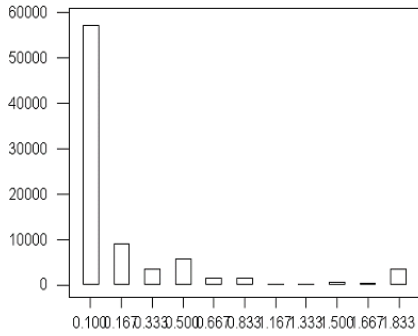


그림 2. NC-data의 블록분포

단계 3. 각 구간별로 정규화된 블록 수를 x_i ($i=0, 2, \dots, 9$)라 할 때, 짧은 블록을 정의하는 d_T 를 변화시켜 식 (7)을 만족하는 d^* 를 찾는다.

$$\min Z = \sum_{i=1}^n (T_{A,i} - f(d_{T,i}))^2 \quad (7)$$

여기서

n = NC-Data 수(실제 가공시간을 측정한 sample NC-data 개수)

$T_{A,i}$ = NC-Data i 의 실제 가공시간,

단, NC-Data들의 이송속도는 동일하다.

$f(d_{T,i})$ = i 번째 NC 데이터의 짧은블록 정의를 $d_{T,i}$ 로 했을 때의 가공 예측시간

$d_{T,i}$ = i 번째 NC-data에의 짧은블록을 정의하는 블록 길이

$$= \sum_{j=0}^9 \lambda_j \times x_{i,j} \times d_j \times 10$$

d_j = j 번째 블록 구간의 대표값

$$x_{i,j} = \frac{i \text{번째 NC데이터의 } j \text{번째 블록의 개수}}{i \text{번째 NC데이터의 전체블록개수}}$$

λ_j = 결정변수, $0 \leq \lambda_j \leq 1, j=0, 1, 2, \dots, 9$

단계 4. 최적블록길이 d^* 를 출력한다.

4. ASA를 이용한 λ_i 의 발견

본 연구에서는 휴리스틱 방법을 이용하여 λ_i 를 발견하고자 한다. ASA(accelerated simulated annealing)는 SA의 기본형태를 유지하여 수렴성에 관한 이론적인 조건을 되도록 위반하지 않으면서, 최적에 가까운 해로의 수렴시간을 단축해 준다. 사용자가 미리 설정해 주어야 하는 파라미터의 수를 되도록 줄여 주어 알고리즘의 간편성을 유지한다는 목표를 가지고 몇 가지 변형을 시도한다(김여근 등(1997)).

λ_i 를 구하기 위해 아래와 같이 ASA를 설계하였고, 가공시간을 계산할 수 있는 알고리즘을 제안한다.(그림 3)

4.1. 목적함수

목적함수는 NC 프로그램의 실제 가공시간과 예

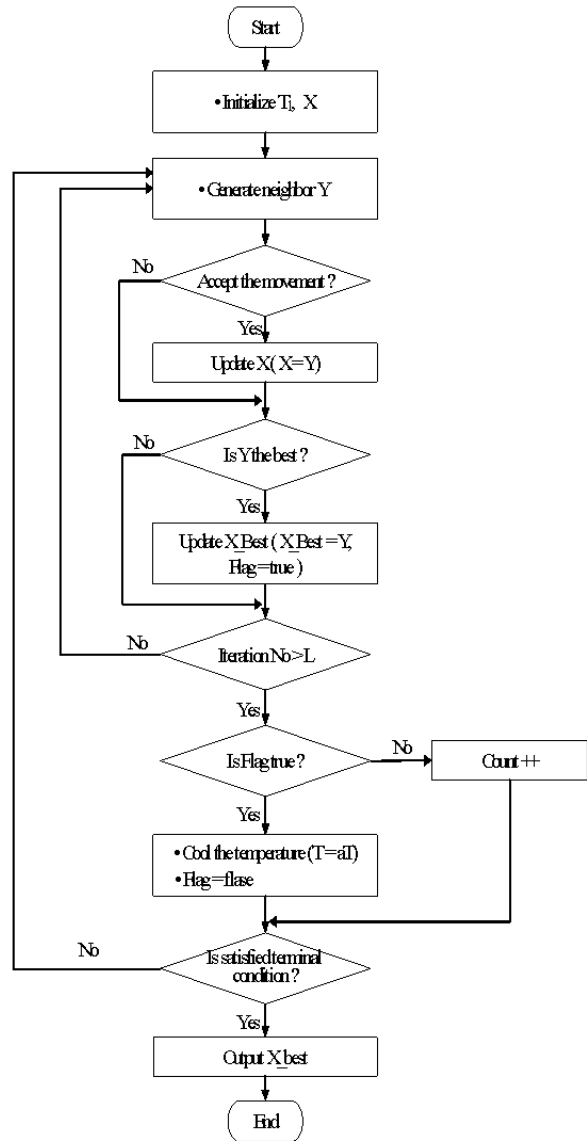


그림 3. ASA 알고리즘 흐름도

측 가공시간의 오차를 제공한 값을 합한 최소 자승법을 사용한다(식 (7)).

4.2. 초기해 및 초기온도

초기해는 식 (8)을 이용하여 구한다. 이 때 λ_i 의 합은 1이 되도록 정규화 한다. 초기온도, $T_1 = 100$ 을 사용한다.

$$\lambda_i = d' / 10 \quad (8)$$

$$\text{단, } \sum_{i=0}^9 \lambda_i = 1, \quad i = 0, 1, 2, \dots, 9$$

4.3. 냉각계획

온도 냉각은 식 (9)와 같이 비선형 방법을 사용하고, $\alpha = 0.95$ 를 만족하도록 한다.

$$T_i = T_{i-1} \times \alpha, \quad (\text{단, } \alpha = 0.95) \quad (9)$$

4.4. 이웃해 생성

주어진 문제는 연속된 실수 공간상의 해집합을 탐색해야 됨으로, 이웃해는 현재 해에 적절한 변화를 줌으로써 생성할 수 있다. 임의의 변수를 선택하여 초기온도에서는 전체적으로 탐색할 수 있도록 변

화량(δ_i)을 크게 주고, 온도가 냉각됨에 따라서 국부 최적해를 탐색할 수 있도록 다음 식(10)과 같이 변화량을 조절한다.

$$\begin{aligned} \text{If } \frac{T_c}{T_1} > 0.7 \text{ then, } \delta_i &= 0.3 \\ \text{else if } \frac{T_c}{T_1} > 0.5 \text{ then } \delta_i &= 0.2 \\ \text{else if } \frac{T_c}{T_1} > 0.3 \text{ then } \delta_i &= 0.1 \\ \text{else if } \frac{T_c}{T_1} > 0.1 \text{ then } \delta_i &= 0.05 \\ \text{else } \delta_i &= 0.01 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, T_c = 현재 온도, δ_i = 변화량.

5. 실험 및 가공시간의 비교

본 연구에서 제안한 가공시간 예측 모델을 검증하기 위해 머시닝센터에서 실제 가공시간과 예측 모델을 통한 시간을 비교하였다. 실험에 사용한 머시닝센터는 FANUC-18M 제어기가 장착된 (주)화천기공의 SIRIUS-U로 절삭이송 가감속 상수는 1,200,000mm/min², 급속이송 가감속 상수는 18,000,000mm/min², 최대 주축회전수는 10,000RPM, 스트로크 크기는 500×500×500mm이다. 가공시간을 예측하기 위한 모델은 펜티엄 IV(2.4G)을 사용하여 실험하였다.

비교실험을 위해서 자유곡면으로 구성된 4개의 실제 사출금형 성형곡면을 가공할 수 있는 NC 프로그램을 준비하였다. NC 프로그램은 CAM 소프트웨어인 Soft-Master[®]를 사용하였다. 4개의 NC프로그램의 블록분포는 표 1과 같고, 실험결과에 의해 계산된 λ_i 는 표 1의 하단에, 각 NC 프로그램의 최적블록길이, d_i^* 는 우측에 제시되어 있다.

표 1. 구간별 블록 수와 λ_i (feedrate = 2000mm/min)

Range File	0.167	0.333	0.5	0.667	0.83	1	1.17	1.33	1.5	1.667	d_i^*
Hand. cover	8027	62920	10823	3626	993	1413	2914	4883	8209	13430	0.215
Cell. phone	22081	65067	5600	3936	3251	1402	2078	1274	1023	7886	0.163
Moni. front	530	55086	22108	11079	5690	4136	3202	1302	728	27044	0.278
TV front mask	13	821	30377	7313	3431	774	1538	3699	342	26370	0.482
λ_i	0.0078	0.0000	0.1412	0.0222	0.1390	0.0209	0.2775	0.0774	0.0001	0.3139	

표 2. 가공시간의 비교

Mold. Dies	Mach. condition		Machining Time(min.)			Difference	
	Tool/PI	Feed	Nom. (N)	Act. (A)	Est. (E)	A/N	E-A /A
Moni. front	20ΦBEM /1.5mm	2,000	85.03	96.30	102.5	1.13	0.064
TV front mask	20ΦBEM /1.0mm	2,000	87.73	87.94	80.88	1.00	0.080
Hand. cover	8ΦBEM /0.2mm	2,000	39.90	58.00	63.48	1.45	0.095
Cell. phone	8ΦBEM /0.2mm	2,000	23.80	48.45	44.95	2.04	0.072

실제 가공시간과 예측시간을 비교한 결과는 표 2에 제시되었다. 표 2에서 보는 바와 같이 10% 오차 내에서 가공시간을 예측하는 것을 볼 수 있다.

6. 결론

NC 가공시간에 영향을 미치는 인자로는 블록길이, 블록 사이각, 이송속도, 가·감속 상수 등이 있다. 블록길이가 충분히 긴 경우에는 NC의 내부 프로그램에 의해 구해진 명목가공시간과 실제 가공시간은 별 차이가 없게 된다. 그러나 블록길이가 짧은 경우 가공시간은 NC 제어기의 가·감속과 블록길이 및 사이각에 의해 영향을 받는다. 따라서 최소경유 이송속도의 정확한 측정이 필요하나, 정확하게 측정할 수 있는 방법과 장비의 부재로 인하여 가공시간 예측에 있어서 오차를 수반하게 된다.

본 연구에서는 부정확한 최소경유이송속도로 인한 예측오차를 NC 프로그램의 블록분포를 이용하는 ASA 알고리즘을 제시하였다. 실험결과 NC 블록분포에 따라서 긴 블록과 짧은 블록으로 구분하는 최적블록길이가 변화되고, 예측오차 10%이내에서 가공시간을 예측하는 것을 볼 수 있다. 더욱 정확한 예측 모델을 만들기 위해서는 다양한 이송속도에 대한 충분한 실제 가공시간 수집이 필요하며, 구간별 교호작용에 대한 분석이 요구된다.

참고문헌

- 김여근, 윤복식, 이상복, (1997), 메타 휴리스틱, 영지문화사.
- Erkorkmaz, Kaan and Altintas, Yusuf, (2001), "High speed CNC system design. Part I: jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation", International journal of Machine Tools & Manufacture, 41, 1323-1345.
- Heo, Eun Young, Kim, Bo Hyun, and Kim, Dong Won, (2003), "Estimation of Sculptured Surface NC Machining Time", Transactions of the society of CAD/CAM engineers, 8(4), 254-261.
- Kim, B.H. and Choi, B.K., (2002), "Machining efficiency comparison direction-parallel tool path with contour-parallel tool path", Computer-Aided Design, 34, 89-95.
- Maropoulos, P.G., Baker, R.P., and Paramor, K.Y.G., (2000), "Integration of tool selection with design Part 2: Aggregate machining time estimation", Journal of Materials Processing Technology, 107, 135-142.
- Montreal, Manuel and Rodriguez, Ciro A., (2003), "Influence of tool path strategy on the cycle time of high-speed milling", Computer-Aided Design, 35, 395-401.
- Yan, X., Shirase, K., Hirao, M., and Yssur, T., (1999), "NC program evaluator for higher machining productivity", International journal of Machine Tools & Manufacture, 39, 1563-1573.