반도체디스플레이기술학회지 제14권 제4호(2015년 12월)
Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 14, No. 4. December 2015.

PC기반CNC시스템을 위한 Look Ahead 보간 알고리즘 개발

유 선 중†
†동양미래대학교 기계공학과

Development of Look Ahead Interpolation Algorithm For PC Based CNC System

Sun-Joong Ryu†
†Dept. of Mechanical Engineering, Dongyang Mirae University

ABSTRACT

This research aims to develop Look Ahead position interpolation algorithm for small size CNC machine controlled by PC based controller. Look Ahead scheme can process a bundle of CNC's linear interpolation commands simultaneously, which reduces acceleration and deceleration time within single linear interpolation command. The algorithm is derived as simple analytical form which can be adapted to PC based CNC system by C language programming. The performance of the algorithm was verified by tail stock machining G codes experimentally. The average traverse speed of the CNC machine was increased by 27.5% and the total traverse time also reduced by 27.2% with the Look Ahead scheme.

Key Words : CNC, PC-NC, look ahead, G code, position interpolation

1. 서 론

스마트폰 외관이 고급화 되는 추세에 따라, 제품의 케이스 소재가 기존의 플라스틱에서 메탈로 급격히 대체되고 있다. 2015년 시판되는 삼성전자 겔럭시S6 경우 알루미늄을 케이스 소재로 채용한 것이 대표적인 사례이다. 메탈 케이스의 제조는 1단계에서 알루미늄을 다이케스팅 방법으로 성형한 후 2단계로 소형 CNC 가공기를 이용하여 절삭가공하여 완성하는 것으로 공정이 구성 되어있다. 이에 따라 소형 CNC가공기의 수요가 크게 증가하게 된다. 2015년 상반기 본격 가동이 되고 있는 삼성전자 베트남 공장의 경우 겔럭시 시리즈의 메탈 케이스를 가공하기 위하여 약 1만여대의 소형 CNC가공기를 구축 계획인 것으로 알려져 있다[1].

이상과 같은 급증하는 수요에 따라 소형 CNC가공기 제조사들은 소위 고속절삭가공(high speed maching, HSM) 이라고 불리는 기술을 채용하여 장비의 생산성을 증가시키고자 하고 있다[2]. HSM을 구현하기 위해서는 기계요소 측면(가공기 강성/진동특성, 절삭툴 설계, 절삭조건 최적화) 뿐만 아니라 제어적인 측면에서 기술의 개발이 필요하게 된다. 구체적으로는 제어기 구성요소 중 위치보간알고리즘(position interpolation algorithm)이 중요한 고려의 요소가 된다. 기존 방법은 CNC 이송명령단위인 G코드를 1개씩 순차 처리 하는데, 스마트폰 케이스와 같은 복잡형상을 가공하는 경우 수 ~ 수십 um 길이의 직선보간 명령을 대량 처리하여야 한다. 이때 CNC는 각 G코드 명령에서 매번 가감속 위치보간을 수행하게 되는데 이에 따라 실제 절삭이송 속도는 크게 떨어져 생산성이 크게 저하된다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 다수의 G코드 명령을 한꺼번에 처리하여 가감속 위치보간을 하는 소위 Look Ahead 알고리즘이 개발되어 CNC제어기에 적용되고 있는 추세이다.[3,4,5] 그러나 이와 같은 기능은 CNC 내부에서 복잡한 알고리즘 및 이에 따른 고속 수치연산이 필요한 작업으로서 전용 제어기를 사용하는 해외 메이저CNC 업체(Fanuc, Siemens 등)의 제품에서만 구현되고 있다. 따라서 국내 소형 CNC가공기 제조사의 경우 고가의 해외CNC 제품을 채용하기 보다는

†E-mail : sjryu70@dongyang.ac.kr

저가의 PC기반 CNC (이하 PC-NC)에서 Look Ahead 기능이 구현되기를 요청하고 있다. 본 연구에서는 Look Ahead 위치보간알고리즘을 PC에서 구현이 가능하도록 개발함으로써 이와 같은 국내 중소 가공기 제조사들의 기술 수요에 대응코자 한다.

이하 연구에서는 먼저 Look Ahead 알고리즘의 주요 원리에 대해서 설명을 한 후 이를 PC-NC에서 구현이 가능하도록 세부적인 수식을 전개하였다. 다음으로 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 상용 소형 밀링머신 및 PC-NC 시스템을 활용하여 Look Ahead 알고리즘을 실제 시스템에 구현하였다. 마지막으로 Tail Stock의 가공용 코드를 적용하여 이송 실험을 수행함으로써 Look Ahead 적용에 따른 평균 이송속도 향상과 총 이송시간 감소의 결과를 검증하였다.

2. Look Ahead 보간 알고리즘

다축 공작기계의 절삭을 위한 공구 이송경로는 보통 여러 개의 직선으로 구성된 G코드 블록의 열로 구성된다. 분할된 각 G코드 블록은 통칭 G01이라고 부르는 선형보간(linear interpolation) 알고리즘으로 처리된다. 가공의 정밀도를 위하여 각 G코드 블록의 이송거리는 1mm 이하의 작은 값을 가지는 것이 보통이다. 따라서 단순히 G01의 선형보간 알고리즘으로 각 G코드 블록을 개별 처리할 경우 각 서보 이송축 가속도의 물리적 한계로 개별 블록 내에서 공구의 실재 이송속도가 지령속도에 도달하지 못하는 현상이 발생하게 된다. 본 장에서는 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 연속된 여러 개의 블록을 한꺼번에 고려하여 보간하는 Look Ahead 보간 방법에 대해서 설명코자 한다.

Fig. 1은 곡선으로 표시된 공구 이송경로가 여러 개의 G코드 블록으로 분할된 것을 표현한 그림이다. Fig. 1에서 i는 각 G코드 블록을 구분하기 위한 인덱스이며 전체 경로는 N개의 G코드 블록으로 구성되어 있다. i번째 블록의 시작 이송속도를 $v_s(i)$, 마침 이송속도 $v_e(i)$라고 할 때 개별 블록을 선형보간으로 처리할 경우 모든 블록의 마침 이송속도는 제로이다. 이에 반하여 Look Ahead 보간 방법을 적용할 경우 일반적으로 n번째 블록의 마침 이송속도인 $v_e(n)$은 제로가 아니며 이송 방향 앞쪽에 위치한 여러 개 블록의 열을 고려하여 계산되어야 한다. Fig. 1에서 이송경로 상에 점선으로 표시된 부분이 n번째 블록의 마침 이송속도인 $v_e(n)$를 계산하기 위해서 고려되는 Look Ahead 블록이다. 고려하는 블록의 개수를 L이라고 할 때 Look Ahead 보간 알고리즘은 다음과 같은 수학적인 문제로 구체화 될 수 있다.

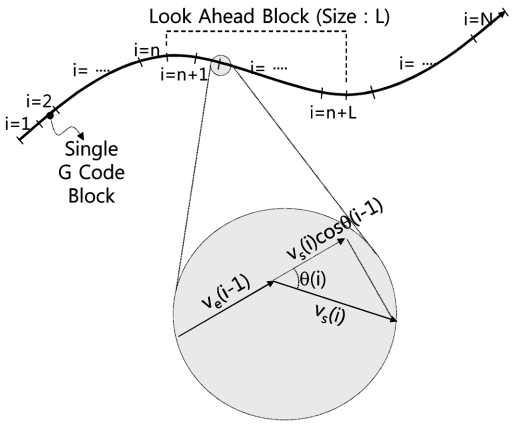


Fig. 1. Tool Transverse Path : Successive G code blocks for Look Ahead scheme.

Given, $v_e(i)$ (i = 1 ~ n-1)
Find, $v_e(n)$ (1)
Considering, chain of blocks (i = n+1 ~ n+L)

이하 절에서는 위의 문제를 해결하기 위한 세부 단계에 대해서 설명한다.

2.1. Look Ahead 블록의 크기

n번째 블록의 마침 이송속도인 $v_e(n)$의 값은 고려하는 Look Ahead 블록의 개수에 따라 달라진다. 따라서, 공작기계가 이송경로 상에서 지령 이송속도 v_c에 충분히 도달하기 위해서 필요한 최소 Look Ahead 블록의 개수 L_{min}을 파악하는 것이 중요하다. L_{min} 의 값은 실재 이송속도(transverse speed)가 지령 이송속도 v_c에 도달하였다고 가정한 후 L_{min}개 G코드 블록 동안 가속도 a로 감속을 하여 최종적으로 이송속도가 제로가 되는 경우를 고려함으로써 계산될 수 있다. Fig. 2로부터 전체 이송거리를 S, 각 블록의 이송거리를 s라고 한다면 최소 Look Ahead 블록의 개수 L_{min} 은 다음과 같이 계산된다. Look Ahead 블록의 개수가 식 (2)보다 작게 설정될 경우 공작기계의 실재 이송속도가 지령 이송속도 v_c 에 미치지 못하게 된다.

$$L_{min} = \frac{S}{s} = \frac{v_c^2}{2as} \tag{2}$$

2.2. 블록 내 이송속도 관계

본 절에서는 식(1)로 표현된 Look Ahead 알고리즘의 문제에 대한 해를 구하고자 한다. 이를 위해서는 먼저 특정 블록 내에서 시작 이송속도 $v_s(i)$, 마침 이송속

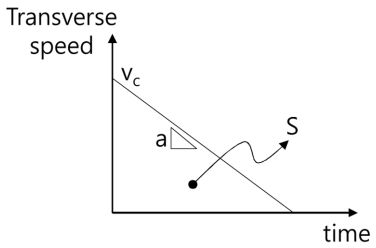


Fig. 2. Deceleration speed profile during L_{min} blocks.

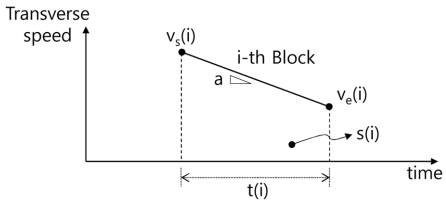


Fig. 3. Relationship between start and end speed within single block.

도 $v_e(i)$ 와의 관계를 도출해야 한다. 두 속도는 독립적으로 임의의 값을 가질 수 없으며 공작기계의 허용가능 한 가속도 a에 의하여 다음과 같은 제한을 받는다. 블록의 이속거리를 s라고 하면 이는 다음과 Fig. 3으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$s(i)=\frac{1}{2}t(i)(v_s(i)-v_e(i))+t(i)v_e(i) \tag{3}$$

한편, 식(3)에서 $t(i)$는 특정 블록의 이송시간으로서 이는 이송방향의 가속도 a가 주어지는 경우 다음과 같이 결정된다.

$$a=\frac{v_s(i)-v_e(i)}{t(i)} \tag{4}$$

이제 식(3), (4)로부터 $v_s(i)$와 $v_e(i)$에 대한 다음과 같은 관계식을 도출할 수 있다. 식 (5)로부터 특정 블록 내에서 마침 이송속도가 주어지는 경우 이를 이용하여 시작 이송속도를 결정할 수 있음을 알 수 있다.

$$v_s(i)=\sqrt{v_e(i)^2+2as(i)} \tag{5}$$

2.3. 블록 간 이송속도 관계

다음으로 블록 간의 이송속도 관계에 대해서 고려해 보기로 한다. Fig. 1의 원 내 그림은 인접한 두 블록간의 마침 이송속도와 시작 이송속도의 관계를 표현한 것이다. 인접한 두 블록의 이송속도의 방향이 변화하지 않는 경우는 i번째 블록의 시작 이송속도는 (i-1)번째 블록의 마침 이송속도와 동일하다. 그러나 두 블록 간 이송속도가 각도 q (i-1) 로 서로 다를 경우 블록간 감속이 필요하게 된다. 이때 필요한 감속 속도는 두 블록 간 접속 방향 이송속도를 고려함으로써 계산될 수 있다. Fig. 1의 원 내 그림으로부터 $v_e(i\text{-}1)$과 $v_s(i)$는 다음과 같은 관계로 정해짐을 알 수 있다. 식(3)에서 는 이송방향의 가속도를 t_s는 보간 알고리즘을 수행하는 제어기의 샘플링시간을 의미한다.

$$a=\frac{v_e(i-1)-v_s(i)\cos\theta(i-1)}{t_s} \tag{6}$$

식 (3)으로부터 ($i-1$)번째 블록의 마침 이송속도는 다음과 같이 결정됨을 알 수 있다.

$$v_e(i-1)=at_s+v_s(i)\cos\theta(i-1) \tag{7}$$

2.4. Look Ahead 보간 알고리즘

최종적으로 n번째 블록의 마침 이송속도인 $v_e(n)$를 구하기 위해서는 이송 방향의 앞쪽에 위치한 L개의 블록 – Look Ahead 블록의 G코드 정보를 이용해야 한다. 즉 ($n+L$)번째 블록의 마침 이송속도 초기값으로 하여 ($n+L$)번째 블록으로부터 ($n+1$)번째 블록까지 순차적으로 2.2절의 블록 내 이송속도 식 (5) 및 2.3절의 블록 간 이송속도 관계 식 (7) 을 계산함으로써 최종적으로 $v_e(n)$의 값을 다음과 같은 알고리즘으로 계산할 수 있다.

$v_e(n+L) = 0$
For $i=n+L$ To $n+1$
  $v_s(i)=\sqrt{v_e(i)^2+2as(i)}$
  If $v_s(i) > v_c(i)$
    $v_s(i) = v_c(i)$ (7)
  End
  $v_s(i-1) = at_s+v_s(i)\cos\theta(t-1)$
  Decrease i by one
End

3. PC 기반 CNC 시스템 구성

개발된 Look Ahead 알고리즘을 검증하기 위하여 소형 3축 밀링머신과 PC 기반의 상용 CNC를 이용하여 시스템을 구성하였다. 밀링머신은 MANIX사의 MM-250 S3밀링머신을 이용하였다. CNC 는 PA Automation사의 PC-NC 제어기를 사용하였다. 본 연구에서

는 전체 CNC 시스템을 구성하는 것이 목적이 아니므로 상용의 PC-NC 시스템을 이용하여 Look Ahead 알고리즘 부분만을 구현하는 것으로 하였다. PA Automation 사의 PC-NC 는 사용자가 Visual C++ 언어 기반으로 CNC 내부의 커널 알고리즘을 재구성할 수 있도록 해주는 Compile Cycle 이라는 기능을 가지고 있다. 본 연구에서는 이를 이용하여 Look Ahead 알고리즘을 CNC 내부에 구현하였다.[6]

4. 시뮬레이션 및 실험

4.1. 원형-직선 이송경로

2절에서 제시한 Look Ahead 알고리즘 및 3절의 시스템 구성의 성능을 검증하기 위하여 Fig. 4와 같은 이송경로에 대하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. Fig. 4의 경로는 원형 및 직선으로 구성된 경로이다. 원형 경로는 100개의 G01 블록으로 구성되어 있으며 직선 경로는 1개의 G01 블록으로 구성되어 있다. 지령이송속도(target transverse speed)는 10,000mm/min 이며 가속도는 0.5 G이다.

Fig. 5는 Fig. 4의 이송경로에 대해서 각각 Look Ahead 알고리즘을 적용하지 않은 경우와 적용한 경우의 이속속도를 시뮬레이션한 결과이다. Fig. 5(a)는 Look Ahead 알고리즘을 적용하지 않은 경우이다. 그림의 좌측 부분이 직선경로에 해당되며 우측부분이 원형경로에 해당된다. 직선경로에 대해서는 이송속도가 지령이송속도에 도달함을 알 수 있으나 원형경로에 대해서는 이송속도가 지령이송속도의 50% 수준에 불과함을 알 수 있다. 이는 원형경로가 100개의 G01 직선보간으로 구성되어 있어 서보 이송축의 계속적인 가감속이 이루어지게 됨으로써 지령이속속도에 도달하지 못하여 발생되는 결과이다. 이에 비하여 Fig. 5(b)의 경우는 Look Ahead 알고리즘을 적용한 결과이다. 2.2절

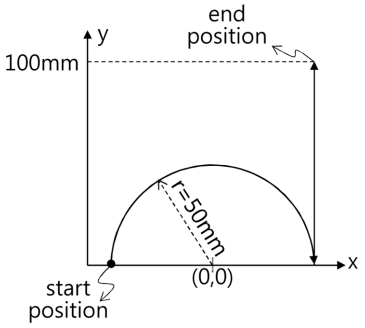
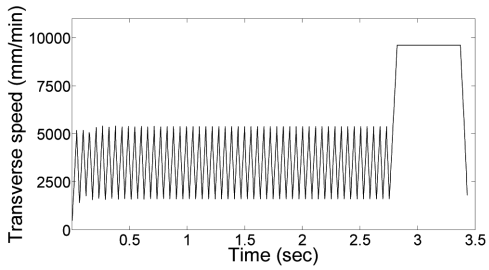
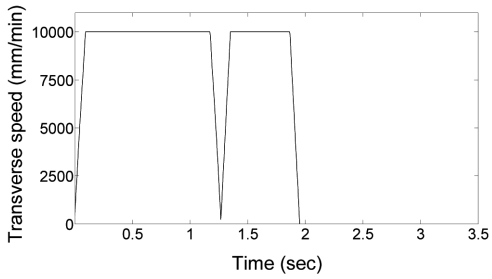


Fig. 4. Circular and linear path for Simulation.



(a) Transverse Speed without Look Ahead



(b) Transverse Speed with Look Ahead

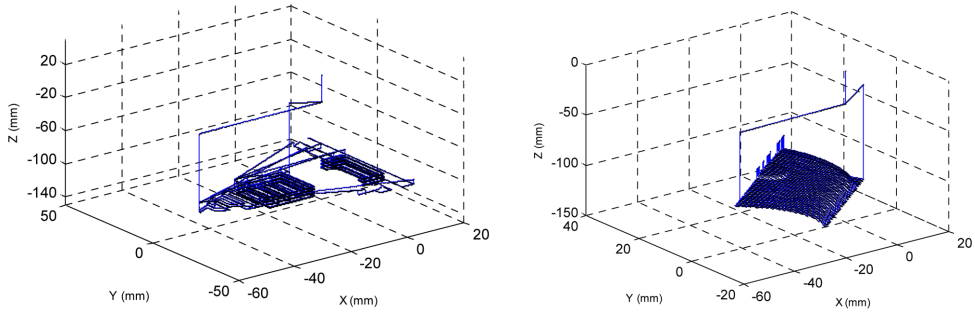
Fig. 5. Acceleration & Deceleration Speed Profile.

에서 설명된 Look Ahead 블록의 개수는 22개 이다. 이 경우는 원형경로에 대해서도 이송속도가 지령이속속도인 10,000mm/min 에 도달함을 알 수 있다. 이에 따라서 원형 및 직선 경로 전체에 대한 총 이송시간도 Look Ahead 를 사용하지 않은 경우 1.95sec 에서 Look Ahead 를 사용하는 경우 3.43sec 로 단축되었다.

4.2. Tail Stock 절삭

본 절에서는 선반 장비의 Tail Stock 부품을 절삭하기 위한 G코드를 이용하여 Look Ahead 알고리즘을 검증하고자 하였다. Table 1은 Tail Stock 절삭에 필요한 G코드파일의 내용을 정리한 것이다. Tail Stock 을 절삭하기 위해서는 총 66개의 G코드파일이 필요하였다. 각각의 파일의 구분은 절삭용 엔드밀의 종류(볼엔드밀 또는 플랫엔드밀), 엔드밀의 직경, 절삭 깊이 및 절삭 속도에 따라 구분한 것이다. 각 파일 내에서 Tail Stock 을 절삭하기 위한 G코드는 수십 ~수백개의 길이 수 ~수십 um 정도인 G01 직선보간 명령으로 구성되어 있다.

Fig. 6는 Table 1의 G코드파일 중 2가지에 대해서 그 공구 이송경로를 도시한 것이다. Fig. 6(a)는 8 mm 플랫엔드밀로 절삭하는 공구이송경로를 나타낸 것이며



(a) G code file 01 (8mm flat endmill) (b) G code file 65 (4mm ball endmill)

Fig. 6. Transverse path of G code file.

Table 1. G code file for tail stock machining

G code file no.	No. of blocks (ea)	Ave. block length (um)	G code file no.	No. of blocks (ea)	Ave. block length (um)	G code file no.	No. of blocks (ea)	Ave. block length (um)
1	797	7	23	76	7	45	414	11
2	397	7	24	76	6	46	103	10
3	260	6	25	396	7	47	74	14
4	80	12	26	399	5	48	73	14
5	172	6	27	629	6	49	92	12
6	340	6	28	136	9	50	94	10
7	91	13	29	452	5	51	91	11
8	62	15	30	44	11	52	167	5
9	43	17	31	252	7	53	219	7
10	33	15	32	187	8	54	62	7
11	44	14	33	158	6	55	173	11
12	51	15	34	56	14	56	542	8
13	116	4	35	92	12	57	397	9
14	179	9	36	65	14	58	173	11
15	574	6	37	307	4	59	513	8
16	596	5	38	94	9	60	471	9
17	143	9	39	116	4	61	645	2
18	395	7	40	355	7	62	1638	2
19	376	9	41	416	9	63	1557	2
20	52	10	42	357	8	64	558	3
21	51	9	43	210	5	65	1559	2
22	23	22	44	407	9	66	1645	2

Fig. 6(b)는 4 mm 볼엔드밀의 경우이다. Tail Stock의 절삭 순서는 Table 1의 각 G코드파일을 01에서 66 까지 순차적으로 Fig. 6과 같이 절삭 경로를 이송함으로 이루어 진다. 본 연구에서는 사용한 3축 가공기의 강성 한계로 실제 소재를 이용하여 절삭 실험을 대신 공구 이송경로 만을 실험하는 것으로 하였다.

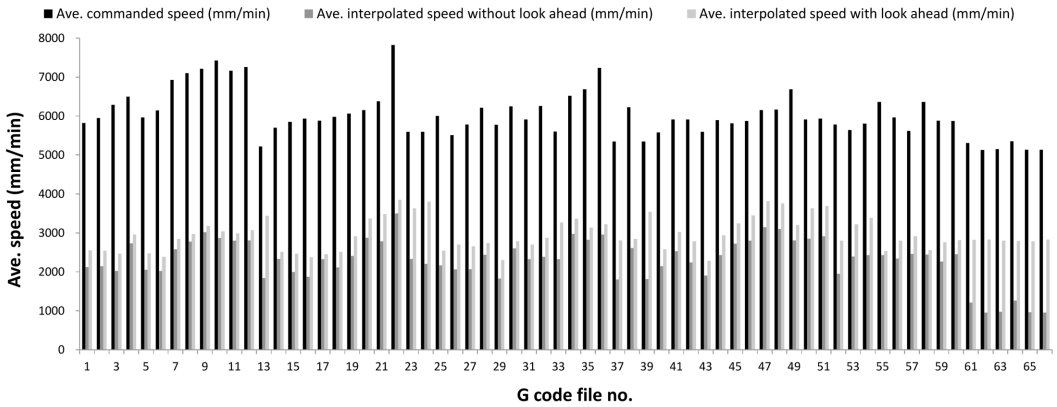
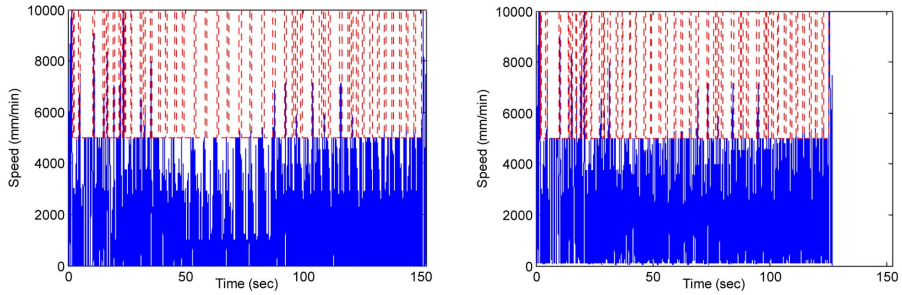


Fig. 7. Average command speed and average measured speed for G code files.



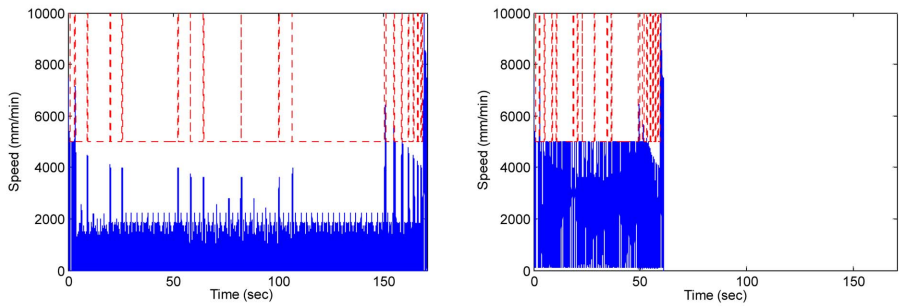
(a) Without Look Ahead (b) With Look Ahead

Fig. 8. Command speed and measured speed (G code file 01).

Fig. 7은 Table 1의 G코드파일에 대하여 지령이송속도, Look Ahead 를 사용하지 않는 경우 이송속도 및 Look Ahead를 사용하는 경우의 이송속도를 실험 장치를 이용하여 측정한 결과이다. 실제 이송 시간의 측정은 실험장치 제어기 내부의 디지컬 클록을 이용하여 측정된 결과이다. Fig. 7에는 각각의 결과를 비교하기 위하여 서로 다른 색상의 바차트로 실험 결과를 표시하였다. 그림의 각 바의 크기는 각 G코드파일 내의 G01 직선보간 명령들의 이송속의 평균치 이다. 그림에서 확인할 수 있는 것과 같이 모든 G코드파일에서 실재의 이속속도는 지령이속속도에 비하여 작은 것을 확인 할 수 있다. 이는 각 G01 직선보간 명령 수행시 서보 축에서 감가속 운동이 필요하기 때문이다. 또한 Look Ahead 를 적용하는 경우와 적용하지 않은 경우를 비교해 보면 Look Ahead 들 적용함으로써 이송속도가 향상됨을 알 수 있다. G코드파일 전체로 Look Ahead을 사용함으로 사용하지 않은 경우에 비하여 이송송도가 평균 2,313 mm/min에서 2,949 mm/min으로 약 27.5% 향상되는 결과를 얻을 수 있었다.

Look Ahead 적용에 따른 이송속도 향상에 대한 효과를 자세히 살펴보기 위하여 Fig. 6의 두가지 이송경로에 대하여 이송속도를 세부적으로 측정하였다. Fig. 8 및 Fig. 9는 각각 G코드파일 01 및 65의 이송속도를 나타낸 것이다. 각 그림에서 점선은 지령이송속도를 실선은 실재 이송속도를 측정한 결과이다. 지령이송속도는 비절삭 구간에서는 10,000 mm/min 그리고 절삭구간에서는 5,000 mm/ min 이다. Look Ahead 적용 전후를 비교해 보면 Fig. 8에 도시된 G코드파일 01의 경우 평균 이속속도는 2,115 mm/min에서 2,549 mm/min 으로 20.5% 증가되었으며 총 이송시간은 152 sec에서 127 sec로 16.5% 감소하였다. G코드파일 65 의 경우는 이러한 경향이 더 확대되어 나타나게 되는데 평균이송속도는 957 mm/min에서 2,787 mm/min으로 191% 증가, 총 이송이간은 171sec에서 61sec로 64% 감소하였다.

Fig. 8 및 Fig. 9의 비교에서와 같이 각 G코드파일별로 Look Ahead 적용 전후의 총 이송시간의 감소 비율이 차이가 나게 된다. 이는 주로 G코드파일내의 G01



(a) Without Look Ahead (b) With Look Ahead

g. 9. Command speed and measured speed (G code file 65).

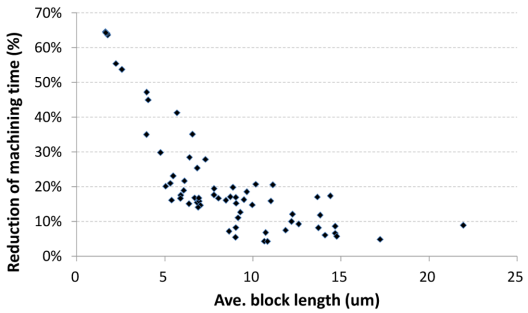


Fig. 10. Ave. block length vs. speed improvement.

직선보간의 이송길이와 관계가 있다. 즉 Table 1에 나타낸 바와 같이 파일 01의 경우 평균 G01 이송거리는 7 um 임에 비하여 파일 65의 경우는 2um에 불과하다. 이는 짧은 길이의 G01 직선보간 이송을 할 경우 더 빈번하게 감가속을 하게 됨으로써 Look Ahead 적용의 효과가 더 크게 나타나기 때문이다. Fig. 10은 이와 같이 효과를 전체 G코드파일에 대해서 표시한 것이다. 가로축은 각 G코드파일의 G01 평균 이송거리를 세로축은 Look Ahead 적용 전후의 총 이송시간 감소율을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 평균 이송거리가 감소할수록 대략 반비례 관계로 총 이송시간의 감소 비율이 확대됨을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 PC-NC 에서 구현이 가능하도록 Look Ahead 알고리즘을 구현 및 시스템에 적용하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위하여 Look Ahead 알고리즘의 세부적인 수식을 유도하였으며 이를 소형 밀링머신 및 PC-NC 시스템에 적용하여 이송 실험을 진행하였다 이송 실험은 Tail Stock 절삭용 G코드를 이용하여 수행하였으며 다음과 같은 결과를 확인하였다.

- 전체 G코드파일에 대하여 평균 이송송도는 Look Ahead 적용 전후를 비교하여 2,313 mm/min에서 2,949 mm/min으로 약 27.5% 향상되었다.
- 이에 따라 총 이송시간은 Look Ahead 적용 전후를 비교하여 3,626sec에사 2638sec으로 약 27.2% 단축되었다.
- Look Ahead 적용에 따른 효과는 G코드파일 내의 G01 직선보간 명령의 이송길이에 따라 결정된다. 일반적으로 G01 이송길이와 Look Ahead 적용 전후 효과는 반비례 관계에 있다.
- 이에 대한 세부적인 결과로서 평균 직선보간 이송거리가 7um 인 G코드파일의 경우 총 이송시간은 16.5% 단축된 것에 비하여 평균 직선보간 이송거리가 2 um 인 G코드파일 경우 단축 효과는 64%로 향상되었다.

본 연구는 소형 CNC 가공기를 위한 PC-NC 시스템에 적용 가능한 Look Ahead 알고리즘을 구현 가능한 형태로 개발 및 그 성능을 검증 한 것에 의의가 있다.

감사의 글

본 논문은 2015년도 동양미래대학교 학술연구지원사업의 지원을 받아 수행된 연구과제입니다.

참고문헌

1. Hyung-Soo Lee, “Samsung Electronics Co. will change manufacturing process and materials completely for Galaxy S6”, ETNEWS, April, http:// www.etnews.com/20150401000092, (2015).

2. Todd Schuett, “A closer look at look-ahead”, Modern Machine Shop, March, http://www.mmsonline.com/articles/a-closer-look-at-look-ahead, (1996).
3. Hansuk Kim, Doyoung Jeon, “Study on the velocity trajectory for high speed and high precision machining of CNC machines”, *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, 16(12), pp. 977-980, (1999).
4. Cheol-Soo Lee, Je-Phil Lee, “The implement of 2-step motion control loop and look ahead algorithm for a high speed machining”, *Journal of the Korean Society of Machining Tool Engineers*, 9(6), pp. 71-81, (2000).
5. M. Zhang, W. Yan, C.-M. Yuan, D. K. Wang, X.-S. Gao, “Curve fitting and optimal interpolation on CNC machines based on quadratic B-splines”, *Science China,* 53(1), pp. 1-18, (2010).
6. Hong-Tzong Yau, Jun-Bin Wang, Chien-Yu Hsu Chih-Hua Yeh, “PC-based controller with real-time look-ahead NURBS interpolator”, *Computer-Aided Design & Applications*, 4, pp. 331-340, (2007).

접수일: 2015년 11월 16일, 심사일: 2015년 11월 26일, 게재확정일: 2015년 12월 21일