



## 입력성형기법 적용을 통한 머시닝센터의 가공 정밀도 개선에 관한 연구

고강호<sup>a</sup>, 임동욱<sup>b</sup>, 홍성욱<sup>c,\*</sup>

## A Study on the Improvement of Machining Precision by Applying Input Shaping Method to Machining Center

Kang-Ho Ko<sup>a</sup>, Dong-Wook Lim<sup>b</sup>, Seong-Wook Hong<sup>c,\*</sup><sup>a</sup> Department of Mechanical System, Gumi Campus of Korea Polytechnic<sup>b</sup> Department of Mechanical Engineering, Inha University<sup>c</sup> Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	8	June	2023
Revised	8	July	2023
Accepted	2	August	2023

## Keywords:

Input shaping  
Machining precision  
Machining center  
Multi-mode input shaper  
Circular interpolation

## ABSTRACT

Recently, machining centers have been actively adopting high-speed positioning systems to enhance operational efficiency and productivity. This study focuses on applying input shaping techniques to a machining center to improve the machining precision. Simulations were performed using a minimal impulse input shaper on a two-axis stage, considering its anisotropic characteristics. A comparative analysis was performed to assess the effectiveness of input shaping by varying the material, feed rate, reduction ratio, and depth of cut. The machined specimens were measured using a digital microscope, surface roughness tester, and an image dimension measurement device. Successful experiments were conducted to demonstrate the improved processing quality of the machining center during combined linear and circular cutting processes. Both the simulations and experiments confirmed the significant effectiveness of the proposed method in enhancing the machining precision of the machining center.

## 1. 서 론

머시닝센터의 이송 시스템은 서보모터와 볼스크류를 통해 정밀하고 빠르게 이송 테이블의 위치를 제어 한다<sup>[1]</sup>. 최근 머시닝센터의 이송 시스템은 고속화를 통해 높은 생산성을 달성하기 위해 구조적으로 경량화되고 있으며, 고정밀 위치 제어 기술이 적용되고 있다<sup>[2]</sup>. 이같은 고속 경량 이송 시스템은 생산성 향상에 도움이 될 수는 있지만, 이송 중에 잔류진동이 발생하게 되어 가공 정밀도에 영향을 미치게 된다. 잔류진동을 억제하기 위해 다양한 기술이 적용되고 있지만, 그 중에서 입력성형기법(input shaping method)은

별도의 하드웨어 추가 없이 쉽고 간편하게 적용할 수 있기 때문에 널리 활용되고 있다<sup>[3]</sup>. 입력성형기법은 입력 명령을 시스템의 고유 모드 특성에 따라 수정하여 입력을 가하여 진동 상쇄효과를 통해 이송계의 잔류진동을 제거하는 개루프 제어 기법 중 하나이다<sup>[4]</sup>. 그동안 입력성형기법에 대한 연구는 다양한 이송계에 적용되어 왔다<sup>[5-8]</sup>. 특히, 반도체, LCD 이송계, 크레인 등에 적용되어 큰 효과를 얻을 수 있었다. 최근에는 입력성형기법 적용 시 이송계의 궤도 오차에 관한 연구가 이루어졌다. Sim은 이방성을 가지는 2축 이송계 진동 모델에서 원호보간 이송 시 발생하는 궤도 오차를 최소화하기 위해 궤도 오차 추정을 통한 재귀적 속도 프로파일에 보정하

\* Corresponding author. Tel.: +82-54-478-7344

E-mail address: swhong@kumoh.ac.kr (Seong-Wook Hong).

는 방법을 제안하였다<sup>[9]</sup>. Choi는 2축 동시 이송에 입력성형기법을 적용할 경우 축 간의 상호 지연으로 발생하는 궤도오차 문제를 개선하기 위해 원호보간구간 진입속도 감소, 시간지연 보상 및 보상 함수 도입의 3가지 방법을 제시하였다. 이를 통해 궤도오차를 최소화하면서 잔류진동을 억제할 수 있음을 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다<sup>[10]</sup>. Ko는 CNC 레이저 가공기의 이송계에 입력성형기법을 적용하여 직선 및 원호 복합 마킹공정에서 마킹 정밀도를 개선할 수 있는 방법을 제안하였다<sup>[11]</sup>. 이와 같이 입력성형기법은 다양한 이송계의 잔류진동과 궤도 오차에 대해 연구되었다. 하지만 머시닝센터의 이송 시스템에 입력성형기법을 적용하여 가공 정밀도를 개선한 연구는 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 항공기 및 반도체 장비 부품 가공 등에 가장 널리 사용되고 있는 3축 수직 머시닝센터의 이송 시스템에 직선 및 원호 복합 가공 공정에서 입력성형기법을 적용하여 가공 정밀도를 개선할 수 있는 방법을 제안하였다. 먼저, 이방성을 갖는 2축 이송계에 입력성형기법을 적용하기 위해 시뮬레이션을 통하여 속도 프로파일을 생성하였다. 생성된 속도 프로파일은 머시닝센터에 탑재되어 있는 화낙 컨트롤러를 제어하기 위해 G-code 입력 명령 프로그램으로 변환하였다. 실험적 검증을 위해 실험 장치를 직접 제작하여 입력성형 적용 효과를 분석하였다. 실험은 입력성형 적용 효과를 다양하게 분석하기 위해 재질, 이송속도, 감속비율, 가공깊이에 따른 조건별로 실험을 수행하였다. 가공된 시편을 디지털 현미경, 조도 측정기, 디지털 이미지 측정 시스템을 이용하여 가공공정에서의 입력성형 효과를 다양하게 검증하였다. 실험 결과, 머시닝센터의 이송 시스템에 입력성형기법 적용이 가공 정밀도를 높일 수 있음을 확인하였다.

## 2. 시스템 모델링 및 시뮬레이션

### 2.1 시스템 모델링<sup>[11]</sup>

Fig. 1은 머시닝센터의 이송계와 공작물을 모델링하기 위해 고려한 질량과 강성이 다른 2축 동적 모델을 보여준다. 여기서 2개의 축은 이송계의 운동 방식에 따라 서로 독립적으로 구동되며, 상호 간섭이 없어 독립된 1자유도 진동계로 모델링할 수 있다고 가정한다.

이송계와 공작물의 질량이 운동 방향별로 각각  $m_x$ ,  $m_y$ 이고 두 방향의 강성과 감쇠를 각각  $k_x$ ,  $k_y$  그리고  $c_x$ ,  $c_y$ 로 두면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$m_x \ddot{u} + c_x \dot{u} + k_x u = c_x \dot{x} + k_x x \quad (1)$$

$$m_y \ddot{v} + c_y \dot{v} + k_y v = c_y \dot{y} + k_y y \quad (2)$$

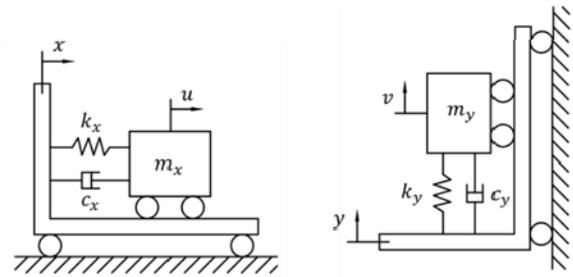


Fig. 1 Vibration system model for the 2-axis stage system<sup>[11]</sup>

고유진동수와 감쇠비를 이용하여 다음과 같은 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{u} + 2\zeta_x \omega_{nx} \dot{u} + \omega_{nx}^2 u = 2\zeta_x \omega_{nx} \dot{x} + \omega_{nx}^2 x \quad (3)$$

$$\ddot{v} + 2\zeta_y \omega_{ny} \dot{v} + \omega_{ny}^2 v = 2\zeta_y \omega_{ny} \dot{y} + \omega_{ny}^2 y \quad (4)$$

여기서  $x$ ,  $y$ 는 각 방향의 위치명령을  $u$ ,  $v$ 는 이에 대응되는 이송체의 변위를 나타낸다. 또한,  $\omega_{nx}$ ,  $\omega_{ny}$ 은  $x$ ,  $y$ 축의 고유진동수로서 각각  $\sqrt{k_x/m_x}$ ,  $\sqrt{k_y/m_y}$ 로 정의된다. 또한  $\zeta_x$ ,  $\zeta_y$ 는 해당 모드의 감쇠비로서 각각  $c_x/(2m_x\omega_{nx})$ ,  $c_y/(2m_y\omega_{ny})$ 로 정의된다. 시뮬레이션에서는 식(3), (4)가 활용된다.

### 2.2 직선+원호 복합 공정에서의 입력성형 적용

먼저, 직선+원호 복합공정에 입력성형 적용을 위한 시뮬레이션을 진행하기 위해 이송 시스템에 공작물을 장착한 상태의 고유진동수를 측정하였다. Fig. 2와 같이 실험 장치의 X축과 Y축 방향 측면에 가속도 센서를 부착하고 급속 이송시킨 후 정지시켜 얻어진 신호를 이용하였다. FFT분석 결과, X축 방향의 고유진동수는 46 Hz이며, Y축 방향의 고유진동수는 131 Hz를 나타내었다. 시뮬레이션 조건은 Table 1과 같다. 이송속도는 머시닝센터가 가지고 있는 허용 가속도와 실험장치와 시편의 크기, 입력성형기법 적용 가능성을 고려하여 100 mm/s와 200 mm/s의 2가지 조건으로

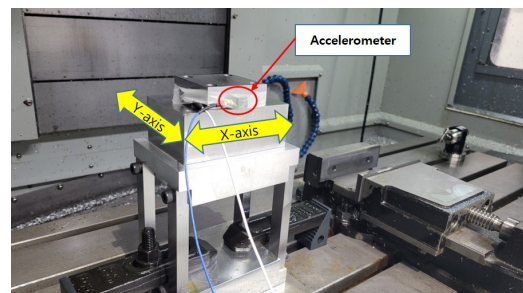
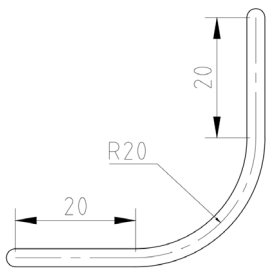


Fig. 2 Experimental setup for measuring the natural frequencies in two direction

**Table 1 Simulation condition for combined linear and circular cutting**

Parameter	Unit	X-axis	Y-axis
Natural frequency	Hz	46	131
Length of linear interpolation	mm	20	
Radius of circular interpolation	mm	20	
Accel./Decel. time	s	0.05	
Maximum velocity	mm/s	100	
		200	
Velocity reduction (% of maximum velocity)	%	40	
		1	

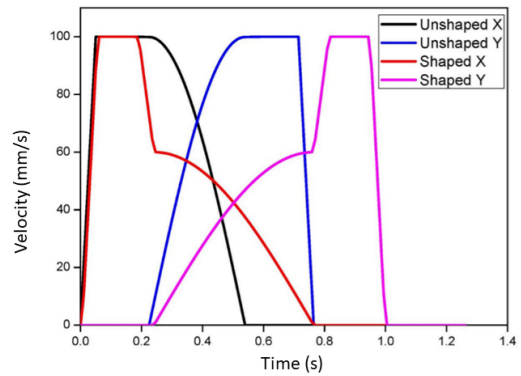


**Fig. 3 Cutting path for simulation and experiment**

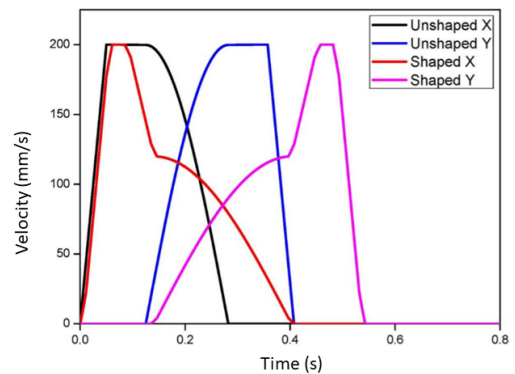
진행하였으며, 가속 시간은 0.05 s로 설정하였다. 또한 원호보간 진입 전 감속 비율을 40% 적용한 경우와 감속 비율을 적용하지 않는 경우(실제로는 동일한 형식의 G-code 생성을 고려하여 1% 감소시킨 경우)를 각각 시뮬레이션하여 얻어진 결과를 분석하였다. 가공 경로는 Fig. 3와 같이 X축 직선 이송 20 mm, 원호보간 구간의 반경 20 mm, Y축 직선 이송 20 mm 후 정지하게 된다.

2축 이송계의 입력성형 적용을 위한 입력성형기 선정은 xy방향이 이방성을 보이고 있고, 양방향에 대해 2개의 고유진동수를 모두 고려한 최소 임펄스 다모드 입력성형기를 적용하였다<sup>[12]</sup>. Fig. 4는 원호보간 진입 전 감속을 40% 적용하여 속도 프로파일을 생성한 후 입력성형이 적용된 속도 프로파일을 나타낸다. 기준 입력명령과 비교하여 입력성형이 적용된 속도 프로파일은 전체적인 오차 면적을 줄이기 위해 고안되었다<sup>[10,13]</sup>. 그림에서 보는 바와 같이 기준 명령을 적용한 것은 이송 속도 100 mm/s 도달한 후 어느 정도 등속을 유지한 후 바로 원호보간이 진행된다. 이에 반해 입력성형이 적용되면서 감속이 적용된 것은 원호보간이 시작되기 전에 감속 40%를 적용하면서 계단 형태의 속도 프로파일이 생성된 것을 볼 수 있다. Fig. 5는 이송 속도 200 mm/s를 적용한 상태에서 앞선 조건과 동일하게 진행한 속도 프로파일을 나타낸다. Fig. 6과 7은 이송 속도를 100 mm/s, 200 mm/s를 적용하면서 원호보간 진입 전 감속을 적용하지 않은 경우의 속도 프로파일을 나타낸다.

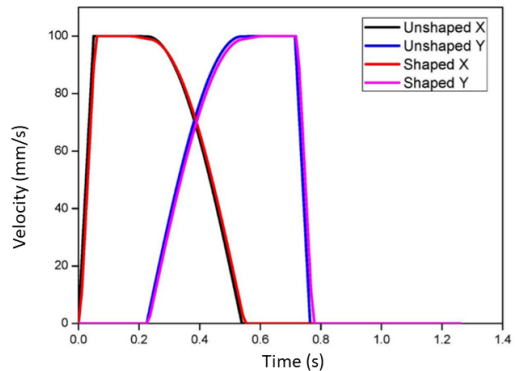
Figs. 4~7에서 볼 수 있는 바와 같이 원호보간 구간 진입 전 40% 감속을 하여 입력성형을 하는 경우에는 기준 명령에 비해 최



**Fig. 4 Velocity profile with Vmax = 100 mm/s and 40% velocity reduction during circular interpolation**



**Fig. 5 Velocity profile with Vmax = 200 mm/s and 40% velocity reduction during circular interpolation**



**Fig. 6 Velocity profile with Vmax = 100 mm/s and 1% velocity reduction during circular interpolation**

대 37% 정도 시간 지연이 발생하지만 감속을 하지 않고 입력성형을 한 경우는 4%미만의 시간 지연이 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 이송속도를 100 mm/s 적용한 상태에서 원호보간 진입 전 감속 비율을 40% 적용하면서 입력성형을 적용한 궤도 프로파일과 기준 명령의 궤도 프로파일을 나타낸다. 오차율은 약 0.0270%이다. 여기서 오차율은 기준 원호와 입력성형된 원호 궤도에 의해 형성되는 면적 오차를 기준 원호 면적으로 나눈 값으로 정의하였다. Table 2는 감속비율과 속도변화에 따른 원호궤도 오차의 양상

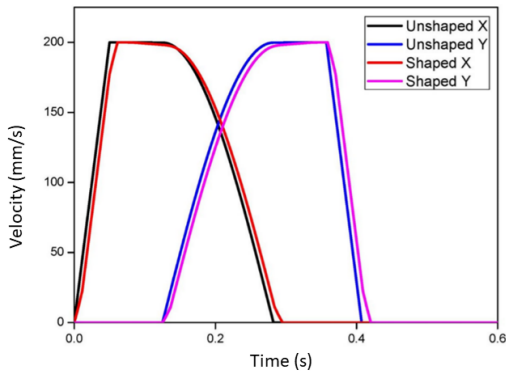


Fig. 7 Velocity profile with  $V_{max} = 200$  mm/s and 1% velocity reduction during circular interpolation

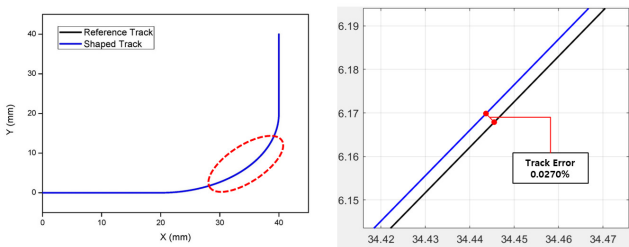


Fig. 8 Track of circular motion with  $V_{max} = 100$  mm/s and 40% velocity reduction during circular interpolation

을 보여준다. 오차율이 가장 큰 것은 이송속도 200 mm/s, 감속을 적용하지 않으면서 입력성형이 적용된 경우로 오차율은 0.3546%을 나타내었다. 오차율은 이송속도가 증가함에 따라 커진다는 것을 알 수 있다.

### 3. 실험 방법

시뮬레이션과 동일한 조건으로 실제 머시닝 센터에 입력성형을 적용하는 실험을 실시하였다.

#### 3.1 실험장치

Fig. 9는 실험에 사용된 3축 수직 머시닝센터(현대위아, VX500)



Fig. 9 3-Axis machining center (VX500, Hyundai-wia)

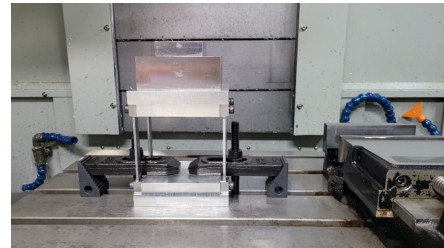


Fig. 10 Photos for the experimental system: Jig+workpiece

를 보여주고 있다. 이 머시닝센터는 x축으로 좌우 이송, y축으로 전후 이송, 그리고 z축으로 상하 이송과 함께 주축을 회전시키는 구조로 이루어져 있다. 또한, 이 머시닝센터는 CNC 제어 장치인 FANUC series 21-MB를 내장하고 있으며 G-code 명령어를 통해 이송 시스템을 제어할 수 있다. Fig. 10은 실험장치 지그(Jig)를 나타낸다. 실험장치는 가공 중에 발생할 수 있는 떨림을 차단하기 위해 볼트로 강력하게 고정하였다. 주축 회전수는 회전으로 인한 진동을 최소화하고, 안정적인 실험을 위해 5000 rpm으로 하였다. Fig. 11은 본 실험에 사용된 3 FLUTE 45°HELIX end mill (YG-1) 절삭공구가 슬림척(BT40-SK)에 고정된 것을 나타낸다.

#### 3.2 입력성형을 위한 G-code 변환

시뮬레이션에서 생성한 속도 프로파일을 머시닝 센터에 적용할 수 있도록 G-code 변환 프로그램을 구성하였다. Fig. 12는 시뮬레이션을 통해 생성된 속도 프로파일 데이터를 룩업(look-up) 테이블에 입력하여 자동으로 G-code 프로그램이 생성되도록 한 과정을 보여주고 있다. 변환된 G-code 프로그램을 화낙 컨트롤러 장치를

Table 2 Simulation results for combined linear and circular cutting process

Circular interpolation distance (mm)	Natural frequency (Hz)	Reduced velocity (% of maximum velocity)	Maximum velocity (mm/s)	Orbit error rate (%)
20	X : 46 Y : 131	40	100	0.0270
			200	0.1075
	1	100	0.1051	
		200	0.3546	



Fig. 11 Cutting tool

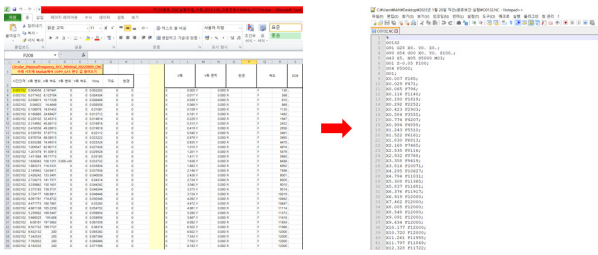


Fig. 12 Process to transfer the original command to G-code

% O0114 G91 G28 X0. Y0. Z0; G90 G54 G00 X0. Y0. Z100; G43 Z5. H05 S5000 M03; G01 Z-0.05 F100; G04 P5000; G01; X0.012 F148; X0.050 F447; X0.123 F874; X0.244 F1444; X0.415 F2047; X0.637 F2659; X0.910 F3253; X1.232 F3856; X1.606 F4459; X2.029 F5052; X2.490 F5503; X2.976 F5806; X3.476 F5974; X3.978 F6000; ;	X15.533 F5989; X16.028 F5920; X16.514 F5799; X16.984 F5618; X17.435 F5380; X17.865 F5139; X18.275 F4897; X18.565 F4655; X19.035 F4415; X19.384 F4174; X19.715 F3947; G03 X20.031 Y0.002 R20.002 F3777; X20.337 Y0.006 R19.998 F3657; X20.638 Y0.013 R19.997 F3600; ; G01 X39.999 Y20.973 F4184; X39.999 Y21.344 F4425; X39.999 Y21.734 F4656; ; X39.999 Y39.982 F435; G04 P5000; M05; G91 G28 Z0. G91 G28 Y0. M30; ;
--	---

Fig. 13 Shaped G-code program at velocity 100 mm/s, 40% reduction in speed

에 입력하게 된다. Fig. 13은 원호공간 진입 전 40%의 감속을 적용하면서 입력성형된 속도 프로파일을 적용한 G-code 프로그램을 간략하게 나타내었다.

3.3 가공 시뮬레이션

Fig. 14는 입력성형 실험 전에 G-code 명령으로 변환된 프로그램을 V-CNC 가공 시뮬레이터에 입력하여 가공 중에 발생할 수 있는 문제점과 경로 이상 유무를 확인하는 것을 보여준다. 가공 시뮬레이션 결과, 생성된 프로파일을 통해 기준 경로와 맞게 이상 없이 가공됨을 확인할 수 있다.

3.4 실험준비

입력성형 적용 효과에 대한 정확한 분석을 위해 Fig. 15와 같이

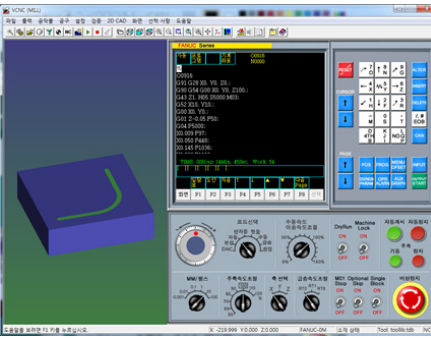


Fig. 14 Machining path simulation with V-CNC

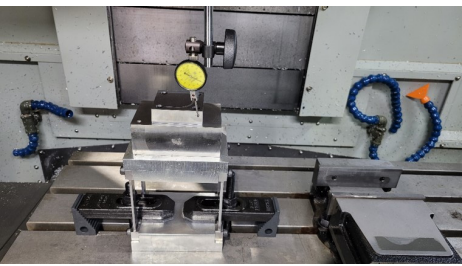


Fig. 15 Adjustment of squareness using a dial test indicator



Fig. 16 Face milling process for the upper surface to ensure the surface flatness

테스트 인디케이터를 이용하여 주축에 대하여 시편이 수평과 수직으로 ±0.01 mm 이내로 맞춰지도록 볼트로 고정하였다. 또한, 주축대에 고정되는 절삭 공구가 시편의 표면에 일정하게 절삭될 수 있도록 Fig. 16과 같이 평면도가 0.01 mm 이하가 되도록 시편의 윗면을 페이스커터를 이용하여 절삭 후 실험을 진행하였다.

4. 실험 결과

가공된 시편을 통해 입력성형 적용 효과를 검증하기 위해 디지털 현미경, 조도 측정기, 이미지 치수 측정 시스템을 이용하여 주요 가공 성능을 평가하였다. Fig. 17과 Fig. 18은 다양한 조건에서 실험된 시편 중에서 SM20C와 Al6061의 이송속도 200 mm/s,



Fig. 17 Experimental results for SM20C specimens



Fig. 18 Experimental results for Al6061 specimens

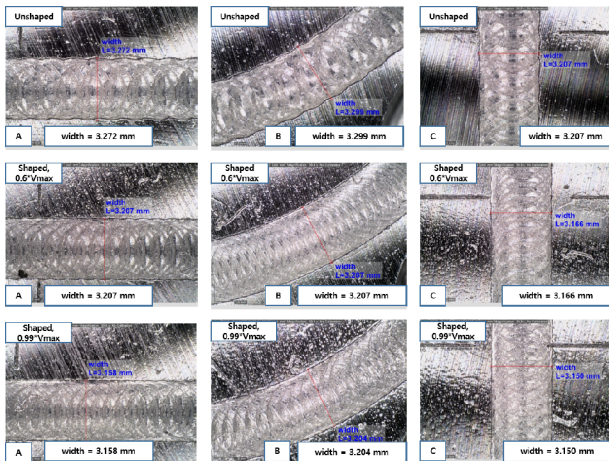
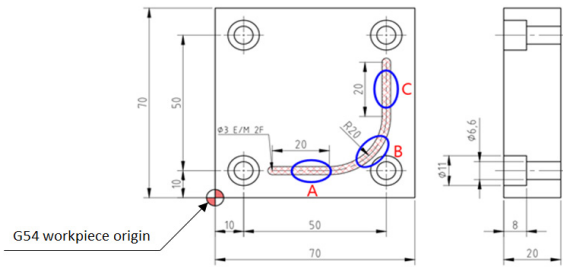


Fig. 20 Zoomed surfaces on SM20C specimens with Vmax=100 depth of cut Z-0.05

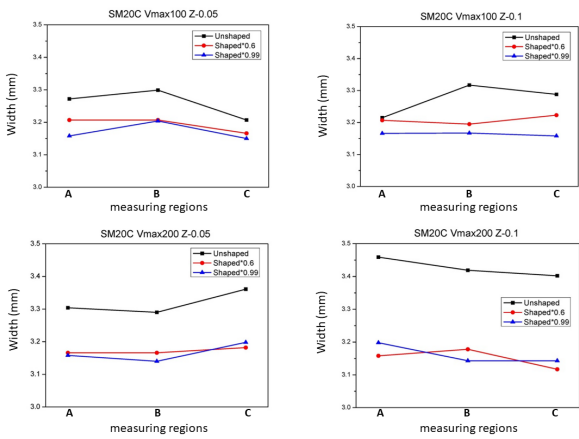


Fig. 21 Comparison of cutting width for SM20C specimens under three different conditions: unshaped, shaped with 40% speed reduction, shaped without speed reduction

가공깊이 0.1 mm 조건에서 가공된 시편을 나타낸다.

#### 4.1 가공 표면 폭(width) 측정

먼저 Dino-Lite 디지털 현미경을 이용하여 가공된 시편의 폭 (width)을 측정하였다. Fig. 19는 X축 방향의 직선 구간, 원호반경 구간, Y축 방향의 직선 구간이 총 3개로 구성된 특정 범위의 측정

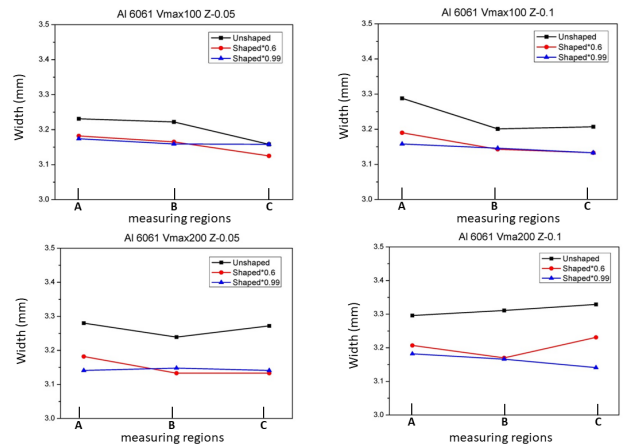


Fig. 22 Comparison of cutting width for Al6061 specimens under three different conditions: unshaped, shaped with 40% speed reduction, shaped without speed reduction

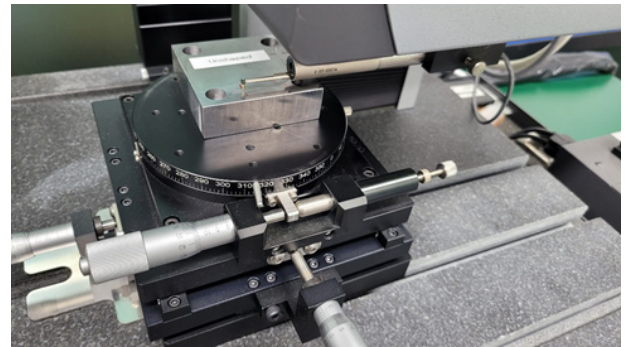


Fig. 23 Surface roughness measurement setup with a precise positioning stage

구간을 나타낸다. Fig. 20은 SM20C 소재를 3 mm 직경의 엔드밀을 이송속도 100 mm/s, 가공깊이 0.05 mm로 절입하여 가공된 시편의 측정 사진을 나타낸다. 사진에서 볼 수 있는 바와 같이 기준 명령으로 가공된 표면은 잔류진동 영향으로 가공 폭이 매우 불규칙하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 각 구간 별로 측정된 가공 폭 결과를 Fig. 21과 22에 각각 나타내었다. 입력성형을 하지 않은 경우, 0.22~0.45 mm의 가공폭 오차가 발생하였으나 입력성형을 한 경우 감속을 한 경우와 하지 않은 경우가 평균적으로 유사한 성능을 나타냈으며 0.15~0.23 mm 범위의 오차를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

#### 4.2 가공 표면거칠기 측정

입력성형의 효과를 검증하기 위해 표면조도계(SURFCOM NEX series 031)를 사용하여 가공면의 중심선 평균표면거칠기 Ra를 측정하였다. Fig. 23은 표면조도계 테이블 위에 시편 이송 장치가 고정되어있는 모습을 보여준다. 시편 이송 장치는 미세한 조정과 정확한 이동을 할 수 있어 안정적인 측정이 가능한 구조로

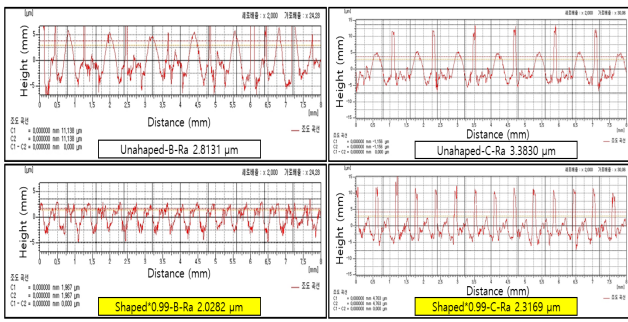


Fig. 24 Surface profiles for SM20C specimens for Vmax = 100 mm/s and depth of cut Z-0.05 mm

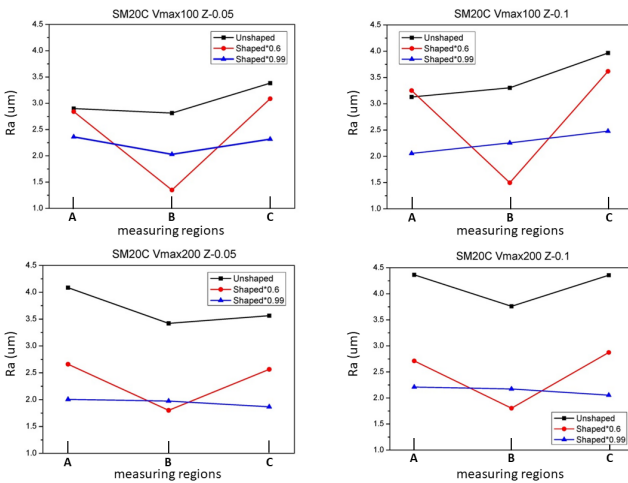


Fig. 25 Comparison of surface roughness for SM20C specimens under three different conditions: unshaped, shaped with 40% speed reduction, shaped without speed reduction

되어있다. 표면거칠기 측정 구간은 폭 측정 구간과 동일한 구간을 사용하였으며 표면거칠기 값을 더욱 신뢰적이고 정확하게 측정하기 위해 각 구간별 3회 반복 측정하였다.

Fig. 24는 SM20C 시편을 이송속도 100 mm/s, 가공깊이 0.05 mm의 조건에서 가공된 시편의 표면곡선을 나타낸다. Fig. 25에는 Fig. 24에서 얻어진 표면거칠기를 보여주고 있다. 한편 Al6061 시편에 대해 이송속도를 200 mm/s로 두고 가공된 시편에 대한 표면거칠기를 Fig. 26에 보여주고 있다.

Figs. 25, 26을 보면, 전체적으로 입력성형이 적용된 조건에서 표면거칠기가 크게 개선되는 것을 확인할 수 있다. 가공이 시작되는 직선보간영역에서는 가공이 이루어지는 방향과 진동이 같은 방향으로 발생하게 되므로 그 효과가 크지 않으나 원호보간영역과 후반 직선보간 영역에서는 입력성형을 적용하여 큰 개선효과를 얻을 수 있었다. 특히 원호보간 구간에서는 원호보간 진입 전 감속을 40% 적용하면서 입력성형이 적용한 경우 최대 55%의 표면거칠기 개선 효과를 얻을 수 있었으며, 입력성형만 적용한 경우에도 최대 42%의 개선효과를 확인하였다. 이를 통해 원호보간 구간을

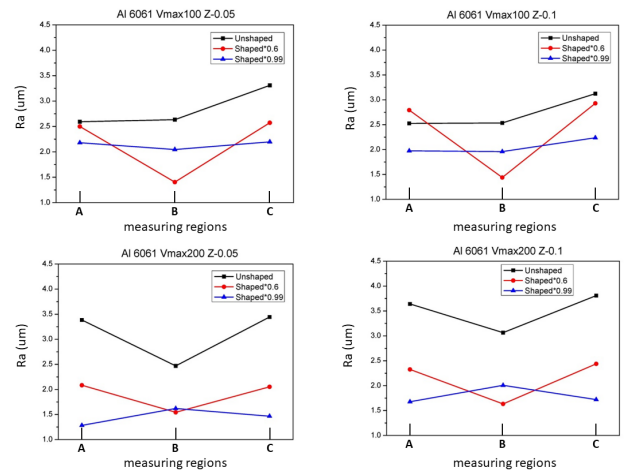


Fig. 26 Comparison of surface roughness for Al6061 specimens under three different conditions: unshaped, shaped with 40% speed reduction, shaped without speed reduction

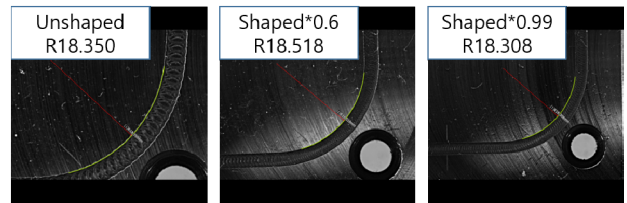


Fig. 27 Radius of a circular arc in SM20C Vmax100 mm/s Z-0.05 mm (units: mm)

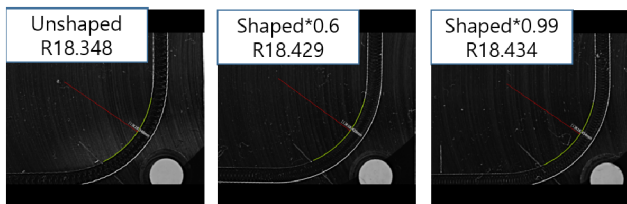


Fig. 28 Radius of a circular arc in Al6061 Vmax100 mm/s Z-0.05 mm (units: mm)

진입하기 전에 감속을 하는 것이 원호보간영역 표면거칠기 개선에 유용함을 알 수 있다.

### 4.3 원호 구간 궤도 반경 측정

원호 구간의 궤도를 측정하기 위해 이미지 치수 측정 시스템 IM-8000을 이용하였다. Fig. 27과 28은 SM20C와 Al 6061을 이송속도 100 mm/s, 가공깊이 0.05 mm 조건에서 원호 구간의 궤도 이미지를 측정된 결과를 나타낸다. Fig. 27에서는 입력성형과 감속이 40% 적용된 것과 입력성형만 적용한 경우 기준 원호 궤도 (반경 R18.5 mm)에 가장 근접하게 나타나고 있다. 그러나 이와 달리 Fig. 28에서는 입력성형만 적용한 경우가 다소 우수한 결과를 보여주고 있다. 이 같은 방식으로 측정된 여러 경우의 궤도 반경 측정결과를 Table 3과 4에 요약 정리하였다. 기준 명령에 의한 가

**Table 3 Comparison of measured radii for SM20C specimens**

Feed rate (mm/s)	Depth of cut (mm)	Measured radius (mm)		
		Unshaped	Shaped 0.6*Vmax	Shaped 0.99*Vmax
Vmax100	0.05	18.350	18.518	18.308
	0.10	18.373	18.401	18.417
Vmax200	0.05	18.175	18.391	18.693
	0.10	18.013	18.411	18.382
Average		18.228	18.430	18.450

**Table 4 Comparison of measured radii for Al6061 specimens**

Feed rate (mm/s)	Depth of cut (mm)	Measured radius (mm)		
		Unshaped	Shaped 0.6*Vmax	Shaped 0.99*Vmax
Vmax100	0.05	18.348	18.429	18.434
	0.10	18.153	18.377	18.356
Vmax200	0.05	18.182	18.449	18.465
	0.10	18.004	18.360	18.446
Average		18.182	18.404	18.425

공 시 평균적으로 0.27~0.32 mm 정도의 반경오차를 나타내는 반면, 입력성형을 하는 경우 평균적으로 0.1 mm 미만의 오차를 보이고 있음을 알 수 있다. 이 같은 결과를 통해 입력성형이 궤도 반경 오차를 크게 개선할 수 있음을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 머시닝센터의 2축 이송계에 입력성형기법을 적용하여 고속 이송으로 발생하는 잔류진동을 제거하여 가공 정밀도를 개선하는 방법을 제안하였다. 시뮬레이션 및 실험을 통해 제안된 방법을 검증하였다. 이를 위해 머시닝센터의 XY 이송계에 입력성형 가공 실험이 가능하도록 G-code 변환 프로그램을 개발하여 적용하였다. 서로 다른 종류 및 가공조건에서 다양한 실험을 진행하였고 가공된 시편의 폭, 표면거칠기, 원호 구간 궤도를 측정하여 입력성형 적용 효과를 분석하였다. 실험결과 입력성형을 적용한 경우, 가공폭, 표면거칠기, 원호궤도 반경 등 모든 부분에서 정밀도가 크게 향상됨을 확인하였다. 원호 반경의 경우에 입력성형을 적용하지 않은 경우 일관되게 적은 값이 관찰되었으나 입력성형을 적용을 통해 오차값을 줄여 기준값에 보다 근접된 결과가 얻어짐을 확인하였다.

## References

[1] Jang, H. S., Kang, Y. S., Kwon, S. H., Jang, W. K., Seo, Y. H.,

Kim, B. H., 2022, AC Servo Motor and Ball Screw Type Feed Drive System Modeling, Proc. Korean. Soc. Precis. Eng. Spring Conf., 820.

[2] Jeong, W. Y., Jeong, H. I., Lee, C. M., 2021, Shape Optimization for Lightweight of the Metal 3D Printing Based Hybrid Machining Center, J. Korean Soc. Manuf. Proc. Eng., 20:2 80-85, <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2021.20.02.080>.

[3] Kwon, S. W., Azizjon, K., Kim, J. S., Hong, S. W., 2018, Development of Motion Code Generator for Application of Input Shaping Method, Proc. Korean. Soc. Precis. Eng. Spring Conf., 354.

[4] Hong, S. W., 2014, Input Shaping Method for Mechanical Vibration Control, Chaosbook, Republic of Korea.

[5] Kim, B. S., 2011, Input Shaping for Servo Control of Machine Tools, J. Korean Soc. Prec. Eng., 28:9 1011-1017.

[6] Sim, J. U., Choi, P. K., Kwon, S. W., Hong, S. W., 2021, A Study on the Compensation of Positioning Error in Circular Interpolation with Input Shaping Method for 2-axis Positioning System, Proc. J. Korean. Soc. Precis. Eng. Autumn Conf., 374.

[7] Ko, K. H., Hong, S. W., 2021, A Study on Reduction of Residual Vibration in the Machining Center Through Input Shaping Method, Proc. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. Conf., 186.

[8] Piao, M. G., Shah, U. H., Jeon, J. Y., Hong, K. S., 2014, Input Shaping Control of a Refueling System Operating in Water, J. Inst. Control. Robot. Syst., 20:4 402-407, <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2014.13.8004>.

[9] Sim, J. U., 2022, Study on Input Shaping of Anisotropic 2-axis Positioning System in Circular Interpolation, Master Thesis, Kumoh National Institute of Technology, Republic of Korea.

[10] Choi, P. K., 2021, A Study on Application of Input Shaping Method to Circular Interpolation, Master Thesis, Kumoh National Institute of Technology, Republic of Korea.

[11] Ko, K. H., Sim, J. U., Hong, S. W., 2022 Application of Input Shaping to a CNC Laser Processing Machine to Enhance Processing Precision, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 31:5 346-352, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2022.31.5.346>.

[12] Park, S. W., Hong, S. W., Danielson, J., 2009, A New Design Method for Multi-mode Input Shapers to Eliminate Residual Vibrations in Dynamic Systems, J. Korean. Soc. Precis. Eng., 26:4 100-106.

[13] Sim, J. U., Choi, P. K., Kwon, S. W., Hong, S. W., 2022, Improved Input Shaping Method for Circular Interpolation of a 2-Axis Positioning System, J. Korean. Soc. Precis. Eng., 39:4



283-289, <https://doi.org/10.7736/JKSPE.022.005>.

	<p><b>Kang-Ho Ko</b> Professor in the Department of Mechanical System, Korea Polytechnics. His research interest is Vibration Control and Precision Engineering. E-mail: <a href="mailto:kkhmachine@kopo.ac.kr">kkhmachine@kopo.ac.kr</a></p>
	<p><b>Dong-Wook Lim</b> He received Doctor Degrees in Mechanical Engineering from Inha University in 2023. His research interests include Laser Machining and Micro Machining. E-mail: <a href="mailto:22191319@inha.edu">22191319@inha.edu</a></p>
	<p><b>Seong-Wook Hong</b> Professor in the Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology. His research interests include Command Shaping, Bearing Modeling and Analysis, and Structural Dynamics Analysis. E-mail: <a href="mailto:swhong@kumoh.ac.kr">swhong@kumoh.ac.kr</a></p>