

머시닝센터 장착형 연마로봇의 성능 향상 및 연마 성능 평가

이민철*, 조영길**, 이만형*

Evaluation of Polishing Performance Using The Improved Polishing Robot System Attached to Machining Center

Min Cheol Lee*, Young Gil Cho** and Man Hyung Lee*

ABSTRACT

To automate the polishing process, a polishing robot with two axes which is attached to a machining center with three axes has been developed by our previous research. This automatic polishing robot is able to keep the polishing tool normal to the curved surface of die and is able to maintain a constant pneumatic pressure. Therefore, in the case of a curved surface die, the surface roughness to be polished by the system with five axes is improved superior than the surface by a three-axis machining center. However, because the polishing robot was big and heavy, a polishing workspace was limited and then it was difficult to attach the robot to machining center.

In this study, the smaller and lighter polishing robot than the previous has been designed to improve defects due to the magnitude and weight of the robot. And the sliding mode control is applied to a polishing robot to improve the tracking performance. To obtain switching parameters of sliding mode control, the signal compression method is used. Code separation program to separate the data for a three-axis machining center and a two-axis polishing robot from a five-axis NC data is improved for users to check conveniently the separated trajectory and to handle many data by using the graphic user interface. To evaluate the polishing performance of the developed robot, the polishing experiment for shadow mask was carried out. The result shows the automatic polishing robot has a good trajectory tracking performance and obtains a good polished workpiece efficiently under recommended polishing conditions.

Key Words : Polishing Robot(연마로봇), Machining Center(머시닝센터), Sliding Mode Control(슬라이딩 모드 제어), Curved Surface Die(곡면금형), Signal Compression Method(신호압축법), Code Separation Program(코드 분리 프로그램), Shadow Mask(쉐도우 마스크), Polishing Performance(연마 성능)

1. 서론

최근 다품종 소량생산의 추세로 인한 금형의 수요가 증가함에 따라 능률적인 금형 가공의 요구가

증가되고 있다. 금형의 가공 공정중에서 형상 가공의 경우는 NC공작기계 및 CAD/CAM의 발전으로 말미암아 자동화가 많이 진전되고 있으나, 금형 품질에 직접적인 영향을 미치는 연마공정은 자동화가

* 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소,
정밀정형 및 금형가공 연구센터

** (주) 삼성전기

비전하여 대부분 경험적 지식에 의존하는 숙련공의 수작업으로 수행되고 있다. 그러나, 이와 같은 연마 공정은 작업 시 발생하는 먼지, 소음, 진동 등으로 인한 작업자들의 기피현상으로 기술인력이 점차 줄어들고 있는 실정이므로 이에 대한 자동화는 절실히 요구되고 있다^(1,2). 연마 공정의 자동화를 위해 국내의 경우 수직 다관절 로봇을 이용한 연마전용 시스템이 개발되었으며, 외국의 경우 5축 전용시스템이 개발되었다⁽³⁾. 그러나, 수직 다관절 로봇의 형태로 개발된 시스템은 연마력에 대응하는 강성이 문제가 되고 5축 전용시스템의 경우 구축비용이 고가인 문제점이 있다.

선행연구에서는 이런 점들을 고려하여 3차원 곡면의 가공에 적합한 것으로 알려져 있는 5축 연마 시스템을 구현하기 위해 3축 머시닝센터에 2자유도를 추가하여 연마 공구가 임의의 자유곡면과 항상 법선 방향을 유지하며 일정한 연마력으로 연마할 수 있는 머시닝센터 장착형 곡면 규형 연마용 로봇 시스템을 개발하였다⁽⁴⁾. 개발된 5축 연마 시스템에 의해 연마 작업을 할 경우 충분한 자유도의 부여로 인하여 공작물의 준비대체 시간과 고정구의 제작에 소요되는 시간이 감소되고, 인적비용의 절감 효과를 기대할 수 있다. 또한 유효가동울의 증대 및 연속부인운전을 가능하게 하고, 가공 정밀도의 향상 및 복잡한 규형 연마가 용이할 것으로 예상된다. 또한 이 장치는 CAD/CAM 시스템에 의하여 생성된 NC 프로그램 자료를 이용할 수 있으며, 산업현장에서 보편화된 3축 머시닝센터를 이용하여 5축 가공효과를 얻을 수 있다는 점이 큰 장점이라 할 수 있다.

그러나 선행 연구에서 개발된 2축 연마로봇의 경우 C축을 메가토크 모터를 이용하여 구성하였기 때문에 크기와 무게로 인해 작업영역의 제한과 장착시의 어려움이 있었다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해소하고자 2축 모두 하모닉 드라이버가 내장된 서보모터를 이용하여 연마로봇을 소형 경량화시켜 연마성능을 개선시키고자 한다. 한편 연마 공구는 연마면에 수직한 방향으로 일정한 힘을 가하면서 연마 작업을 수행해야 하므로 선행연구에서는 부하 변동 등 외란에 강인한 슬라이딩 모드 제어 알고리즘^(4,6)을 적용하였다. 그러나 시스템의 동특성을 파악하지 않고 전환 제어 입력의 제어 계인을 선정함으로써 축 A와 C에서는 채터링이 발생하였다. 특히 축 C를 구성하는 메가토크 모터의 경우에

는 직접 구동형 모터이므로 하모닉 모터에 비해 제어 성능이 민감하여 채터링이 더욱 크게 발생하였다. 따라서 본 연구에서는 슬라이딩 모드의 전환 파라미터의 경계값을 선정하기 위해서 신호압축법^(7,8)을 이용하여 필요한 시스템 파라미터를 구하고, 채터링의 발생에 영향을 주는 속도항을 보상한 슬라이딩 모드 제어를 제안하여 적용한다.

개발된 시스템은 3축 머시닝센터 제어기와 2축 로봇 제어기가 독립적으로 존재하므로 5축 연마 효과를 구현하기 위해서는 CAM 시스템에서 생성된 5축 가공데이터를 머시닝센터 코드와 2축 로봇의 궤적 입력으로 분리해야 한다. 이에 본 연구에서는 사용자가 편리하게 사용할 수 있는 GUI(Graphic User Interface) 환경에서 방대한 데이터를 분리할 수 있는 분리 프로그램을 개발하였다. 또한 구성된 시스템을 이용하여 연마성능을 평가하고 최적의 효율적인 연마 조건을 제시하기 위하여 가공물의 표면 거칠기에 영향을 미치는 주축의 회전속도 및 이송속도, 가공 시 연마면에 미치는 수직가공력, 가공 횟수 등의 가공조건⁽⁹⁾을 다양하게 설정하여 연마 실험을 수행하였다.

2. 자동 연마 시스템의 구성

2.1 2축 연마로봇의 구조 개선

곡면 규형의 연마를 위해서는 기본적으로 연마 기구가 5 자유도 이상의 구조를 가져야 한다. 3 자유도의 구조를 가지는 연마기구에 의해 곡면 규형을 연마할 경우에는 곡면의 경사가 급격할 수록 연마숫돌이 곡면과 접촉하는 부분이 좁아지므로 균일한 연마가 곤란하게 된다. 또한 숫돌이 접촉면에 가하는 수직가공력이 편중되고 숫돌의 회전으로 인해 원하는 곡면보다 깊게 연마하는 현상이 발생할 수 있기 때문에 양호한 면을 얻을 수 없게 된다. 그러나 5축 연마기구를 이용할 경우 3축 기구에서는 곡면의 법선 방향으로의 접근 불가능한 곡면에 대해서도 자세제어를 통해 보다 유연하게 대처할 수 있다.

선행 연구에서는 이러한 구조적인 문제점을 고려하면서 공작기계의 강성을 충분히 이용할 수 있는 5 자유도의 머시닝센터 장착형 연마로봇 시스템을 제작하였다⁽⁵⁾.

머시닝센터에 장착되는 2축 연마로봇의 개선된 구조는 Fig. 1과 같다. A축과 C축의 구동을 위한

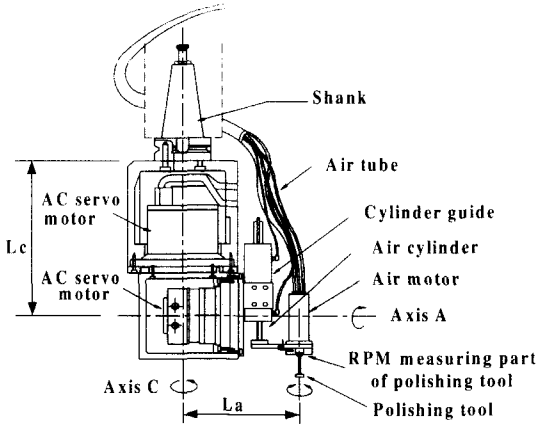


Fig. 1 Structure of polishing robot with two degree of freedom

AC 모터와 연마 스톨의 회전력을 발생하기 위한 공압 모터, 연마스톨이 연마면에 일정한 압력을 유지하기 위한 공압 실린더 그리고 로봇을 머시닝센터에 고정시키기 위한 생크(shank)로 구성되어 있다.

개발된 연마로봇의 작업영역은 3축 머시닝센터로만 작업을 할 경우의 작업영역보다 로봇의 크기에 따라 감소하게 되므로 로봇의 소형화가 요구된다. 선행 연구에서는 C축의 경우 감속기가 없는 직접구동형(direct drive type) 메가토크 모터(megatorque motor)를 사용하였기 때문에 제어입력이 없을 경우 브레이크 작용을 할 수 없었고, 모터의 크기로 인해 작업 영역(workspace)이 축소되었으며, 무게로 인해 머시닝센터에 장착 작업 시 어려움이 있었다. 이러한 구조적인 점을 고려하여 C축의 모터를 A축과 동일한 하모닉 드라이브가 내장된 서보모터로 대체함으로써 2축 연마로봇의 무게를 6.6 kg 감소시켜 장착 작업을 용이하게 하였으며, 작업영역도 연마로봇의 길이 Lc와 La를 줄임으로 해서 Fig. 2와 같이 확장되었다. Table 1은 설계 변경 전과 후의 연마로봇의 길이 및 무게 변화량을 나타낸다.

2.2 자동 연마 시스템의 구성

머시닝센터와 로봇을 포함한 연마 시스템의 전체 구성은 Fig. 3과 같다.

호스트 컴퓨터는 연마궤적을 생성하고, 생성된 연마궤적을 각각의 제어기에 전송한다. DSP 보드

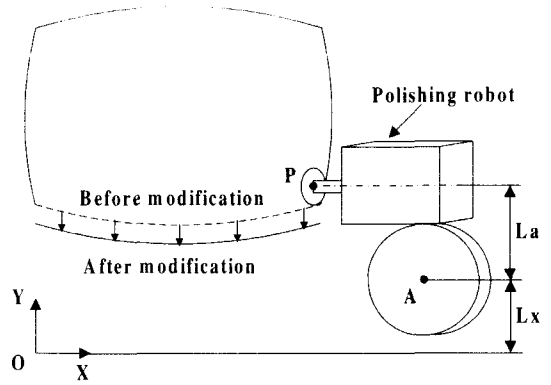


Fig. 2 Change of workspace

Table 1 Change of length and mass of the improved polishing robot

	Before	After	Changes
La (mm)	205	170	35
Lc (mm)	255	216	39
Mass (Kg)	21.8	15.2	6.6

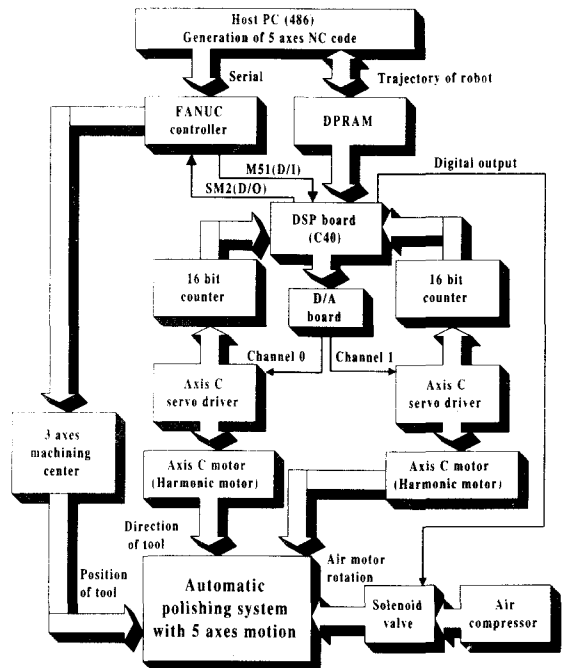


Fig. 3 Schematic diagram of polishing robot system

는 카운터와 D/A에 연결되어 각 축의 모터를 제어함과 동시에 솔레노이드 밸브를 on/off하여 공압 모터를 제어한다. 또한 연마로봇과 머시닝센터의 동기화를 위해 DSP보드는 머시닝센터의 M51, SM2 신호단자와 연결되어 동기신호를 주고 받는다.

개발된 5축 자동 연마로봇 시스템을 이용한 연마작업 순서는 다음과 같다. 먼저 호스트 컴퓨터에서 NC 프로그램을 이용하여 곡면 규형에 대한 5축 NC 데이터를 생성하고, 데이터 분리 프로그램을 사용하여 머시닝센터용 3축 NC 데이터와 연마로봇용 궤적데이터로 분리하게 된다. 분리된 3축 머시닝센터의 위치데이터는 직렬통신에 의해 머시닝센터로 전송되고 2축 연마로봇의 자세 데이터는 DPRAM(Dual Port RAM)을 통하여 연마로봇의 제어기에 전송된다. 이때 연마작업에 필요한 수직가공력과 회전수를 얻기 위해서 공압 장치의 정밀레귤레이터의 밸브를 조절하여 실린더의 양단이 일정한 압력차를 유지하도록 설정한다. 그리고 로봇의 A축이 머시닝센터의 X축의 양의 방향과 평행하게 되도록 하고, 연마공구가 C축의 음의 방향과 평행하도록 각각 원점복귀 작업을 수행한 후, 공압 모터를 구동하여 일정한 회전수를 유지하게 한다. 끝으로 연마공구가 연마면에 수직이 되도록 제어하고 공압 실린더에 의해 연마공구가 연마면에 접촉하도록 한 후 연마면에 수직한 방향으로 일정한 힘으로 누르면서 연마작업을 수행해 나간다. 연마작업을 수행하는 동안에는 고속의 신호처리가 가능한 DSP(digital signal processor) 보드에 의해서 머시닝센터의 M51과 SM2 코드를 이용하여 머시닝센터와 동기화를 이루면서 연마로봇 제어를 수행한다.

3. 연마로봇의 슬라이딩 모드 제어

연마로봇에 의한 연마 공정 시 연마 공구의 회전력, 연마력 등의 외란에 의해 로봇의 위치결정 정도가 떨어지고 가공물의 표면 거칠기에 악영향을 줄 수 있다. 따라서 선행연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해서 기존의 산업현장에서 많이 사용되는 비례 미분 제어 대신에 슬라이딩 모드 제어 알고리즘⁽⁴⁻⁶⁾을 적용하였다. 그러나 시스템의 동특성을 파악하지 않고 절환 제어 입력의 제어 계인을 선정함으로써 축 A와 C에서는 채터링이 발생하였다. 따라서 본 장에서는 채터링의 발생에 영향을 주는 속도항을 보상한 슬라이딩 모드 제어를 제안

하고, 슬라이딩 모드의 절환 파라미터의 경계값을 선정하기 위해서 신호압축법^(7,8)을 이용하여 필요한 시스템 파라미터를 구한다.

3.1 슬라이딩 모드 제어

연마로봇의 각 관절 서보계의 운동방정식에서 나타나는 관성항의 비대각 요소, 원심력, 코리올리력 등의 비선형 요소를 전부 외란으로 간주하여 변수 F_i 로 두면 연마로봇의 전체 운동방정식은 다음과 같이 간단히 기술된다.

$$J_i \ddot{\theta}_i + B_i \dot{\theta}_i + F_i = k_i u_i \quad (1)$$

여기서, J_i , B_i , k_i , u_i 는 각각 등가관성모멘트, 등가점성감쇠계수, 토크상수 및 제어입력을 나타낸다.

연마로봇이 슬라이딩 모드 상에 존재하도록 하는 절환파라미터를 유도하기 위해 로봇의 i 번째 관절의 목표각도, 각속도를 각각 θ_{di} , $\dot{\theta}_{di}$ 로 두고 측정된 각도 및 각속도를 각각 θ_i , $\dot{\theta}_i$ 로 두면 그 추종오차와 오차의 속도인 e_i 와 \dot{e}_i 를 상태로 하는 오차상태공간 상에서 각축에 대하여 슬라이딩 모드가 발생하는 절환선은 다음과 같이 정의한다.

$$s_i = c_i e_i + \dot{e}_i \quad (2)$$

비선형 성분을 외란으로 가정하였으므로 외란으로 간주된 항들에 의해서 슬라이딩 모드의 존재 조건을 벗어나는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 실제 외란의 영향을 억제하면서 슬라이딩 모드 존재 조건을 만족시키기 위한 제어 입력을 다음과 같이 정의한다.

$$u_i = \phi_{ai} e_i + \phi_{\dot{a}i} \dot{e}_i + \phi_{fi} \quad (3)$$

식 (3)에서 $\phi_{\dot{a}i}$ 항은 원심력과 코리올리력 등에 대한 보상항이며 ϕ_{fi} 는 외란에 대한 보상항이다.

가공면의 곡률에 의해 결정되는 $\ddot{\theta}_{di}$ 와 $\ddot{\theta}_{di}$ 를 외란항에 포함시키면 슬라이딩 모드 존재 조건식과 절환 파라미터의 경계값은 각각 다음과 같다.

$$s_i \dot{s}_i = s_i (c_i \dot{e}_i + \ddot{e}_i) \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 &= s_i \left\{ c_i \dot{e}_i + \frac{k_i}{J_i} u_i - \frac{B_i}{J_i} (\dot{e}_i + \dot{\theta}_{di}) - \frac{F_i}{J_i} - \ddot{\theta}_{di} \right\} \\
 &= s_i \left\{ c_i \dot{e}_i + \frac{k_i}{J_i} \psi_{ai} \dot{e}_i + \frac{k_i}{J_i} \psi_{\beta i} \dot{e}_i + \frac{k_i}{J_i} \psi_{fi} - \frac{B_i}{J_i} \dot{e}_i - \frac{F_i}{J_i} \right\} \\
 &= s_i \dot{e}_i \left(\frac{k_i}{J_i} \psi_{ai} \right) + s_i \dot{e}_i \left(c_i + \frac{k_i}{J_i} \psi_{\beta i} - \frac{B_i}{J_i} \right) \\
 &\quad + s_i \left(\frac{k_i}{J_i} \psi_{fi} - \frac{F_i}{J_i} \right) < 0
 \end{aligned}$$

$$\text{단, } \overline{F}_i = F_i + \frac{B_i}{J_i} \dot{\theta}_{di} + \ddot{\theta}_{di}$$

$$\begin{cases} \frac{k_i}{J_i} \psi_{ai} > 0 & \text{if } s_i \dot{e}_i < 0 \\ \frac{k_i}{J_i} \psi_{ai} < 0 & \text{if } s_i \dot{e}_i > 0 \end{cases} \quad (5a)$$

$$\begin{cases} c_i + \frac{k_i}{J_i} \psi_{\beta i} - \frac{B_i}{J_i} < 0 & \text{if } s_i \dot{e}_i > 0 \\ c_i + \frac{k_i}{J_i} \psi_{\beta i} - \frac{B_i}{J_i} > 0 & \text{if } s_i \dot{e}_i < 0 \end{cases} \quad (5b)$$

$$\begin{cases} \frac{k_i}{J_i} \psi_{fi} - \frac{F_i}{J_i} < 0 & \text{if } s_i > 0 \\ \frac{k_i}{J_i} \psi_{fi} - \frac{F_i}{J_i} > 0 & \text{if } s_i < 0 \end{cases} \quad (5c)$$

식 (5)에 의하면 각축의 절환 파라미터는 매니플레이터의 자유도와는 관계없이 $J_i, B_i, k_i, \overline{F}_i$ 의 절대값의 최대값을 알면 용이하게 구해짐을 알 수 있다. 여기서 미지 파라미터인 J_i, B_i 는 신호압축법^(7,8)에 의해 구해 질 수 있다.

3.2 절환파라미터의 선정

계의 동특성으로부터 비선형요소를 제외한 선형요소의 미지 파라미터를 추정할 수 있는 방법으로 신호압축법이 알려져 있다^(7,8). 신호압축법을 이용하면 선형요소와 비선형요소의 응답을 분리할 수 있으므로 선형요소의 임펄스 응답만을 얻을 수 있다. 임펄스 응답을 이용해 선형요소의 미지 파라미터를 근사적으로 구할 수 있고, 측정하고자 하는 비선형시스템을 선형으로 가정한 모델식의 임펄스 응답과 신호압축법에 의해 구한 선형요소만의 임펄스 응답간의 상호상관계수를 구하여 그 값이 최대가 될 때의 미지 파라미터가 참값이 되도록 추정하였다. 매니플레이터에 시험신호를 증폭해서 입력할 경우 계가 불안정하게 되므로, 비례제어부프를 이

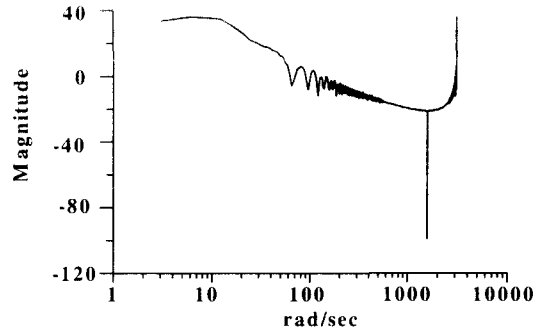


Fig. 4 Response of axis A

Table 2 System parameters of robot

	ω_{ni} (rad/sec)	ξ_i	J_i (Kg m ²)	B_i (Kg m ² /s)
Axis A	12	0.4	0.0114	0.10944
Axis C	12	0.1	0.0991	0.23784

Table 3 Switching parameters for sliding mode

	c	ψ_a	ψ_β	M_1	M_2
Axis A	5	-11.04	-0.4	1	0.5
Axis C	8	0	-4.6	4	1

용해 그 결과를 측정하였다. 이 때 입출력 전달함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 G(s) &= \frac{K_{pi} k_i}{J_i s^2 + B_i s + K_{pi} k_i} \\
 &= \frac{\omega_{ni}^2}{s^2 + 2\xi_i \omega_{ni} s + \omega_{ni}^2}
 \end{aligned} \quad (6)$$

단, K_{pi} ; i 관절에 대한 비례 계인

Fig. 4: 신호압축법에 의한 2축 인마로봇의 A축에 대한 출력파형을 압축하고, 비선형요소를 제거한 파형을 Bode 선도로 나타낸 것이다. 이것을 이용하여 시스템 파라미터인 J_i 와 B_i 를 구할 수 있다. 신호압축법에서 구한 인마로봇의 등가관성모멘트 J_i 와 등가점성계수 B_i 는 Table 2와 같다. J_i 와 B_i 를 이용하여 식 (5)에 의해 슬라이딩 모드 존재 조건을 만족하는 절환 파라미터의 한계치를 구할 수 있다. Table 3은 실험에서 사용한 절환 파라미터 값

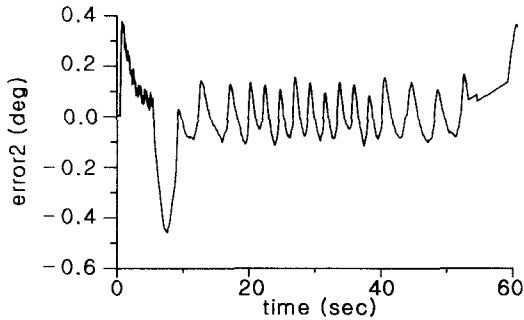


Fig. 5 Trajectory error of axis A by PD control

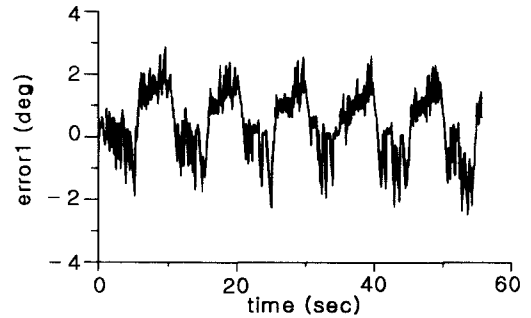


Fig. 6 Trajectory error of axis C by PD control

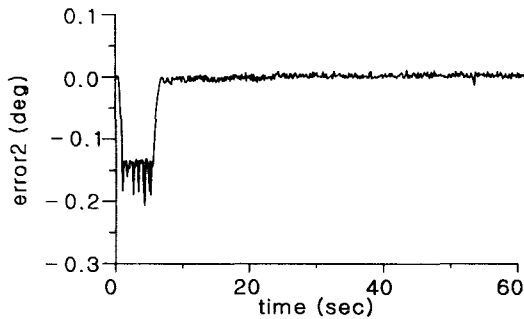


Fig. 7 Trajectory error of axis A by sliding mode

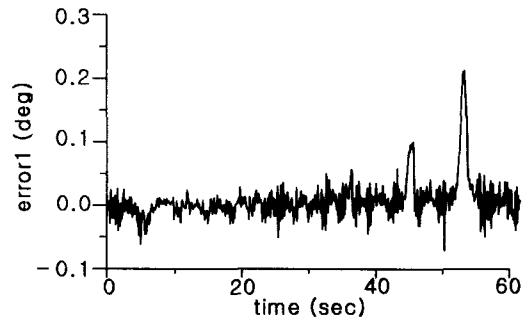


Fig. 8 Trajectory error of axis C by sliding mode

이며 외란에 대응하는 제어입력 ϕ_{fi} 는 다음과 같이 정의하였다.

$$\phi_{fi} = \begin{cases} M_{i1} + M_{i2} |e_i| & \text{if } s < 0 \\ -M_{i1} - M_{i2} |e_i| & \text{if } s > 0 \end{cases} \quad (7)$$

절환면 주변에서 채터링을 경감시키는 방안으로 현재 상태와 절환선과의 거리가 설정된 불감대 영역으로 수렴하면, 수렴하지 않은 경우에 비해 M_{i1} 이 작은 값을 갖도록 하였다^(5,6).

3.3 궤적추종 성능실험

산업현장에서 많이 이용되는 비례 미분 제어와 본 연구에서 제안한 슬라이딩 모드 제어를 비교 평가하기 위하여 실제 금형가공에 필요한 연마로봇의 궤적을 사용하여 연마로봇의 2축에 대한 궤적 제어 실험을 수행하였다. 사용된 연마궤적은 웨도우 마스크 형태의 금형 연마궤적의 일부분으로 연마시간이 60초인 궤적 데이터이다. 먼저 연마로봇에 대해 비례미분제어를 사용할 경우의 축 A와 축 C의 궤

적 오차는 Fig. 5, Fig. 6과 같다. 제어결과를 보면 비선형 성분 및 가공물과 연마 공구사이의 마찰력으로 인해 발생하는 외란 때문에 궤적오차가 최대 3° 정도로 크게 발생하고 있음을 알 수 있다. Fig. 7과 8은 슬라이딩 모드 제어에 의한 축 A와 축 C의 궤적오차를 나타낸다. 슬라이딩 모드 제어에 의한 궤적실험결과와 경우 궤적의 변화율이 클 경우 상대적으로 오차가 크게 발생하였으나, 최대 0.2° 정도로 연마 작업에는 영향을 주지 못할 정도이고, 비례미분제어 결과에 비해 궤적제어성능이 10배 이상 우수함을 알 수 있다.

4. 5축 NC 데이터의 분리

개발된 연마 시스템의 경우 3축 머시닝센터는 NC 제이기에 의해서 작동되고, 제작한 연마로봇의 2축은 각 모터의 서보 드라이브에 의해서 구동된다. 즉, 3축 머시닝센터와 2축 로봇의 제어가 독립적으로 존재하게 되므로 5축 머시닝센터의 곡면 금형가공 데이터를 각각의 제이기에 적합한 형태로

분리하여 두 시스템이 독자적으로 동작하면서 동일한 시간에 궤적을 따라 이동하여 5축 머시닝센터의 효과를 얻을 수 있도록 해야 한다. 본 연구에서는 선행 연구에서 곡면 금형 데이터의 분리시에 문제가 되었던 부분을 개선하여 분리 프로그램을 안정화 하고자 한다.

4.1 5축 NC 데이터의 생성

5축 NC 데이터를 생성하기 위해서는 먼저 가공 대상물의 곡면을 결정하고 그 곡면에 상응하는 곡면식을 생성한다. 이를 위해 CAM 프로그램을 이용하는 데, Table 4와 같은 조건들을 설정하여 가공조건을 결정한다. 설정해야 할 가공조건은 다음과 같다. 공구 형상(cutter shape) 항목에는 공구의 직경과 공구끝의 필렛(fillet), 공구의 길이를 입력한다. 경로 간격(path interval)은 공구가 지나가는 경로와 경로사이의 간격을 의미하고, 절삭 오차(cutting tolerance)는 공구의 경로를 생성할 때 허용하게 되는 오차를 의미한다. 이때 오차를 필요 이상 작게 설정할 경우 지나치게 조밀한 궤적이 생성되어 비효율적인 가공 데이터가 생성된다. Z축 방향으로 가공 여유를 둘 경우에는 표면 오프셋(surface offset)에 원하는 값을 입력한다. 그리고 머시닝센터가 G92코드로 프로그램 원점을 설정할 경우에는 시작 위치(start point)항의 값을 참조한다. 프로그램 시작점에서 가공 위치까지 절삭이송을 할 경우 선제적인 가공시간이 길어지게 되므로 임의의 위치까지는 급속이송을 할 수 있도록 여유 높이(clearance height)를 설정할 수 있다. 또한, 공구가 가공물의 모서리를 통과할 경우 XY 평면에 평행하게 통과할 것인지 곡면에 접하는 방향으로 통과할 것인지를 결정한다. 경로의 종류(path type)에는 단방향이송(single)과 지그재그(zigzag)이송이 있고 경로와 경로사이를 연결하는 방법은 직접(direct), 점프(jump) 등이 있다. 이상의 항목들을 결정한 후 궤적을 생성하기 위한 중간 단계로서 연마공구가 연마면에 접촉하는 위치 및 자세 정보를 갖는 CC(cutting contact) 데이터와 CL(cutting location) 데이터를 생성한다. 끝으로 5축 연마기구에 대한 역기구학에 의해 5축 NC 데이터를 생성한다⁽³⁾. Fig. 9는 이상의 과정을 거쳐 생성한 TV 브라운관의 금형으로 사용되는 웨도우 마스크(shadow mask)곡면에 대한 연마 궤적을 나타낸 것이다.

Table 4 Items of polishing condition

Item	Input
Cutter shape	Dia, Fillet-radius, Length
Path interval	Value
Cutting tolerance	Value
Surface offset	Value
Start point	X, Y, Z position
Clearance height	Inc/Abs, Value
Approach height	Value
Approach and exit type	Xyplane / Tangent
Path type	Single, Zigzag
Path connection	Direct, Jump
Feed rate	Approach, First, Last, Connection value
Spindle speed	Value

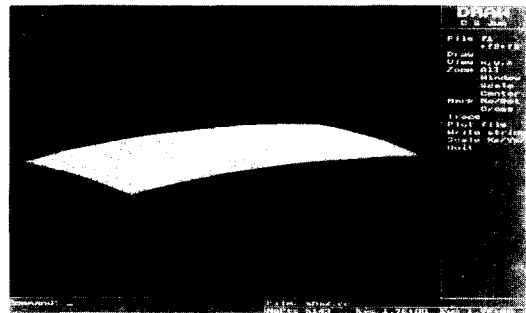


Fig. 9 Trajectory for shadow mask

4.2 분리 프로그램

생성된 5축 NC 데이터는 위치 이송 정보와 연마로봇의 자세제어 정보를 포함하고 있으므로 독립적으로 존재하는 3축 머시닝센터의 NC 데이터와 로봇을 위한 2축 궤적으로 분리하는 과정이 필요하다. 5축 NC 데이터에는 X, Y, Z, A, C축의 위치 및 자세 정보와 공구의 이송속도(feed rate) 및 회전수 정보 등을 담고 있다. 먼저 분리 프로그램에서는 A, C축의 위치를 추출하고 동기화를 위해 NC 데이터의 이송속도를 시간으로 환산하여 로봇의 궤적을 생성한다. 그리고 머시닝센터에 입력될 위치 데이터는 머시닝센터의 제어기인 FANUC사의 NC 제어기에 맞는 형태로 수정한다.

선행 연구에서는 이상의 과정을 도스(DOS) 환경에서 실행할 수 있는 프로그램을 개발하였기 때문에, 분리할 수 있는 데이터의 크기가 약 800행 정

도로 제한이 있었고, 분리 후의 결과를 사용자가 직관적으로 확인하기가 어려웠다. 또한 여러 가지 상황에 대한 고리가 부족하여 신뢰도가 낮은 문제점이 있었다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 윈도우즈(windows) 환경에서 수행되는 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램은 GUI(graphic user interface)를 구현하여 사용자로 하여금 편리하게 분리 작업을 할 수 있게 하였고, 분리된 데이터를 그래픽으로 표현하여 직관적으로 확인이 가능하도록 하였다. 또한, 분리할 수 있는 데이터의 크기가 호스트 PC의 메모리에 의해서만 제한되므로 복잡한 규형이나, 큰 규형에 대한 NC 데이터도 분리가 가능하도록 하였다. NC데이터의 경우 절대 좌표를 사용하지만 장착한 연마 로봇의 궤적은 증분 값을 산출하여 궤적제어를 하므로 로봇에 대한 궤적의 초기 값은 항상 0으로 시작하도록 하였다. 한편 NC데이터의 경우 현재 블록의 위치정보가 이전 블록에서의 값과 같은 경우 위치정보를 생략하는 모달(modal)기능이 있는데, 이에 대응하여 연마 로봇의 제어기에 입력되는 궤적 데이터인 A축과 C축의 자세 값이 생략되어 있을 경우 이전 정보를 그대로 유지하도록 하였다. Fig. 10은 분리프로그램에 의한 연마 궤적 데이터 분리 작업 후의 모습으로 왼쪽이 5축 NC 데이터 파일이고, 가운데와 오른쪽부분에 각각 분리된 3축 NC 데이터 파일과 2축 로봇의 궤적 파일을 나타내고 있다.

5. 연마 성능 평가 및 고찰

숙련공의 연마 작업을 자동화하기 위해서는 일정한 수직력을 규칙적이고 안정된 형태로 가공물에 반복적으로 가할 수 있는 기구의 개발이 필수적이지만 연마 작업을 효율적으로 수행하기 위해서는 연마 조건에 대한 분석도 필요하다. 이미 자동연마의 최적조건 선정을 위한 연구가 있었으나 가공 대상물이 곡면이 아닌 평면에 대한 실험이었고 수직가공력에 대한 분석이 제외되어 있었다⁽³⁾. 이에 본 장에서는 연마로봇을 머시닝센터에 부착시킨 5축 자동 연마로봇 시스템으로 곡면 규형의 연마 실험을 수행하여 연마 성능을 평가한 후 효율적인 연마 조건을 찾고자 한다.

5.1 실험장치의 구성 및 실험방법

연마 실험장치는 Photo 1에서 보는 바와 같이

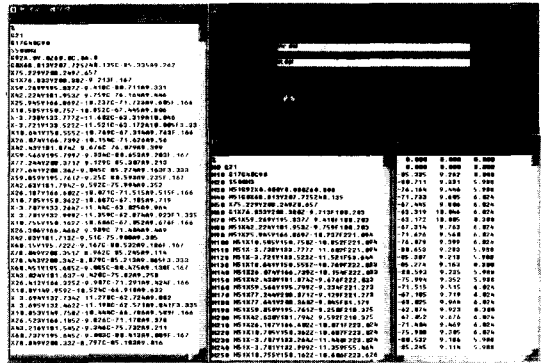


Fig. 10 Polishing data separation program for two controller



Photo 1 Polishing process of shadow mask

머시닝센터에 장착된 연마로봇과 연마로봇 위치의 실시간 동시 제어를 위한 DSP보드 그리고 일정한 수직가공력을 유지할 수 있는 공압장치로 구성된다. 여기서 사용한 연마숫돌은 엠보싱 타입의 연마시트로서 유연한 섬유소재 위에 다이아몬드 및 CBN입자를 강력하게 접착시킨 형태로 그 종류는 #100, #800, #1500의 3종류이며⁽³⁾, 접착제는 레지노이드(resinoid) 본드이고, 연마유는 수용성 절연삭 가공유를 사용하였다. 또한, 피가공물의 형상은 3차원 자유곡면인 웨도우 마스크(250 mm × 145 mm)이고 재질은 규형제로 널리 쓰이는 규형강 SKD11을 사용했다⁽¹¹⁾. SKD11은 성분조성에 있어 Cr탄화물의 양(12%)이 많아 상온에서 단단하고 내마모성이 있는 난삭제이다.

연마실험에 앞서 규형을 5R의 초경 볼랜드밀로 절삭하여 웨도우 마스크의 규형 형상을 만드는데, 이 절삭 가공면의 상태는 연마가공효율에 영향을 미치는 인자 중에서 가장 큰 요인으로 생각할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 절삭에서 표면 거칠기가 가장 양호하고 연마가 가장 효율적으로 될 수

있는 영장으로 가공되는 절삭가공법을 도입하여 수평 연마 작업의 효율성을 높이기도 하였다. 이러한 가공법으로는 최근 대두되고 있는 고속·고정도 가공법, FF가공법, fP Concept 등 고품위, 고능률의 절삭가공법이 연구되고 있는데, 그 중 fP Concept는 분얼트림의 1회전당 이송량 f 와 피이크피이드(pick feed)량 P 가 일치할 경우, 즉 " $f = P$ "일 때, 가공표면거칠기와 연마가공능률이 최적화된다는 개념이다⁽¹⁰⁾. 본 연구에서도 fP Concept를 이용하여 $f = P = 0.5 \text{ mm}$ 인 절삭으로 가공면의 전체에 걸쳐 표면거칠기가 균일하도록 하였다. 첫 번째 실험에서는 가공방향에 따른 연마 특성을 파악하기 위해 다른 가공조건은 일정하게 두고 이전 가공의 가공한 방향과 같은 방향과 직교하는 방향으로 각각 연마한 결과를 비교하였다. 두 번째 실험에서는 Fig. 11과 같이 각 입도에 대하여 수직가공력, 회전수, 이송속도를 설정하고 연마회수를 증가시키면서 수직가공력에 따른 중심선 평균거칠기(R_a , center line mean roughness), 최대골깊이(R_{max} , maximum profile valley depth)를 측정하였다. 가공영역을 Fig. 12와 같이 회전수와 이송속도의 종류에 따라 크게 4개의 영역으로 나누고, 다시 각각의 영역에 대해 3등분하여 수직가공력을 20N, 30N, 40N으로 설정하였다. 한 개의 셀(cell)은 $30 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 의 크기를 가지고, 각 셀마다 연마회수를 증가하면서 연마한 후 표면을 측정하였다. 측정은 Taylor-Hobson사의 Form Talysurf Series2를 사용하였고 곡면에 대하여 축침이 수직이 되도록 자동 틸팅(auto tilting)하여 8 mm 를 측정하였다.

5.2 연마성능실험 및 고찰

연마방향이 표면거칠기에 미치는 영향을 평가하기 위해서 규칙적인 곡면(ruled surface)와 웨도우 마스크 두 종류의 곡면에 대해 횡방향으로 입도 #200을 이용하여 연마한 후 연마조건을 Table 5와 같이 설정하여 종방향으로 입도 #800을 이용하여 연마실험을 수행하였다. 연마 후 표면거칠기를 측정된 결과는 Fig. 13과 같다. 이때 이전 연마 방향과 같은 방향으로 연마한 것을 single, 연마방향을 달리하여 연마한 것을 normal이라고 한다. 연마한 결과인 R_a 에 대해 각 방법을 비교해 보면 각각 $0.55 \mu\text{m}$ 와 $0.09 \mu\text{m}$ 로 후자의 경우가 양호함을 알 수 있다. 즉 이전 가공에 있어서의 공구의 진행방향과 수직한 방향으로 연마하는 것이 효율적이다. 이것

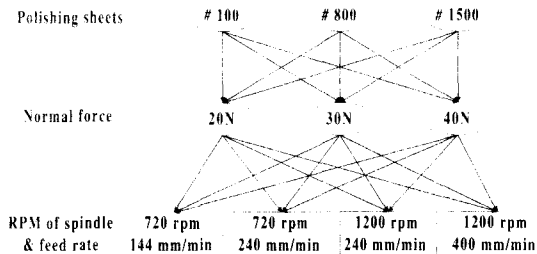


Fig. 11 Polishing condition

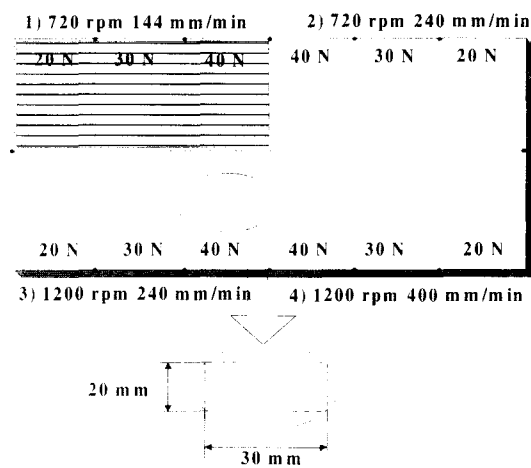
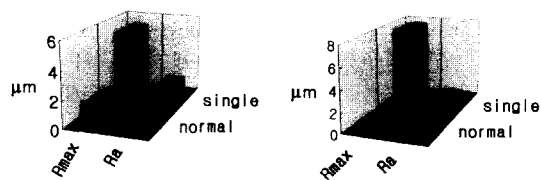


Fig. 12 Polishing area

Table 5 Polishing conditions

Direction	Only horizontal	Vertical and horizontal
Force	15N	
Tool(Mesh)	R = 5mm (#800)	
Spindle	800 rpm	
Feed Rate	100 mm/min	
Pick Feed	0.5 mm	



(a) Ruled surface (b) Shadow mask
Fig. 13 Roughness according to polishing direction

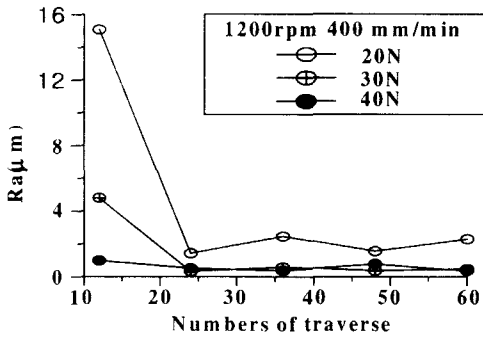


Fig. 14 Roughness Ra by normal force and numbers of polishing at #100

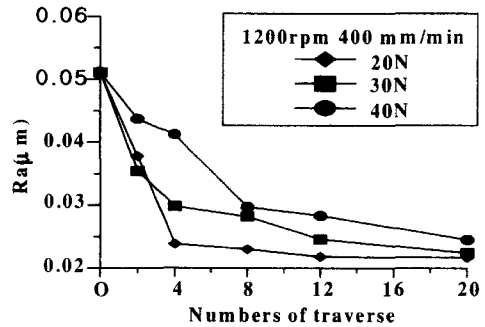


Fig. 16 Roughness Ra by normal force and numbers of polishing at #1500

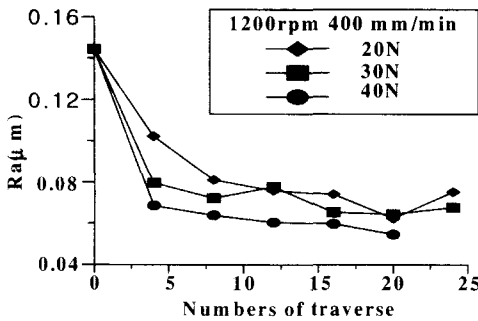


Fig. 15 Roughness Ra by normal force and numbers of polishing at #800

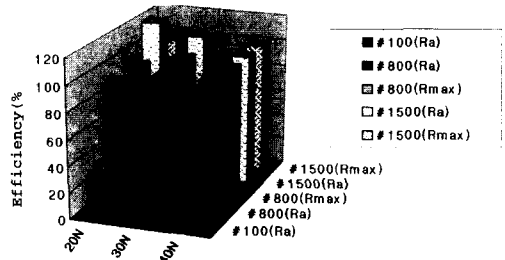


Fig. 17 Comparison of effect according to vertical force

은 금형을 일정한 방향으로 연마할 경우 공구의 진행방향과 동일한 방향으로 결(lay)이 발생하여 표면 거칠기가 나빠지는 것을 의미한다. 그러므로 효율적인 자동연마를 위해서 가공경로에 패턴을 도입하여 가공경로가 일정한 방향성을 가지지 않도록 하는 것이 바람직하다.

스핀들의 회전수를 1200 rpm, 이송속도를 400 mm/min으로 설정하고 각각 #100, #800, #1500의 입도로 연마한 후 수직가공력에 따른 연마회수와 표면 거칠기의 관계를 나타내면 Fig. 14~Fig. 16과 같다. 연마 결과에서 보면 연마회수의 증가에 따라 표면 거칠기는 지수 함수적으로 개선되고 있지만, 어느 정도 연마회수를 증가시키면 제거능률이 떨어지며 이 연마회수를 기점으로 표면 거칠기의 개선 정도는 상당히 둔화됨을 알 수 있다. 이때의 표면 거칠기는 최종 표면 거칠기의 90% 정도까지 도달하며 이때의 연마회수를 임계연마회수라 한다.

각 입도별로 수직가공력이 표면 거칠기에 미치

는 영향을 평가하기 위해서 40N일 때의 표면 거칠기를 기준으로 20N과 30N으로 가공한 결과를 비교하기 위해 연마효율을 식 (8)과 같이 정의하였다.

$$\text{efficiency}_F(\%) = \frac{1}{\frac{\text{roughness}_F}{\text{roughness}_{40N}}} \times 100 \quad (8)$$

40N으로 가공한 표면 조도의 효율을 100%로 하여, 20N과 30N인 경우의 연마 효율을 비교하면 Fig. 17과 같다. #100의 경우에는 수직가공력을 40N으로 설정한 경우가 효율적이었으나 #800인 경우에는 효율에 큰 차이가 없었고 #1500인 경우에는 20N인 경우가 더 효율적임을 알 수 있다. 이는 연마숫돌의 입도가 증가할수록 수직가공력은 작아야 함을 의미한다.

Photo 2는 Fig. 12와 같은 가공방법에 의해서 #1500으로 연마한 후의 시편을 나타낸다. 연마한 결과인 금형 표면에 글자가 보일 정도로 연마면의 조도가 양호함을 알 수 있다.

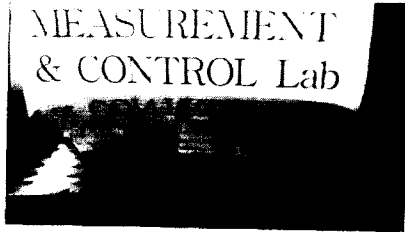
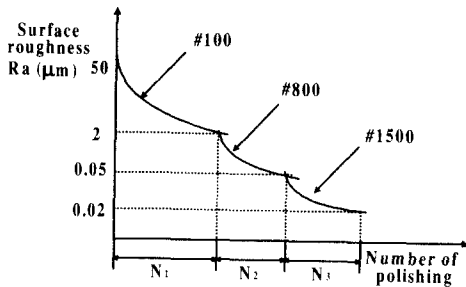


Photo 2 Shadow mask after final polishing



N_i : number of polishing times of polishing tool i
 $N_1+N_2+N_3$: Total number of polishing times

Fig. 18 Ra according to numbers of polishing and polishing sheet

이상의 실험 결과를 통해 표면이 Ra 2 μm 이상의 거친 경우는 수직가공력을 40N으로 Ra 0.2 μm 인 경우는 20N으로 설정하는 것이 바람직함을 알 수 있었다. 또한, Rmax에 대한 수직가공력의 영향도 Ra와 유사함을 확인할 수 있었다.

#100, #800, #1500의 연마숫돌로 일정한 가공조건으로 연마회수를 증가시키면서 가공하였을 때의 표면거칠기를 근사적으로 나타낸 것이 Fig. 18이다. 연마회수의 증가에 따라 표면거칠기는 개선되고 있으며, 초기제거능률은 컸지만, 어느 정도 연마회수를 증가시키면 제거능률은 떨어짐을 알 수 있다. 이점을 고려한다면 #100과 #800사이에 #400을 추가함으로써 연마회수를 줄여 능률적인 연마가 가능할 것으로 예측된다.

스핀들의 회전속도가 연마효율에 미치는 영향을 평가하기 위해서 이송속도(240 mm/min)와 수직가공력 등의 기타 조건은 동일하게 설정하고 Table 6과 같이 스핀들의 회전속도를 720 rpm과 1200 rpm으로 두었을 때 Ra와 Rmax가 목표치까지 도달하는데 필요한 연마회수를 비교하였다. 연마회수에 따른 표면거칠기 변화를 조사하여 임계연마회수에서의 표면거칠기를 목표치로 가정하였다. 각각의

Table 6 Efficiency of polishing according to the velocity of spindle

Mesh of sheets	Items of measurement	Value of requirement	Normal force	Numbers of polishing	
				720(rpm)	1200(rpm)
#800	Ra	0.05 μm	30N	20	12
	Rmax	0.3 μm		20	12
#1500	Ra	0.025 μm	20N	8	4
	Rmax	0.24 μm		20	8

스핀들 회전속도에 대해 표면거칠기가 목표치에 도달하는데 필요한 연마회수를 비교하면 회전속도가 빠를 수록 효율적인을 알 수 있다. 그러나 #800의 숫돌로 20N의 수직가공력을 가하면서 1200 rpm으로 가공했을 때, 숫돌과 금형의 접촉면이 까맣게 타면서 연마가 되지 않는 현상이 나타났다. 이것은 숫돌과 가공물의 표면사이에서 발생하는 과도한 마찰에 기인하는 것으로 연마효율을 좋게 하기 위해 스핀들의 회전속도를 1200 rpm이상으로 빠르게 하는 것은 바람직하지 못함을 알 수 있다. 이상의 연마실험 결과를 통해 연마숫돌의 입도에 따른 적절한 연마력과 연마회수를 선정함으로써 연마효율을 높일 수 있고, 선정된 연마 조건하에서 개발한 연마로봇시스템에 의해 우수한 연마성능을 가져올 수 있음이 입증되었다.

6. 결론

본 연구에서는 지금까지의 금형 연마공정에서 대부분이 숙련공에 의해 수작업으로 수행되어 왔던 곡면 금형의 연마작업을 자동화하기 위해 선행 연구에서 개발된 머시닝센터 장착형 연마로봇을 소형·경량화하여 장착 작업을 용이하게 하였고 넓은 작업 공간을 확보하여 금형의 크기로 인한 제약을 완화하였다. 연마로봇을 실시간으로 제어하기 위해 DSP를 이용한 고속제어기를 사용하였고, 연마 작업 중에 발생하는 진동, 부하 변동 등의 외란에 대처하여 연마성능을 개선하기 위해 속도항을 보상한 슬라이딩 모드 제어알고리즘을 제안 및 적용하였으며, 이때 제어 계인 선정에 필요한 시스템 파라미터는 신호압축법을 이용하여 구하였다. 그리고 5축 NC 데이터를 분리할 수 있는 윈도우즈용 분리 프로그램을 개발하였으며, 여러 가지 상황에 대한 고

값을 통해 분리 프로그램의 신뢰도를 향상시켰다. 또한, 연마 방향, 연마 입도, 수직가공력, 이송속도, 회전수 및 연마회수 등의 인자들이 표면거칠기에 미치는 영향을 정량적으로 분석하여 전체적인 시스템의 성능향상을 도모하였다. 도출된 연마 지식을 기반으로 개발된 연마로봇 시스템을 이용하여 곡면 연마 실험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 3축 머시닝센터에 2자유도의 연마로봇을 장착함으로써 저가격의 5축 자동 연마로봇 시스템 구성이 가능하였으며, 이를 이용하여 연마실험을 수행한 결과 3차원 곡면 연마의 경우에도 양호한 연마성능을 얻을 수 있었다.
- (2) 소형·경량화 시킨 연마로봇의 궤적제어를 위해 DSP를 이용한 고속제어기를 사용하여 속도항을 보강한 슬라이딩 모드 제어 알고리즘의 적용을 가능케 하였으며, 연마작업을 수행한 결과 궤적 제어 추종성능의 우수함이 입증되었다.
- (3) 연마숫돌의 입도와 연마회수 및 수직가공력에 따른 연마 특성을 실험적으로 분석한 결과 #100의 경우에는 수직가공력을 40N정도, #1500의 경우에는 수직가공력을 20N정도로 하는 것이 적절함을 알 수 있었다. 또한 스피들 회전속도가 빠를수록 효율적이지만, 회전속도를 1200 rpm 이상으로 빠르게 할 때는 연마가 이뤄지지 않고 마찰에 의한 숫돌의 마모만 초래하였다.
- (4) 선정된 연마 조건하에서 개발된 연마로봇을 이용하여 곡면 연마를 수행하여 성능을 평가한 결과 Ra가 0.02로 연마 성능이 양호함을 실험적으로 입증하였다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금 및 부산대학교 기성회 재원 연구비의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 森口一豊, 近藤 司, 五十風悟, 齋藤勝政, “金型磨キ作業の自動化に関する研究 - 工具滞留時間を

考慮した定速磨キ加工,” 日本砥粒加工學會學術講演會講演文集, pp. 431~434, 1995.

2. 박근명, 장진희, 한창수, “자동 경면 다듬질 장치의 실험적 분석에 관한 연구,” 한국정밀공학회지, Vol. 12, No. 9, pp. 30~39, 1995.
3. 이민철, 하덕주, “곡면금형 연마를 위한 머시닝센터 장착형 연마로봇 시스템 개발에 관한 연구,” 한국정밀공학회지, Vol. 16, No. 4, pp. 163~177, 1999.
4. Young, K.K.D. "Controller Design for Manipulator Using Theory of Variable Structure Systems," IEEE Transaction on system, Man and Cybernetics, Vol. 8, No. 2, pp. 101~109, 1978.
5. 이민철, 靑島伸治, “슬라이딩 모드를 이용한 로보트 매니플레이터의 실시간 제어에 관한 연구,” 대한기계학회 논문집, 제16권, pp. 2011~2020, 1992.
6. M. C. Lee, K. Son, J. M. Lee, "Improving Tracking Performance of Industrial SCARA Robots Using a New Sliding Mode Control Algorithm," KSME International Journal, Vol. 12, No. 5 pp. 761~722, 1998.
7. M. C. Lee and N. Aoshima, "Identification and Its Evaluation of the System with a Nonlinear Element by Signal Compression Method," Transactions of Society of Instrument and Control Engineers (SICE), pp. 729~736, 1989.
8. 진상영, 이민철, 손권, 이만형, “신호압축법과 상관계수를 이용한 비선형시스템의 동특성 규명에 관한 연구,” 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 (1), pp. 519~523, 1993.
9. 佐佐木哲夫, 他3名, “金型磨キ作業の知識獲得と自動化に関する研究(第1報)金型熟練工の手磨キ特性,” 精密工學會誌, Vol. 57, pp. 497~503, 1991.
10. 이두찬, 금형자동연마의 최적조건선정 전문가 시스템 개발, 석사학위논문, 부산대학교, 1997.
11. 정재현, “부산·경남지역의 금형산업 현황,” 정밀정형 및 금형가공 연구센터 한-일 워크샵, pp. 92~111, 1994.