

PC-based NC 공작기계의 소프트웨어 보간기 개발

양민양*, 홍원표**

Development of Software Interpolators for PC-based NC Machine Tools

Yang Min-Yang*, Hong Won-Pyo**

ABSTRACT

Increasing demands on precision machining of free-form surfaces have necessitated the tool to move not only with position error as small as possible, but also with smoothly varying feedrates. In this paper, linear, circular and spline interpolators were developed in reference-pulse type using PC. M_SAM and M_DSM were designed by the comparison and analysis of previous interpolation methods. Spline interpolator was designed to follow the free-form curves. To apply to the real cutting process, constant feedrate compensation and acceleration-deceleration compensation were conceived. Finally, its performance was tested using retrofitted milling machine. As a result, new interpolation algorithm is favorable in precision machining of free-form curves.

Key Words: PC-based NC, Interpolation(보간), Reference-Pulse Type(기준 펄스 방식), Retrofit(재구성), Spline Interpolation(스프라인 보간기)

1. 서론

18세기 산업혁명 시대부터 개발되기 시작한 공작기계는 1952년 수치제어 방식을 이용한 NC 공작기계의 등장으로 인하여 비약적인 발전이 있었다. 산업의 발달과 더불어 생산성 증가와 가공 정밀도 향상 등을 위한 공장 자동화가 진행되었고, 이를 위하여 NC 공작기계의 사용이 요구되었다.

NC 공작기계 사용의 증가는 상대적으로 이전에 사용하던 수동식 공작기계의 효율성을 격하시켜 공작기계의 교

체를 필요로 하게 되었다. 그러나, 기존의 공작기계를 NC 공작기계로 대체하는 것은 많은 비용을 필요로 한다. 이러한 경제적 어려움을 극복하고 필요로 하는 NC 공작기계의 성능을 갖게 하는 방안으로 수동식 공작기계를 NC 공작기계로 재구성하는 방법이 있다.

이는 수동식 공작기계와 NC 공작기계의 구조에서 주된 차이점인 이송구동부와 컨트롤러(controller)부만을 교체함으로써 가능하다.⁽¹⁾ 이러한 재구성에서 컨트롤러는 기계의 성능을 좌우하는 중요한 요소이다. 1980년대 마이크로프로세서의 눈부신 발전은 NC 공작기계의 컨트롤

* 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

** 한국과학기술원 기계공학과 대학원

러를 유연성이 좋고, 데이터 통신이 용이하며, 작업자가 쉽고 편리하게 사용 가능한 방향으로 발전시켰다.

공작기계의 컨트롤러부에 보편화된 개인용 컴퓨터를 사용함으로써 공작기계의 성능을 향상시키는 방안이 연구되고 있다.⁽²⁻³⁾ 기존의 공작기계 컨트롤러는 현대의 기계에 대하여만 작동하며 소프트웨어의 개발과 적용에 제한이 많았다. 이에 비해 개인용 컴퓨터를 공작기계의 컨트롤러로 사용함으로써 여러 종류의 공작기계에 적용이 가능하고, 새로운 소프트웨어의 개발 및 이의 적용이 용이하며, 사용자가 쉽고 간단하게 조작할 수 있는 이점을 얻을 수 있다.

NC 공작기계의 중요하고 공통적인 요구 사항은 공작물에 대해 상대적으로 공구가 원하는 경로로 이동하도록 테이블의 이동을 발생시키는 것이다. 이는 가공하고자 하는 형상을 나타내는 기준 신호를 발생시키는 부분과 발생된 기준 신호대로 기계가 동작하도록 제어하는 부분의 결합으로 가능하다. 기준 신호의 발생 방식으로는 연속적인 펄스열을 이용하는 기준 펄스 방식(reference-pulse type)과 2진값을 이용하는 샘플치 방식(sampled-data type)이 있다.⁽⁴⁾ 그리고, 주어진 형상을 보간하는 방법으로는 하드웨어 보간법과 소프트웨어 보간법이 있다. 이 중에서 소프트웨어 보간법은 펄스의 조작이 용이하므로 정확한 위치 제어가 가능하기 때문에 복잡한 형상의 보간도 프로그래밍만으로 가능하다.

그동안 주로 직선과 원호 형상의 가공에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다.⁽⁴⁻⁸⁾ 그러나 근래에는 자유곡면과 같은 복잡한 형상을 정밀하게 가공하는 것이 요구되고 있다. 이는 허용 오차 범위를 벗어나지 않는 연속적인 직선들의 가공⁽⁹⁻¹⁰⁾, 또는 증분 계단 보간(incremental step interpolation)을 이용한 가공 방법⁽¹¹⁻¹²⁾으로 수행해 왔다.

본 연구에서는 개인용 컴퓨터를 이용하여 기준 펄스 방식에서 직선, 원호, 스프라인 형상의 보간기를 개발하였다. 기준 펄스 방식에서 기존에 알려진 보간기의 성능을 비교하여 보다 개선된 M_SAM(Modified Stairs Approximation Method), M_DSM(Modified Direct Search Method) 방법을 고안하여 보간기 개발에 적용하였고, 보간 결과를 실제 가공에 바로 적용할 수 있도록 이송속도 보정 부분을 개발하였다. 그리고, 이를 재구성된 밀링머신에 적용하여 동시 2축의 PC-based NC 밀링 시스템을 구현하였다.

2. 밀링머신의 재구성

PC-based NC 밀링시스템을 구현하기 위해서 기존의 수동식 밀링머신을 재구성하였다. 기존의 기계요소들을 가능한 한 그대로 사용하기 위하여 동일한 기계 구조하에서 재구성은 주로 이송구동부와 컨트롤러부에서의 교체를 통해 행하였다.

기존의 수동식 밀링머신의 사양을 고려하여 이송모터의 필요한 용량을 결정한 후, DC 서보모터에 의하여 테이블이 이동하도록 이송모터를 장착하였다. 이송모터는 400Watt급으로 선정하였고, 모터드라이브와 같이 구입하였다. 테이블의 정확한 이송을 위해 볼스크류(ball screw)를 선정하여 수동식 공작기계의 리이드스크류(lead screw)와 교체하였고, 이송모터의 동력을 볼스크류에 전달하기 위해 커플링(coupling)을 선정하여 이송모터와 볼스크류 사이에 연결하였다. 그리고 이송모터를 테이블과 공작기계에 부착하기 위한 마운팅(mounting)을 설계하고 제작하였다. Fig.1은 재구성 밀링머신의 시스템 디자인이다.

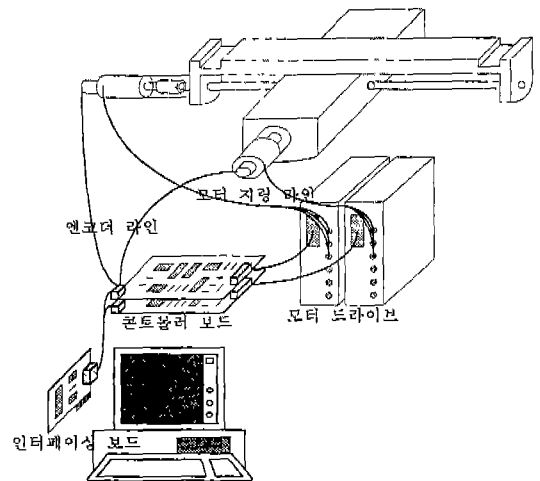


Fig. 1 System design of the retrofitted milling machine

위와 같이 기계요소들을 선정 및 제작한 후 조립하여 개인용 컴퓨터와 연결함으로써 2차원 밀링가공이 가능한 밀링시스템을 구성하였다. 이송모터의 정확한 구동을 위하여 컨트롤러를 제작하였다. 컨트롤 방식은 직렬식 지령 펄스방식을 사용하였다. 지령 펄스와 엔코더(encoder)펄

스를 업다운카운터에서 비교함으로써 이송모터의 위치를 제어하고, 엔코더에서 발생하는 펄스의 주파수 성분을 F/V컨버터(frequency to voltage converter)를 통과시켜 모터드라이브에 보냄으로써 이송속도를 제어하도록 하였다. 그리고, PC에서 수행한 결과를 콘트롤러에 전달하기 위해서 인터페이스 보드(interfacing board)를 제작하였다. PPI칩(programmable peripheral interface chip:i82C55)을 사용해서 모터의 회전 방향 및 펄스를 전기적인 신호로 변환하여 콘트롤러에 전달하도록 하였다. 콘트롤러와 모터 드라이브는 별도로 제작한 콘트롤 상자에 장착하였고, 인터페이스 보드는 PC내의 슬롯(slot)에 삽입하였다.

Table 1 Hardware specifications of the retrofitted machine

Items	Hardware spec.
Machine tool	Wells-Index 847
Spindle motor	not changed
Axis motor	DC servo motor
Control axis	2
Max. RPM	3000
steps/rev	2000
Max. speed (m/min)	15
BLU (μm)	2.5

Table 1은 앞에서 기술한 바와 같이 재구성한 밀링머신의 하드웨어 명세이다.

3. 직선, 원호 보간

원하는 형상의 보간 방식에는 연속적인 펄스열을 이용하는 기준 펄스 방식과 2진값을 이용하는 샘플치 방식이 있다. 기준 펄스 방식은 펄스의 발생을 통해 공작기계의 BLU(Basic Length Unit)만큼씩의 계속적인 이동을 얻어야 하기 때문에 펄스 발생 속도에 한계가 있지만, 자유 곡면과 같은 복잡한 형상도 정밀하게 얻을 수 있다. 기존의 기준 펄스 방식 보간 방법에는 SAM(Stairs Approximation Method), DSM(Direct Search Method), DDA(Digital Differential Analyzer), SPD(Smooth Pulse Distribution), SFG(Saita Function Generator) 등이 있다.

이중에서 SAM 방법은 X 또는 Y 방향으로 공작기계 BLU만큼씩의 계속적인 계단형 증가에 의해서, 그리고

DSM 방법은 이전의 이동 방향을 고려했을 때 가능한 세 방향의 이동 중 가장 오차가 작은 방향을 계속적으로 택함으로써 원하는 형상의 보간을 하는 방법이다.(Fig.2)

새로 고안한 M_SAM, M_DSM 방법에서는 이미 정해진 점에서의 접선의 기울기 절대값에 따라 1보다 작은 경우에는 X축 이동점과 대각선 이동점, 그렇지 않을 경우에는 Y축 이동점과 대각선 이동점 중에서 다음 보간점을 택하도록 하였다. Fig.2는 새로 고안한 보간법과 기존 보간법의 차이를 보인다.

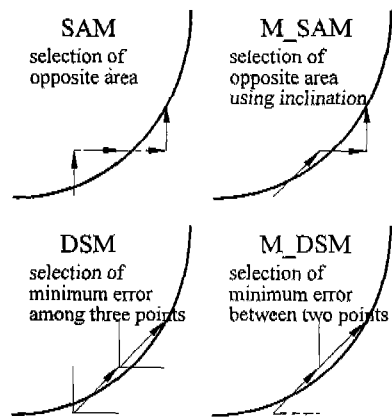


Fig. 2 Interpolation methods

이렇게 함으로써 SAM에서 X축과 Y축으로의 이동을 두번 거쳐야 하는 부분을 M_SAM에서는 기울기에 따라 한 번에 대각선 방향으로 이동하게 되었고, DSM에서 세 점 중에서 선택하던 부분을 M_DSM에서는 두 점 중에서 최소오차점을 선택하게 되었다. 그 결과 기존의 방법보다 빠르게 보간을 수행할 수 있었다.

Table 2 Equations in the linear and the circular interpolation

	Linear interpolation	Circular interpolation
Basic equation	$D_{i,j} = X_i Y_j - Y_i X_j$	$D_{i,j} = X_i^2 + Y_i^2 - R^2$
Movement of ΔX	$D_{i+1,j} = D_{i,j} + DX_i$	$D_{i+1,j} = D_{i,j} + DX_i$
Movement of ΔY	$D_{i,j+1} = D_{i,j} + DY_j$	$D_{i,j+1} = D_{i,j} + DY_j$
Movement of ΔX & ΔY	$D_{i+1,j+1} = D_{i,j} + DX_i + DY_j$	$D_{i+1,j+1} = D_{i,j} + DX_i + DY_j$
where	$DX_i = -Y_i, DY_j = X_j$	$DX_i = 2X_i + 1, DY_j = 2Y_j + 1$

Table 2는 직선과 원호 보간시 사용하는 식들이다. 보다 빠른 보간을 수행하기 위해 본래의 직선과 원의 방정식 대신 간단화 된 식을 이용한다. 그리고, 모든 상수값들

을 공작기계 BLU의 배수로 표현하여 정수 계산으로 처리한다. 시작점에서의 판별값 D는 0이고, 반복 수행 때마다 이전의 D와 Table 2의 식으로부터 계산되는 증분치 DX 또는 DY를 이용하여 새로운 D를 얻는다. Table 2에서 X_0 와 Y_0 는 직선의 끝점 좌표이고, R은 원의 반경이다.

Table 3 Maximum feedrate and the circular interpolation error(386-33PC)

	Maximum feedrate		Circular interpolation error	
	linear interpolation	circular interpolation	mean error	maximum error
SAM	3.43 m/min	3.33 m/min	0.392587	0.999875
M_SAM	5.26 m/min	3.69 m/min	0.302568	0.999500
DDA	2.33 m/min	2.04 m/min	0.306079	0.999500
DSM	2.47 m/min	1.88 m/min	0.225151	0.496906
M_DSAM	4.69 m/min	2.79 m/min	0.225151	0.496906

사용하는 보간 방법에 따라 얻을 수 있는 최대 보간속도와 오차가 다르다. 386-33PC를 이용하여 실제로 여러 보간법에 대해 프로그램을 작성하고 이를 비교하였다. 그 결과는 Table 3과 같고, 직선과 원호 보간시의 최대 이송속도와 원호보간시의 오차를 나타내었다. 재구성된 밀링머신의 BLU는 2.5um이고, 오차 1은 1BLU를 의미한다. 최대 이송속도는 M_SAM에서, 최소 오차는 M_DSAM에서 각각 얻을 수 있었다.

4. 스플라인 보간

예전에는 주로 직선과 원호가 조합된 형상에 대한 가공이 필요하였으나, 근래에는 자유곡선과 같은 복잡한 형상을 정밀하게 가공하는 것이 요구되고 있다. 지금까지 자유곡선의 가공은 주로 허용오차를 벗어나지 않는 직선들의 연속적인 가공으로 수행해왔다. 그런데 이렇게 할 경우 직선 가공이 수행될 때마다 테이블이 일시적 정지, 가속, 감속을 반복하므로 공작물 표면에 영향을 미치게 되며, 원하는 이송속도를 제대로 얻을 수가 없다. 또한 부정확하게 가공이 이루어지고, 가공속도 방향이 급격히 변화하며, 허용 오차가 작을 때에는 직선의 양이 많으므로 시간이 많이 소요된다. 이러한 문제점의 발생을 해결하기 위해서 형상 모델링에서 사용하는 곡선 모델을 이용한 보간법이 연구되고 있다.⁽⁹⁻¹²⁾

본 연구에서는 지나가야 하는 몇개의 점입력에 대해 여러 곡선 모델 중에서 3차 퍼거슨(Ferguson) 곡선을 이용하여 자유곡선을 정의하고, 공작기계의 BLU단위로 앞

의 직선 및 원호 보간에 적용했던 SAM, DSM, M_SAM과 M_DSAM 방법을 사용하여 퍼거슨 곡선을 추종하도록 스플라인 보간기를 개발하였다.

일반적으로 원하는 형상의 보간을 수행하기 위해서는 한 축에서의 값을 알고 있을 때 다른 축의 값을 얻을 수 있어야만 한다. 그런데 3차 퍼거슨 곡선에서는 매개변수를 통해서만 축의 값이 얻어진다. 따라서 한 축에서의 값으로부터 3차식을 풀어 매개변수 값을 구한 다음 다른 축의 값을 얻어야 한다. 이를 해결하기 위해 Newton-Rapson법을 사용하였다.

그리고 곡선 위 임의의 점에서 보간이 진행되는 동안 보간점의 선택시 요구되는 오차는 접선의 기울기 절대값이 1보다 작은 경우에는 Y축으로의 차이를, 그렇지 않은 경우에는 X축으로의 차이를 이용하도록 함으로써 최단거리를 구할때보다 계산 시간을 단축하였다. 이를 정리하면 Table 4와 같다.

Table 4 Equations in the spline interpolation

	Absolute value of tangent < 1	Absolute value of tangent > 1
Basic equation	$D_{i,j} = Y - Y_j$	$D_{i,j} = X - X_j$
Movement of ΔX	$D_{i,j+1} = D_{i,j} + DX_i$	
Movement of ΔY		$D_{i,j+1} = D_{i,j} + DY_j$
Movement of ΔX & ΔY	$D_{i,j+1} = D_{i,j} + DX_i - BLU$	$D_{i,j+1} = D_{i,j} + DY_j - BLU$
where	$DX_i = X_{i+1} - X_{i-1}$	$DY_j = Y_{j+1} - Y_{j-1}$

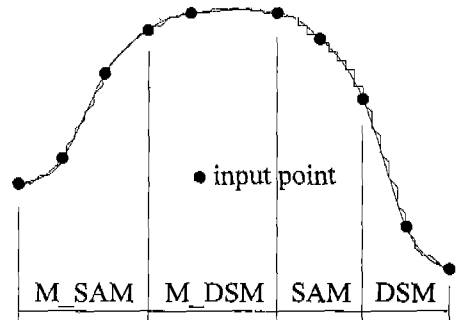


Fig.3 Example of the spline interpolation (visible step)

Fig. 3은 스플라인 보간의 예이다. 여러 보간법들의 결과를 동시에 보여 주기 위해 부분별로 보간법을 달리하였다. 또한 보간법에 따라 어떻게 곡선을 추종하는지 보이기 위해 단위 이동량을 크게 하였다. 정확도의 차이는 있지만 자유곡선 형상을 잘 추종함을 보인다.

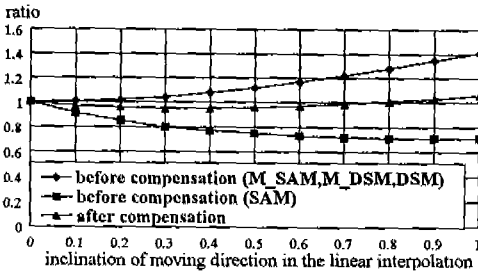
Table 5 Maximum interpolation speed in the M_DSM (Pentium-90)

line	arc	spline
20.7 m/min	17.1 m/min	4.0 m/min

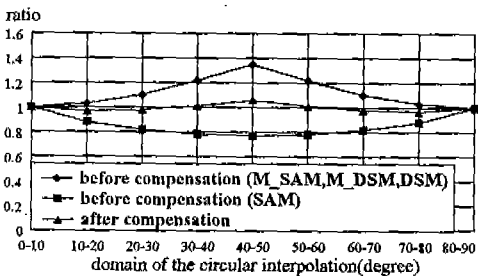
Table 5는 Pentium-90을 사용했을 때 M_DSM의 직선, 원호, 스플라인 보간시 최대 속도이다. 스플라인 보간 일 경우에는 복잡한 계산으로 느린 보간 속도를 보인다.

5. 이송속도 보정

보간에서 얻어지는 결과를 그대로 공작기계에 전달해 가공을 할 경우 원활한 공구와 공작물의 상대운동을 얻을 수 없다. 이는 보간시 이송속도가 일정하게 유지되지 않음과 가감속 조정의 없음에 기인한다. 이송속도가 일정하게 유지되지 않는 것은 대각선 방향으로 보간이 이루어질 경우에는 X 또는 Y 한 축만으로 보간이 이루어질 경우에 비해 같은 시간 동안 $\sqrt{2}$ 배만큼 더 이동하게 되기 때문이다. 또한 가감속의 조정이 없음으로 인해 기계 동작에 무리가 발생한다.



(a) Linear interpolation



(b) Circular interpolation

Fig. 4 Constant feedrate compensation results of the linear and the circular interpolation

Fig. 4는 직선과 원호 보간시의 이송속도 차이를 나타낸다. 직선 보간시에는 직선의 기울기가 0일 때의 보간속도를, 원호 보간시에는 보간 각도가 0-10도일 때의 보간속도를 기준으로 상대적인 비율(ratio)을 표시하였다. 직선 보간시에는 최대 41%, 원호 보간시에는 최대 29%의 차이가 발생한다. 이를 해결하기 위해서 M_SAM, M_DSM, DSM인 경우에는 대각선 방향으로의 이동 수치를, SAM인 경우에는 X 또는 Y축 방향으로의 이동 수치를 미리 정해진 값과 비교하여 보간시 사용하는 기준 클럭(reference-clock) 하나를 무시하는 방법을 사용하였다. 여러 정해진 기준 클럭수에 대한 테스트를 통해서 M_SAM, M_DSM, DSM인 경우에는 3, SAM인 경우에는 2를 선택하였다. Fig. 4는 이송속도 일정 보정의 결과도 함께 나타낸다. 이송속도 일정 보정을 통해 보정 후에 상대적인 이송속도의 비율이 1에 접근함을 알 수 있다.

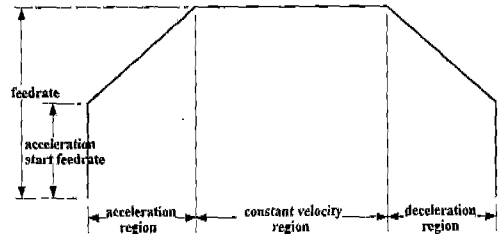


Fig. 5 Acceleration-deceleration compensation

가감속을 수행하기 위해서 이동의 시작과 끝부분에서 어느 정도 구간 동안에는 보간 내용의 계산 후 별도의 시간 지연 부분을 통과하여 공작기계에 전달되도록 하였다. 가속 구간에서는 지연 시간을 점차로 감소시키고, 감속 구간에서는 증가시킴으로써 해결하였다. Fig. 5는 가감속 보정을 나타낸다.

6. 소프트웨어 보간기

앞의 내용을 바탕으로 PC를 이용하여 직선, 원호, 스플라인 보간기를 개발하였다. 실제 가공은 형상의 보간과 이송속도 및 가감속의 보정 후 온라인(on-line)으로 인터페이스 보드를 통해 이송 모터 구동부에 전달함으로써 수행하도록 하였다. Fig. 6은 보간기의 흐름도(flowchart)이다.

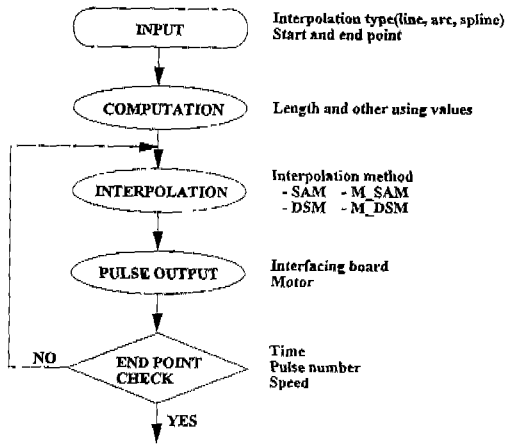


Fig. 6 Flowchart of the interpolator

Table 6 Input data for the linear, the circular and the spline interpolator

	Input data
Linear interpolation	(<i>l</i>), displacements
Circular interpolation	(<i>pcw</i> or <i>pccw</i>), displacements and center coordinates or (<i>dcw</i> or <i>dccw</i>), degrees of start and end points
Spline interpolation	(<i>s</i>), number and coordinates of points

Table 6은 각 보간기에서 입력 데이터의 양식이다. 직선 보간일 경우에는 *l*로, 원호 보간일 경우에는 *pcw*, *pccw*와 *dcw*, *dccw*로, 스플라인 보간일 경우에는 *s*로 구분한다. 각 보간기에 따라 필요로 하는 데이터를 입력하고, 이때 좌표값은 상대좌표값으로 한다. Fig. 7은 입력 데이터와 보간 결과의 예이고, Fig. 8은 실제 가공한 가공물이다.

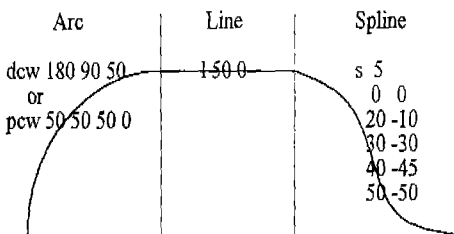


Fig. 7 Input data and interpolation result(high resolution)

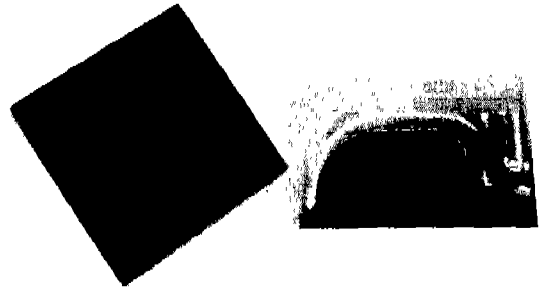


Fig. 8 Linear, circular and spline shaped workpieces

7. 결론

본 연구에서는 기존의 수동식 공작기계를 PC-based NC 공작기계로 재구성하였다. 그리고, 이의 구동을 위해 PC를 이용한 소프트웨어 보간 방법으로 기존의 보간법들을 비교 연구하여 M_SAM, M_DSM을 고안하였다. 소프트웨어 보간의 장점인 정확한 위치 제어 가능에 착안해 이를 직선, 원호 그리고 스플라인 보간에 적용하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) M_SAM과 M_DSM 보간법의 고안으로 기존의 SAM, DSM, DDA 보간법에 비해 향상된 성능을 얻을 수가 있었다.
- (2) 이송속도 일정 보정과 가감속 보정 부분의 소프트웨어 구현으로 보간내용을 실제 가공에 적용하였다.
- (3) 새로운 스플라인 보간기의 개발로 자유곡선의 정확하고 유연한(smooth) 가공이 가능해졌다.
- (4) 이를 재구성된 공작기계에 적용함으로써 PC-based NC 공작기계로의 성능 향상을 얻을 수 있었다.

참고 문헌

1. Shihuh Jer Huang & Cheng Fa Lee, "Servo-Drive Systems for Milling Machine Retrofit Application", Int.J. Mach. Tools Manufact., Vol.33, No.3, pp.449-463, 1993.
2. C.Gadsby, S.Balakrishnan & N.Popplewell, "A Micro Computer-Based Controller for Milling Machine", Int.J. Adv. Manuf. Technol., pp.168-181, 1989.
3. Mohsen El Haufsi & Sencer Yeralan, "Computer Control System for a Metal Cut-

- ting Machine". Computer & Industrial Engineering, Vol.23, Nos.1-4, pp.345-348, 1992.
4. Y.Koren & O.Masory, "Reference-Pulse Circular Interpolators for CNC Systems", Trans. ASME J. Eng. for Indust., Vol.103, No.1, pp.131-136, 1981.
 5. B.W.Jordan, W.J.Lenon & B.D.Holm, "An Improved Algorithm for Generation of Non-parametric Curves", IEEE Trans. Comp., Vol.C-22, No.12, pp.1052-1060, 1973.
 6. P.E.Danielsson, "Incremental Curve Generation", IEEE Trans. Comp., Vol.C-19, No.9, pp.783-793, 1970.
 7. C.Yuan, "The Optimal Method of Interpolation Operation in NC-Feeding According to the Closet Distance", Int.J. Mach. Tools Manufact., Vol.27, No.2, pp.155-165, 1987.
 8. Y. Suenaga, T. Kamae & T. Kobayashi, "A High-Speed Algorithm for the Generation of Straight Lines and Circular Arcs", IEEE Trans. Comp., Vol.c-28, No.10, pp.728-736, 1979.
 9. Daniel C H Yang & Tom Kong, "Parametric Interpolator versus Linear Interpolator for Precision CNC Machining", CAD, Vol.26, No.3, pp.225-233, 1994.
 10. J.T.Huang & D.C.H.Yang, "A Generalized Interpolator for Command Generation of Parametric Curves in Computer-Controlled Machines", Jap./USA Symp. Flexible Automation, Vol.1, pp.393-399, 1992.
 11. J.G.Gan & T.C.Woo, "Error-Free Interpolation of Parametric Surfaces", Trans. ASME J. of Eng. for Indust., Vol.114, pp.271-276, 1992.
 12. D.Kiritsis, "High Precision Interpolation Algorithm for 3D Parametric Curve Generation", CAD, Vol.26, No.11, pp.850-856, 1994.