

# Look Ahead 알고리즘에 의한 CNC 공작 기계의 속도 궤적 생성 연구

## Velocity Profile Generation of CNC Machines by the Look Ahead Algorithm

전도영(서강대학교 기계공학과), 김한석(서강대학교 기계공학과 대학원)  
Doyoung Jeon(Sogang Univ.), Hansuk Kim(Sogang Univ.)

### ABSTRACT

This paper proposes the look ahead algorithm with the trapezoidal velocity trajectory in each G-code block. The algorithm requires the information on the length of next trajectories and the connecting angle between each trajectories. A method of generating the maximum corner velocity upon the connecting angle within the machining tolerance is developed and applied to the look ahead algorithm. Simulations and experiments with a machining center show the effectiveness of the methodology.

Key Words : Trajectory Generation (궤적 생성), Trapezoidal Velocity Trajectory (사다리꼴 속도 궤적), Look Ahead Algorithm (미리 보기 알고리즘)

### 1. 서론

CNC 공작 기계를 이용한 가공에서 중요한 요소는 가공시간과 정밀도이다. 시스템의 정밀도는 기준 궤적의 정밀도와 제어기의 정밀도로 구분 할 때, 전자는 임의의 곡선을 직선 혹은 원호로 보간할 때 나타나며 보간 도형의 길이가 짧아질 수록 기준 궤적의 정밀도가 높아지지만 그 길이가 어느 수준 이하로 되면 주어진 이송속도 보다 저속의 궤적이 생성되어 가공시간을 증가시킨다. 따라서 이러한 미소도형이 연속으로 있는 경우에는 다음에 이어지는 도형을 미리 고려하여 적절한 가감속을 수행할 필요가 있다.

제어기의 정밀도를 대표할 수 있는 윤곽 오차는 가공 형상이 급변하는 위치에서 크게 나타나며 이 가공 형상의 정밀도를 높이기 위하여 G-코드 블록마다 dwell 또는 in-position 기능을 사용하여 모서리에서 정지할 수 있다. 하지만 다양한 각도의 모서리에 대하여 모두 정지한다는 것은 가공시간을 증가시켜 비효율적이므로 다음에 이어지는 도형과의 연결각을 고려하여 허용 오차 이내의 응답을 보일 수 있는 모서리 통과 속도를 설정하면 가공시간도 줄이고 윤곽 오차도 줄일 수 있다.

본 논문에서는 2장에서 미소 도형이 연속해 있을 때 다음 도형의 길이를 Look Ahead 하여 이번 도형의 궤적 생성에 반영하는 방법을 보이고, 3장에서 모서리의 특성을 Look Ahead하고 시스템의 모델 및 제어기 이득 값을 고려한 감속 속도 설정 알고리즘을 보이며, 4장에서 모서리 Look Ahead 알고리즘을 적용한 모사실험 및 실험결과를 보인다.

### 2. 미소 블록을 위한 Look Ahead 알고리즘

미소 도형이란 그 길이가 짧아서 그 도형 내에서 가속, 등속 및 감속이 일어나지 못하여 지령된 이송 속도에 도달하지 못하는 것을 말하며, 이러한 미소도형이 연속되어 존재하는 경우에는 톱니형태의 속도 궤적을 생성하게 되므로 이송 속도가 저하되어 가공시간을 증가시키게 된다. 이를 개선하기 위해서 다음에 이어질 도형의 이송 속도 및 길이를 고려하여 허용 윤곽 오차 이내에서 감속 없이 등속으로 움직인다면 가공시간을 줄일 수 있다.

다음에 이어지는 도형을 미리 알기 위해서는 메모리에 도형 정보를 입력하여 이번 도형의 기준 궤적을 생성할 때 참조 할 수 있어야 한다. 가장 쉬운 방법은 가공할 도형 정보 전체를 수록하는 것이지만

메모리에 한계가 있으므로 적정히 선정된 N개의 블록으로 구성되는 Ring 버퍼를 구성하고 해석된 도형 정보를 수록하여 궤적 생성시 참조할 수 있게 한다.

이번 도형의 종점 속도를 지정하는 가장 기본적인 방법은 다음 도형의 이송 속도와 이번 도형의 이송 속도 중 작은 값을 이번 도형의 종점 속도로 지정하는 것이지만, 다음 도형 내에서 감속 할 수 있어야 하므로 하나의 도형에 대하여 진입 허용 속도를 다음의 방법에 의해 구한다.

속도 궤적이 등가감속에 의한 사다리꼴 속도 궤적일 경우,  $i$ 번째 도형의 끝점 속도( $V_f^i$ )와 이송 거리( $L_f^i$ ) 그리고 시스템의 가속도( $A$ )에 대해 다음 식에 의하여 그 도형 내에서 감속 가능한 진입 허용 속도( $V_0^i$ )를 구한다.

$$V_0^i = \sqrt{V_f^i{}^2 + 2 \times A \times L_f^i} \quad (1)$$

그리고, 식(2)에 의해 이송 속도로 제한되는 진입 허용 속도( $V_0^i$ )를 구한다.

$$V_0^i = \begin{cases} V_f^i, & V_f^i < F \\ F, & V_f^i > F \end{cases} \quad (2)$$

이 값을  $i-1$  번째 도형의 종점 속도( $V_f^{i-1}$ )로 지정하여 Look Ahead하는 도형에 대하여 역순으로 반복

해 구하면 이번 도형의 종점 속도를 구할 수 있다. 예를 들어, 원점에서 출발하여 시계방향으로 움직이는 Fig.1과 같은 기준 도형에 대하여 Look Ahead에 의해 궤적을 생성하면, Fig.2와 같은 속도 궤적을 만들 수 있다. 다양한 이송속도에 대하여 항상 그 이하의 속도 궤적이 생성됨을 볼 수 있다.

미소 도형이 연속으로 있는 경우에는 Look Ahead를 해야하는 도형의 개수를 적절히 설정해야 한다. Fig.3에 나타난 도형은 원호를 직선으로 보간한 것인데 직선의 길이가 짧아질수록 더 정확하게 원호를 그리게 된다. Look Ahead를 하는 도형의 개수를 N이라고 할 때, N=1일 경우에는 Fig.4에 나타난 바와 같이 짧은 도형의 길이 때문에 감속에 필요한 충분한 길이를 확보하지 못하여 이송 속도가 저하하는 현상이 발생한다. 따라서, 주어진 이송 속도를 내기 위해서는 감속에 필요한 충분한 길이가 있음을 확인해야 하며, Look Ahead의 개수를 증가시킴으로써 그 길이를 확보할 수 있다. Fig.4를 보면 N=2일 때의 경우가 N=1일 때의 경우 보다 빠른 궤적이 생성되었고, N=7일 경우에 매끈한 사다리꼴 속도 궤적이 생성되었다. N의 값은 등속 구간이 나타날 정도만 하면 되며, 그 이상은 증가 시켜도 성능에 변화가 나타나지 않으므로 무의미하다.

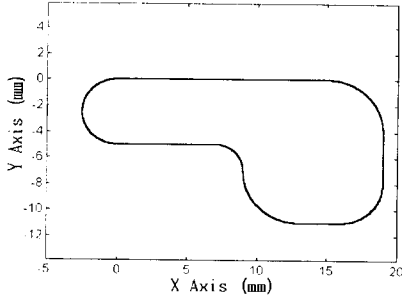


Fig.1 Desired trajectory

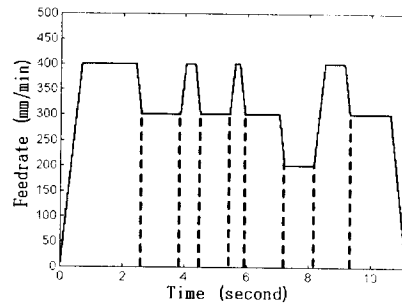


Fig.2 Velocity profile by look ahead algorithm

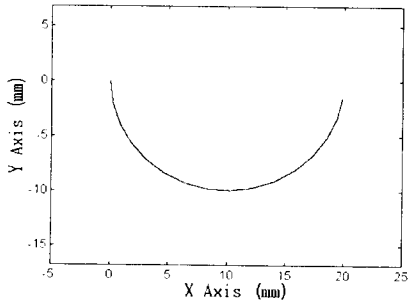


Fig.3 A circle defined by line segments

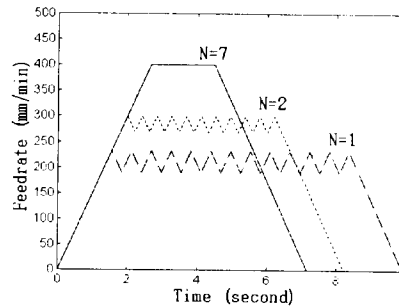


Fig.4 Effect of the number of look ahead buffer blocks

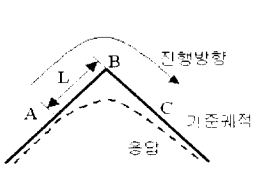


Fig.5 General corner response

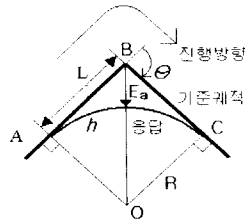


Fig.6 Ideal corner response

### 3. 허용 윤곽오차에 대한 모서리 속도 설정

#### 3.1 윤곽 오차와 추종 오차의 관계 유도

어떤 시스템에서 기준 궤적과 응답이 Fig.5와 같이 나타나는 경우, 점 A에서 응답이 직선에서 곡선으로 바뀌며 이것은 그 시점에서 BC방향의 오차가 생겼다는 것을 뜻하므로, 이때의 추종 오차는 길이 L로 근사할 수 있다. 이 경우 윤곽오차의 최대 값은 B점에서 응답까지의 최소 거리로 결정되는데, 응답 곡선이 모서리의 각도 및 속도에 따라 다양한 유형을 보이므로, 일반화를 위하여 Fig.6과 같이 점 A이전의 윤곽 오차를 무시하고 응답 곡선을 원호로 가정하여 추종 오차와 윤곽 오차의 관계를 구한다.

원호 h는 연결각  $\theta$  인 모서리에 내접하는 원으로, 점점의 위치가 각각 A, C인 원호 OAC이다. 허용 윤곽 오차  $E_a$ 와 연결각  $\theta$ , 내접원의 반지름 R사이에는 삼각형 OAB로부터 다음의 관계가 성립한다.

$$R = E_a \frac{\cos \frac{\theta}{2}}{1 - \cos \frac{\theta}{2}} \quad (3)$$

이때, L은

$$L = \sqrt{(E_a + R)^2 - R^2} \quad (4)$$

이며 허용 윤곽 오차의 응답을 보이기 위한 선분 AB방향의 추종 오차를 의미한다. 선분 AB의 단위 방향 벡터를

$$\bar{\mathbf{l}} = l_x \bar{\mathbf{i}} + l_y \bar{\mathbf{j}} + l_z \bar{\mathbf{k}} \quad (5)$$

라고 하면, 각축의 추종 오차는,

$$e_x = Ll_x, \quad e_y = Ll_y, \quad e_z = Ll_z \quad (6)$$

이 된다.

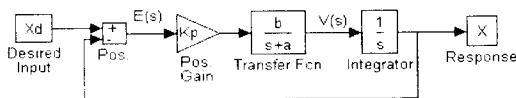


Fig.7 System block diagram

### 3.2 추종 오차에 대한 모서리 속도 설정

Fig.7과 같이 표현되는 시스템에서 속도  $V(s)$ 와 추종 오차  $E(s)$ 는 다음의 관계가 있다.

$$E(s) = \frac{s+a}{b} \frac{1}{K_p} V(s) \quad (7)$$

이 때, 정상 상태에서 시스템의 속도가  $v(t)=V_c$ 로 등속이라면, 추종 오차는

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} \{sE(s)\} = \frac{1}{K_p} \frac{a}{b} V_c \quad (8)$$

이며 Fig.6에서 기준 궤적이 등속일 때, 벡터  $\bar{\mathbf{l}}$ 방향의 속도는 식(6)에 의해 다음의 관계식이 성립한다.

$$V_l = \sqrt{\left(\frac{b_x}{a_x} K_p e_x\right)^2 + \left(\frac{b_y}{a_y} K_p e_y\right)^2 + \left(\frac{b_z}{a_z} K_p e_z\right)^2} \quad (9)$$

여기서,  $a, b, K_p$ 는 그림 12에서의 시스템 모델의 계수들이고, 아래 첨자  $x, y, z$ 는 3축 시스템에서 각 축을 의미한다.

이렇게 구해진 모서리 통과 속도와 앞에서 구한 Look Ahead의 결과와 비교하여 각각의 도형의 진입 허용 속도를 다음과 같이 구한다.

$$V_0 = \begin{cases} V_t, & (V_t < V_l, V_t < F) \\ V_l, & (V_t < V_l, V_l < F) \\ F, & (F < V_l, F < V_t) \end{cases} \quad (10)$$

식 (10)에 의한 진입 허용 속도를 이용하여 다음에 이어지는 도형의 길이와 연결각을 동시에 고려한 속도 궤적을 만든다.

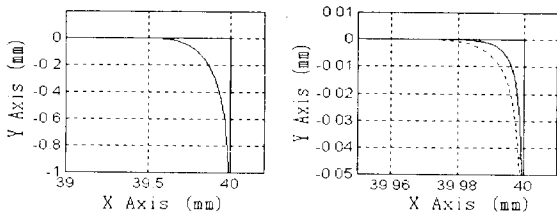
### 4. 모사실험 및 실험 결과

실험은 대우 중공업의 머시닝 센터 ACE-V30을 이용하였는데, 기존의 제어기를 DSP 보드로 대체하여 피드백 제어기, 속도 궤적의 생성 및 적용 또한 이 보드에서 구현하였다. 각축의 시스템 모델은 Fig.7과 같고, 각각의 계수를 Table 1에 나타내었다.

각각의 모서리에 대한 모사 실험 결과가 Fig.8에 나타나 있다. 이송 속도가 1000mm/min이고, 가속도가 60000mm/min<sup>2</sup>일 때, 모서리에서 감속 없이 이송할 경우 Fig.8 (a)와 같이 0.212mm의 과도한 윤곽 오차를 유발한다. 같은 궤적을 앞에서 제시한 알고

Table 1 System parameters

x축	y축
$a_x = 190.84/s$	$a_y = 178.27/s$
$b_x = 5128.5mm/s^2volt$	$b_y = 4840.2mm/s^2volt$
$K_{px} = 1volt/mm$	$K_{py} = 1volt/mm$

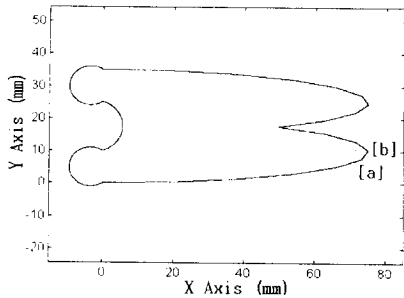


(a) Without deceleration (b) With deceleration

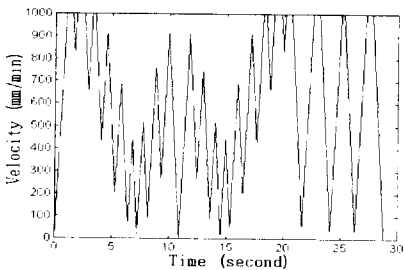
Fig.8 Contouring errors in simulation

리즘에 의해 허용 윤곽 오차 0.01mm(직선), 0.02mm(점선)에 대해 가감속을 수행 할 경우의 응답이 Fig.8 (b)에 나타나 있으며, 이때의 윤곽 오차는 각각 0.008mm, 0.011mm로 허용 범위 내에 있다.

원점에서 시작하여 반시계 방향으로 움직이는 Fig.9 (a)의 도형을 설정하여 머시닝 센터로 실험하였다. 알고리즘에 의해 속도 제적은 Fig.9 (b)와 같이 각도에 따라 적절한 모서리 속도가 설정되고, 이때의 응답 중 [a]와 [b] 근처에서의 응답이 각각 Fig.10 (a), (b)에 나타나 있다. 허용 윤곽 오차는 0.01mm이며, 그림에서 일점 쇄선으로 표시된 것이 실험 결과이며, 점선으로 표시된 것이 모사 실험 결과이다. 모서리 [a]에서의 윤곽 오차는 0.009mm로 마찰의 영향이 적게 나타나 모사 실험 결과와 비교적 유사한 응답을 볼 수 있지만, 모서리 [b]는 윤곽 오차가 0.007mm이지만 한 축이 정지하여 마찰의 영향이 커서 모사 실험결과와는 차이를 보인다.

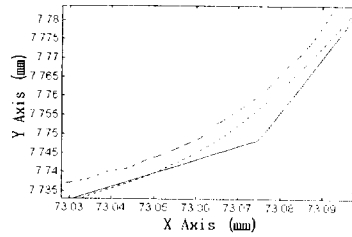


(a) Desired Trajectory

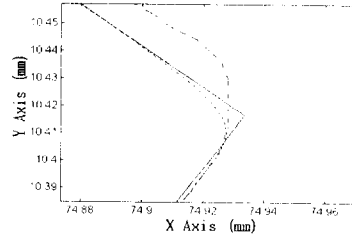


(b) Velocity trajectory

Fig.9 Desired trajectory



(a) Response around [a]



(b) Response around [b]

Fig.10 Contouring errors in experiments

## 5. 결론

본 논문에서는 미소 도형이 존재하여도 주어진 성능을 최대한 이용하기 위하여 N개의 도형 정보를 미리 알아 이를 이번 도형의 속도 제적 생성에 반영하는 Look Ahead 방법을 제시하였다. 이때 시스템의 모델과 제어기 이득 값을 알 경우 시스템의 응답을 원호로 가정하여 윤곽 오차와 시스템의 속도의 관계를 구하고, Look Ahead에 의해 도형의 연결 각도를 파악하여 주어진 허용 윤곽 오차로부터 모서리 통과 속도를 구하였다.

모사 실험 및 실험 결과, 미소 도형이 존재하여도 매끈한 사다리꼴 속도 제적을 만들 수 있으며, 마찰이 없는 경우 다양한 각도의 모서리에서 주어진 허용 윤곽 오차 이내의 응답을 보임을 확인 할 수 있다.

## 참고 문헌

- [1] 신동수, 정성중, "서보 모터의 가감속을 위한 직선형, 지수형 및 뿔형 이산 필터 설계," 한국정밀공학회지, 제 14권, 제 9호, pp. 52-60, 1997
- [2] J. Butler, B. Haack, M. Tomizuka, "Reference Input Generation for High Speed Coordinated Motion of a Two Axis System," Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 113, pp.67-74, 1991