

곡면금형 연마를 위한 머시닝센터 장착형

연마로봇 시스템 개발에 관한 연구

이민철*, 하덕주**

A Study on the Development of Polishing Robot System Attached to
Machining Center for Curved Surface Die

Min Cheol Lee* and Deok Ju Ha**

ABSTRACT

Polishing work for a curved surface die demands simple and repetitive operations and requires much time while it demands also high precision. Therefore it is operated by a skilled worker in handiwork. However the workers avoid gradually a polishing work because of the poor environmental conditions such as dust and noise. In order to reduce the polishing time and to alleviate the problem of shortage of skilled workers, an automatic polishing robot system which is composed of a polishing robot with two degrees of freedom motion and pneumatic system is developed, and it is attached to machining center with three degrees of freedom. The system keeps the polishing tool vertically on the surface of die and maintains constant pneumatic pressure. The polishing robot with DSP(digital signal processor) controller is controlled by sliding mode control. A synchronization between machining center and polishing robot is accomplished by using M code of machining center. A performance experiment for polishing work is executed by the developed automatic polishing robot system. The result shows that the developed automatic polishing robot has a good performance and well polished workpiece surface is obtained.

Key Words : Polishing Robot(연마로봇), Machining Center(머시닝센터), Digital Signal Processor(디지털 신호 처리기), Sliding Mode Control(슬라이딩 모드 제어), Curved Surface Die(곡면금형), Constant Pressure(정압)

1. 서론

산업현장에서의 금형(자동차, 가전제품 등의 외관)의 연마공정은 대부분이 숙련공의 수작업으로 수행되고 있다. 그러나, 이와 같은 연마공정의 경우 작업시 발생하는 먼지, 소음, 진동 등으로 인하여 작업자들이 점차 기피하기 때문에 기능인력이 점점

줄어들고 있는 실정이다. 또한, 연마공정은 전체 금형 제작시간의 약 30~50%를 차지하므로 상당히 많은 시간을 요하는 작업이다^{(1)~(3)}. 한편, 3차원 자유곡면을 이루고 있는 금형의 경우는 연마작업이 매우 어렵고, 시간 또한 많이 소요되는 작업이다. 이러한 자유곡면을 가진 금형연마공정을 자동화하여 생산성 향상을 추구하고자 선진국에서는 이미

* 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소,
정밀정형 및 금형가공 연구센터

** 국방과학 연구소 제 3 연구개발 본부

활발한 연구가 진행되어 왔다^{(1)~(2)}. 일본의 경우, Daikin사, Nagase사 등의 회사에서 5축 전용 자동연마 시스템을 이미 상품화하여 판매하고 있다. 이에 반해 국내의 산업현장에서도 작업인력의 부족과 고임금화로 인하여 금형연마의 자동화에 대한 필요성이 더욱 절실해지고 있지만, 몇몇 회사(삼립전기, 현대자동차, 삼성전관 등)에서 자동연마 시스템을 일본에서 수입하여 사용하고 있을 뿐이다. 이러한 5축 전용 시스템을 구성하기 위해서는 비용이 고가 되는 문제점이 있다. 한편, 산업현장에서 보편화된 대부분의 머시닝센터(machining center)는 3축 머시닝센터로서, 충분한 자유도를 가지지 못하므로 이를 이용한 3차원 자유곡면의 연마작업에는 제약이 따른다. 반면에, 3차원 곡면의 가공에 적합한 것으로 알려져 있는 5축 연마 시스템을 이용할 경우에는 충분한 자유도의 부여로 인하여 공작물의 준비대체 시간과 고정구의 제작에 소요되는 시간이 감소되고, 인적비용의 절감 효과를 기대할 수 있다. 또한 유효가동율이 증가하고, 연속무인운전이 가능하며, 가공 정밀도의 향상 및 복잡한 금형연마가 용이하다는 등의 장점을 가지고 있다⁽⁴⁾. 따라서, 국내에서도 3차원 곡면 자동연마 시스템을 비교적 적은 비용으로 구성하기 위하여 다관절 로봇에 의한 5자유도 연마 시스템을 개발한 연구 사례가 있다⁽⁵⁾. 그러나, 이 경우에는 공작 기계와 비교해서 강성과 위치결정정도가 떨어지는 단점이 있다. 이러한 점들을 고려하여 충분한 강성과 고정도를 가지며 저렴한 비용으로 3차원 곡면연마가 가능한 자동연마 시스템의 개발이 요구되어 진다.

본 연구에서는 곡면금형의 연마 자동화를 위하여 기존의 3축 머시닝센터에 2자유도의 연마로봇을 장착하여 3차원 형상의 자유곡면의 연마가공을 가능하게 할 수 있는 비교적 저가의 비용으로 제작 가능한 머시닝센터 장착형 2자유도의 연마로봇을 개발하여 연마공정의 자동화를 도모하고자 한다. 또한, 개발한 연마로봇을 머시닝센터의 주축에 부착시켜 연마로봇 시스템 전체의 제어성능과 연마성능을 평가하고자 한다. 연마로봇에 적용할 제어 알고리즘으로는 연마작업시 발생하게 되는 진동 등의 외란이나 부하변동 등에 강인해야 하므로 슬라이딩 모드 제어를 적용시켜 연마시의 견실한 고정도의 궤적제어를 도모하고자 한다.

2절에서는 개발한 머시닝센터 장착형 연마로봇 시스템의 구성, 동작방법에 대해 다루고, 3절에서는

연마로봇에 적용할 슬라이딩 모드 제어를 설계한다. 4절에서는 개발한 연마로봇 시스템의 제어 추종 성능 및 연마 성능을 실험적으로 평가한다. 개발된 머시닝센터 장착형 연마로봇 시스템과 기존의 다관절 로봇, 연마 전용 시스템과의 비교를 위해 각각의 주요 특징 및 장단점을 부록 A에 정리하였다.

2. 머시닝센터 장착형 연마로봇의 개발

2.1 연마로봇 시스템의 구성 및 작동방법

본 연구를 수행하기 위해서 구성된 2자유도 로봇의 구조는 Fig. 1과 같다. 본 연마로봇은 곡면금형의 5축 연마가공을 위해서 3축 머시닝센터에 필요한 2자유도를 부여하기 위해 적합한 구조로 설계하였다. 제작한 머시닝센터 장착형 2자유도 연마로봇의 외관은 Photo 1과 같고, 머시닝센터에 장착하기 위한 샹크(shank)는 Photo 2와 같다.

연마로봇의 각 축은 연마 작업시의 연마력, 허용 모멘트, 허용 최대토크 등의 제반사항을 고려하여, 메가토크 모터를 C축으로, AC 서보모터(하모닉 드라이브 내장형)를 A축으로 구성하였다^{(6)~(8)}. 또한 설계시 머시닝센터의 z축 이송(feed)의 제약으로 인한 영향을 고려하여 연마 부속장치의 크기에 제한을 두었다.

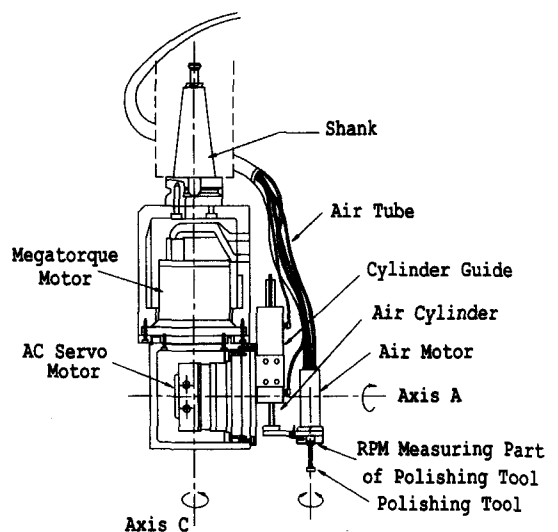


Fig. 1 Structure of polishing robot with two degree of freedom

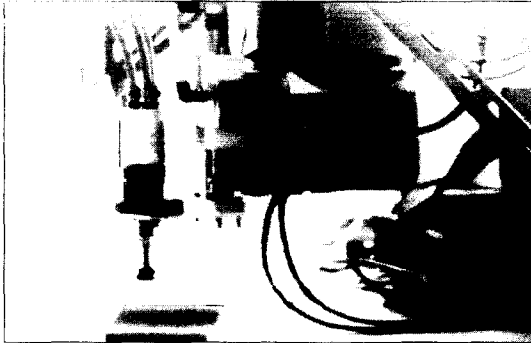


Photo 1 Appearance of the developed polishing robot

일반적으로 연마력을 얻기 위한 방법은 스프링력(spring force), 자기력(magnetic force), 공기압(pneumatic pressure) 등이 주로 사용되며 일정한 연마력으로 가공하는 것이 가장 양호한 연마면을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다^{(1),(2)}. 본 연구에서는 공기압을 이용한 방법을 사용하여 연마시에 일정한 압력을 부여하도록 하였다. 이 방법은 공기 압축기(air compressor)를 사용하여 공압 실린더 로드엔 달려있는 연마공구에 일정한 압력을 가하여 연마력으로 이용하는 방법이다. 구성된 회로도엔 Fig. 2와 같다. 연마력은 공압 정밀 레귤레이터를 사용하여 복동 실린더 양단의 압력차를 조절하여 설정되며, 이 압력차에 의해 연마력이 결정된다. 일반적으로 약 5 kgf/cm² 정도의 압력이 공압 정밀 레귤레이터에 공급되도록 하여 공압 정밀 레귤레이터의 조정 밸브를 사용하여 공압 실린더 양단의 압력차를 줄 수 있다. 본 연구에서는 한쪽의 공압 정밀 레귤레이터를 완전히 차단하고 다른 쪽의 공압 정밀 레귤레이터의 압력을 약 0.5 kgf/cm² 정도에서 변화를 주었다. 한편 연마숫돌의 회전부도 공압을 이용하여 공압 모터의 회전력으로 연마숫돌을 회전시키게 되는데, 본 연구에서는 솔레노이드 밸브를 이용하여 Table 1에서와 같이 양방향 회전이 가능하도록 하였으며 연마숫돌의 회전수는 공압 모터에 공급되는 압력에 따라 결정된다. 공급되는 공압에 따라 공압 모터의 회전수는 0 ~ 2300 rpm 범위에서 조절이 가능한데 본 실험에서는 연마에 필요한 충분한 회전력을 얻기 위해 약 800 rpm으로 조절하였다. 또한, 공압 모터를 지지하면서 공압 실린더에 의해 움직이도록 실린더 가이드를 부착하여 견고성

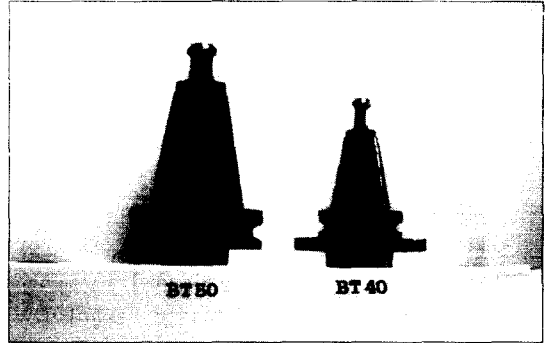


Photo 2 Shank for attaching to machining center

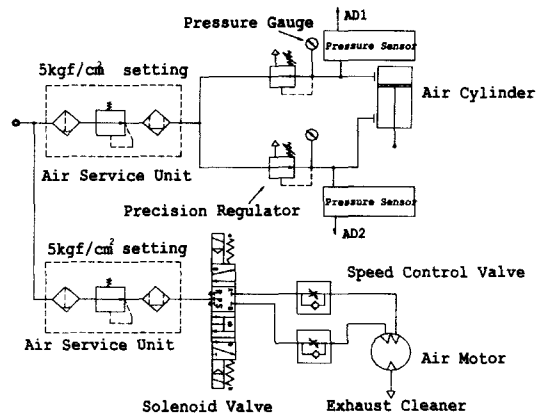


Fig. 2 Pneumatic system for sustaining constant pressure

Table 1 Selection of rotation direction of air motor

	Solenoid valve port a	Solenoid valve port b
Tool stop	OFF	OFF
Clockwise rotation	ON	OFF
Counter-clockwise rotation	OFF	ON

을 부여하였다. 구성된 공압 시스템의 전체 개략도는 Fig. 3과 같다. 이상과 같이 구성된 머시닝센터 장착형 2자유도 로봇의 C축과 A축에 의해 연마공구가 연마면에 법선방향에 놓이도록 각도 제어가 이루어져 원하는 연마궤적을 따르게 된다. 로봇이 급형의 연마면에 수직이 되면 일정한 연마력을 부

여하는 공압 실린더에 의해 연마공구는 연마면을 일정한 힘으로 누르게 된다. 이때 공압 모터의 회전력에 의해 연마공구가 회전하면서 연마작업을 수행해 나간다. 이런 일련의 동작들은 머시닝센터와 동기를 이루면서 동시에 이루어진다.

5축 연마가공을 위한 연마로봇 시스템의 전체 블록선도는 Fig. 4와 같다. 3축 머시닝센터의 제어기는 일반적으로 많이 사용되고 있는 FANUC사의 NC제어기를 사용하였으며, 제작된 머시닝센터 장착형 연마로봇을 구동하기 위한 제어기는 TMS320C40을 사용한 DSP(digital signal processor) 보드를 이용하여 연마로봇 위치의 실시간 동시 제어가 가능하도록 구성하였다. 산업용 컴퓨터는 제어 프로그램, 입출력 데이터, 머시닝센터로의 NC 데이터 전송 등을 관리한다. DSP 보드는 제어 알고리즘의 계산과 디지털 신호의 입출력과 제어입력신호를 처리한다. DIO 보드는 로봇으로부터의 측정된 위치 신호와 머시닝센터의 NC 제어기에서 발생하는 MSI 코드를 체크하여 DSP로 전달하고, 해제 신호를 머시닝센터로 전송한다. 또한 공압 모터의 정·역방향 회전을 위한 신호의 I/O도 담당한다. D/A 보드는 DSP로부터의 디지털 제어출력을 아날로그로 바꾸어 로봇의 모터를 구동하기 위한 서보 드라이브로 보내주는 기능을 수행한다. 각 축의 서보 드라이브는 D/A 보드로부터 신호를 받아 각 모터를 구동시키고 모터에서 측정된 엔코더 신호를 데이터 획득 보드(data acquisition board)로 보내는 기능을 수행한다. 데이터 획득 보드는 제어 부분에서의 측정 데이터를 DIO 보드로 보내는 기능을 수행한다. 일정한 압력으로 연마력을 얻기 위한 공압 시스템(Fig. 3 참조)의 정압 유지를 위한 압력 정밀 레귤레이터의 압력은 압력 센서를 이용하여 A/D 보드를 이용해서 계측할 수 있게 구성되어 있다. 솔레노이드 밸브는 연마공구의 회전력을 얻기 위한 공압모터의 정·역회전방향을 제어한다.

이상의 연마로봇 시스템의 사양을 부록 B에 정리하였다.

2.2 연마로봇의 기구 모델링과 기구학적 해

연마로봇을 이용하여 연마작업을 수행하기 위해서는 연마공구의 궤적을 따라 이동하는 로봇의 단말 효과기(end effector)에 대한 기구학 및 역기구학 해를 도출해야 한다. 임의의 연마점의 좌표값과 그 점의 법선 방향이 주어지면 도출된 역기구학 해

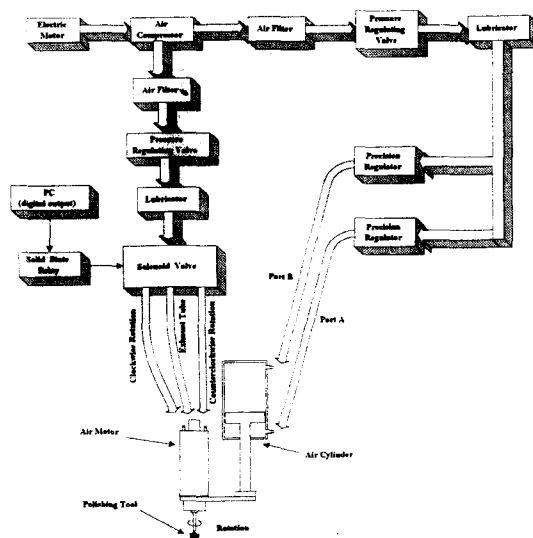


Fig. 3 Schematic diagram of pneumatic system

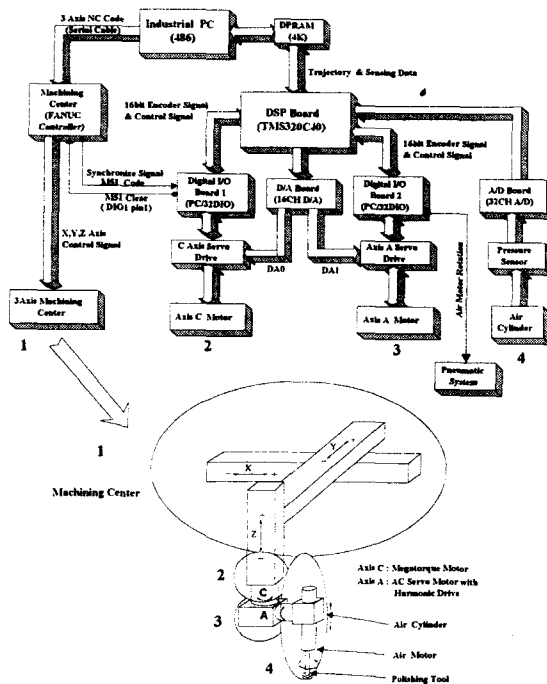


Fig. 4 Block diagram of Polishing Robot system

를 이용하여 각 축이 운동해야 할 이동량을 구할 수 있으므로 연마로봇의 연마작업이 가능하게 된다. 머시닝센터에 장착된 로봇을 간략히 형상화해서 좌표계를 표시하면 Fig. 5와 같다. 여기서 머시

닝센터의 Z축과 일치하는 A축의 좌표계를 (x₁, y₁, z₁)로 하고, 이를 기준으로 한 공구 끝의 좌표는 (l₁, l₂, l₃)로 한다. 머시닝센터의 기준 좌표계를 (x₀, y₀, z₀)로 하고, 이로부터 로봇 각축의 위치를 (l_x, l_y, l_z, θ₄, θ₅)로 준다. 그리고 공구 끝의 위치벡터를 $\vec{P} = (p_x, p_y, p_z)^T$ 로 두고 공구 끝의 자세(orientation) 벡터를 $\vec{a} = (a_1, a_2, a_3)^T$ 로 둔다. 이 때 로봇의 절대 좌표계 (X, Y, Z)에서 공구선단 좌표계 (x, y, z)까지의 좌표 변환은 D-H(Denavit-Hartenberg) 방식을 이용하여 Table 2와 같이 구해진다⁽⁵⁾. Table 2를 이용하여 각 관절의 복합동차변환행렬을 식 (1)을 이용하여 구하고, 기준 좌표계로부터의 공구선단 좌표계 ⁰A₆를 구한 후 절대 좌표계에 대한 좌표계로 나타내면 식 (2)와 같이 구해진다.

$${}^{i-1}A_i = T_{z,d} T_{z,\theta} T_{x,a} T_{x,a} \quad (1)$$

$${}^0A_6 = \begin{bmatrix} C_4C_5 & S_4 & C_4S_5 & l_x + l_1C_4C_5 + l_2S_4 - l_3C_4S_5 \\ -S_4C_5 & C_4 & -S_4S_5 & l_y - l_1S_4C_5 + l_2C_4 - l_3S_4S_5 \\ -S_5 & 0 & C_5 & l_z - l_1S_5 - l_3C_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

단, C_i = cos θ_i, S_i = sin θ_i

따라서 절대 좌표계에 대한 공구 끝의 위치 벡터 \vec{P} 는 다음과 같이 구해진다.

$$\vec{P} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_x + l_1C_4C_5 + l_2S_4 + l_3C_4S_5 \\ l_y - l_1S_4C_5 + l_2C_4 - l_3S_4S_5 \\ l_z - l_1S_5 + l_3C_5 \end{bmatrix} \quad (3)$$

이때 공구의 자세 벡터(approach vector) \vec{a} 는 식 (2)의 진행방향 벡터(3열부분)로 다음과 같다.

$$\vec{a} = (C_4S_5, -S_4S_5, C_5)^T \quad (4)$$

이때 \vec{a} 는 연마 곡면의 법선 벡터의 역방향과 같다. 연마시 연마로봇이 생성해야 할 궤적을 구하기 위해서는 역기구학 해를 산출한다. 이를 위해 공구 끝의 위치벡터 \vec{P} 와 좌표공구 끝점의 자세 벡터 \vec{a} 가 주어졌을 때 각 축이 운동해야 할 이동량, 즉 역기구학 해를 구하면 다음과 같다.

Table 2 Polishing robot link coordinate parameters by D-H representation

Joint	θ _i	α _i	a _i	d _i
1	180	90	0	l _x
2	-90	90	0	l _y
3	180	180	0	l _z
4	θ ₄ +90	90	0	d ₃ =0
5	θ ₅ -180	90	0	l ₂
6	180	180	l ₁	l ₃

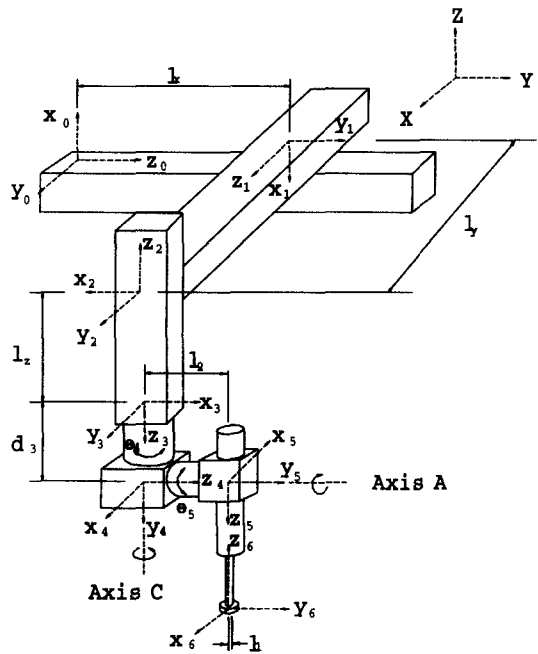


Fig. 5 Kinematic modeling

$$\begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x - l_1C_4C_5 - l_2S_4 - l_3C_4S_5 \\ P_y + l_1S_4C_5 - l_2C_4 + l_3S_4S_5 \\ P_z + l_1S_5 - l_3C_5 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\theta_4 = \text{atan2}(-a_2, a_1)$$

$$\theta_5 = \text{atan2}(a_1/C_4, a_3) \quad (6)$$

단, $\text{atan2}(x, y) = \tan^{-1}(x/y)$

따라서, 임의의 연마점의 좌표값과 법선 방향과

역방향인 좌표 공구 끝점의 자세만 주어지면 식 (5)와 식 (6)에 의해서 머시닝센터의 X, Y, Z축 방향으로의 이송거리와 축 C, 축 A의 회전각도가 구해진다.

2.3 머시닝센터와 연마로봇 간의 동기화

연마로봇이 머시닝센터와 동일한 시간대에서 주어진 궤적을 따라 동작하면서 연마작업을 수행하기 위해서는 연마면의 주어진 위치에 연마면과 법선인 방향으로 연마공구가 놓여져야 하며, 이를 위해 머시닝센터의 위치 이동과 연마로봇의 각도 제어가 동시에 이루어져야 한다. 머시닝센터를 제어하는 NC 제어기의 보조기능 코드인 M 코드(code) 중 M51 코드를 두 시스템 간의 동기신호로 이용한다. M51 코드의 특징은 이 신호가 발생하면 머시닝센터는 동작이 정지상태로 되어 외부에서 머시닝센터의 SM2 단자로 해제 신호를 입력하지 않으면 다음 명령을 실행하지 못한다는 것이다. 이런 특성을 이용하여 머시닝센터와 연마로봇을 동기화 하기 위해서 Fig. 6과 같은 회로를 구성하였다. 초기위치로부터 임의의 주어진 증분위치까지 공구를 이동시키기 위해서 머시닝센터는 M51 코드를 발생함과 동시에 위치이동이 시작되고, 동시에 연마로봇의 제어기는 포토커플러(photo-coupler)를 통해 M51 코드를 인식하는 순간부터 각도 제어가 이루어진다. 이와 같은 방법으로 순차적으로 다음 증분위치에 해당되는 각 연마 지점을 이동해 나가면서 연마가 이루어진다. Fig. 7과 같이 연마궤적의 세 지점 P₁, P₂, P₃가 주어져 있을 때, 연마 지점 P₁, P₂를 경유하여 연마궤적이 그려지려면 머시닝센터는 (x₁, y₁, z₁) 지점에서 (x₂, y₂, z₂) 지점으로 이동해야 하고, 동시에 연마로봇은 (θ_{C1}, θ_{A1}) 지점에서 (θ_{C2}, θ_{A2}) 지점으로 이동해야 한다. 또한 머시닝센터와 연마로봇이 P₂ 지점에 도착하는 시간은 머시닝센터와 연마로봇이 동시에 도착하는 경우, 머시닝센터가 연마로봇보다 먼저 도착하는 경우, 연마로봇이 머시닝센터보다 먼저 도착하는 경우의 세가지가 있다. 이 세가지 경우 모두 다음의 연마 지점 P₃로 이동하는 시작 시간은 동시에 이루어지도록 동기화해야 하는데, 동기화의 주 역할은 연마로봇의 제어가 담당하게 된다. 연마로봇의 제어기는 머시닝센터의 M51 코드의 발생을 체크한 후 이를 인식하고 연마로봇이 연마 지점 P₂에 해당하는 (θ_{C2}, θ_{A2}) 지점에 도착함과 동시에 머시닝센터의 SM2 단자로 M51

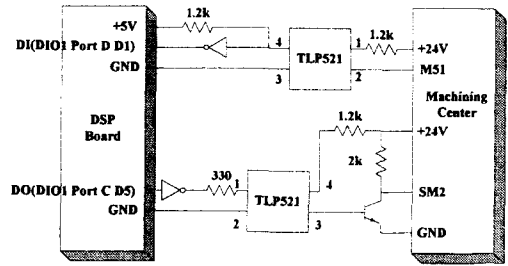


Fig. 6 Circuit for synchronizing between machining center and polishing robot

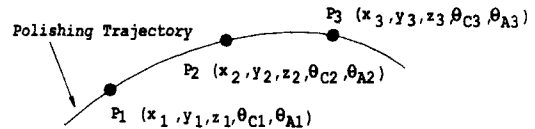


Fig. 7 Polishing trajectory

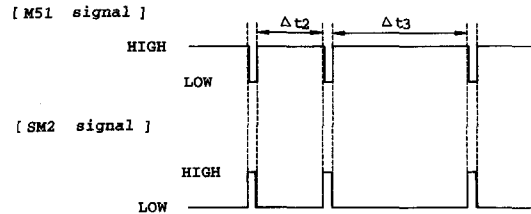


Fig. 8 Signal flow for synchronizing the start time between machining center and polishing robot

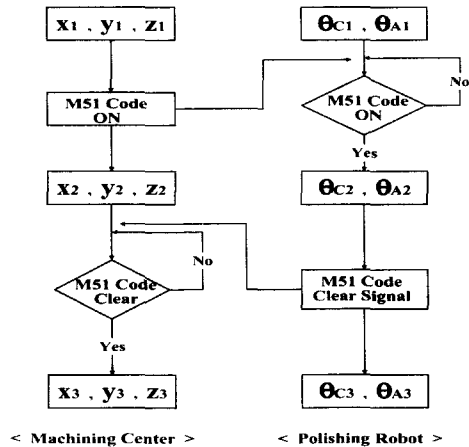


Fig. 9 Flowchart of polishing motion

코드의 해제 신호를 보내어 머시닝센터가 다음 연마 지점 P₃에 해당하는 (x₃, y₃, z₃) 지점으로 이동할 수 있게 한다. 이때 연마로봇도 동시에 (θ_{C3}, θ_{A3}) 지점으로 이동한다. 이러한 일련의 과정으로 동작할 때 연마 지점 P₁, P₂, P₃사이의 연마시간을 각각 Δt₂, Δt₃라 하면, 동기 신호의 흐름은 Fig. 8과 같고, 이러한 동작의 순서는 Fig. 9와 같은 순서로 이루어진다.

2.4 5축 NC 데이터의 분리

본 연구에서 개발한 5축 자동 연마로봇 시스템을 이용하여 연마작업을 수행하기 위해서는 금형가공을 위한 데이터로 5축 NC 데이터를 생성시켜 활용해야 한다. 그러나, 5축 자동 연마로봇 시스템을 구성하고 있는 머시닝센터와 연마로봇은 각각 독자적으로 움직이면서 2.3절에서 설명한 것과 같이 동기화에 의해 5축 연마가공 효과를 얻게 되므로 5축 NC 데이터를 바로 직접 이용할 수가 없다. 따라서, 3축 머시닝센터용 NC 데이터와 2축 연마로봇의 궤적 데이터로 분리하여 각각의 시스템에 사용할 수 있도록 5축 NC 데이터의 분리가 이루어져야 한다. 이를 위해 5축 NC 데이터를 생성한 후, 3축 NC 데이터와 2축 연마로봇의 제어기에 적합한 궤적 데이터로 분리하여 각각 출력할 수 있는 NC 데이터 분리 프로그램을 구성하였다. 이를 이용하여 분리된 데이터의 예를 보이면 Fig. 10과 같다. 연마작업을 수행하기 위한 초기 작업으로 머시닝센터용 3축 NC 데이터를 머시닝센터의 메모리에 직렬(serial) 통신으로 전송해 두고, 궤적 데이터는 호스트 컴퓨터에서 파일로 저장해 두어야 한다. 주어진 궤적에 따라 연마작업을 시작하게 되면 연마작업 수행과 동시에 연마로봇의 제어기에서 동기신호 M51을 확인하면서 궤적 데이터를 제어해 나간다.

3. 연마로봇의 슬라이딩 모드 제어

슬라이딩 모드 제어는 파라미터의 변화, 비선형성, 잡음, 외란 등에 강인한 제어 성능을 가지므로 산업용 로봇의 제어에 효율적으로 이용할 수 있는 제어 방식이다^{(9),(10)}. 본 장에서는 개발한 2자유도의 연마로봇에 대하여 그 동특성에서 나타나는 비선형성분을 외란으로 간주하여 슬라이딩 모드 제어를 적용한다. 이때 발생하는 채터링 문제를 해결하기

[NC Data for 5 axis]

```
G21
G17G40G90
M19
G02X0.Y0.Z260.0C.0A.0
G0X90.0Z50.0
Z30.0
G1Z20.0F.167
X80.0F.133
X263.235Y-180.0Z19.894C90.0A3.493F.204
X266.082Y8.426A7.333F.226
X274.145Z18.421A11.456F.247
```

[NC Data for 3 axis]

```
N10 G21
N20 G17G40G90
N30 M19
N40 M51G82X0.000Y0.000Z60.000
N50 G0X90.000Z50.000
N60 Z30.000
N70 G1Z20.000F100.200
N80 X80.000F79.800
N90 M51X263.235Y-180.000Z19.894F3143.919
N100 M51X266.080Z19.429F66.000
N110 M51X274.145Z18.421F91.116
```

[Trajectory Data for Polishing Robot]

C	A	time
0.000	0.000	0.000
90.000	3.493	4.902
90.000	7.533	4.425
90.000	11.455	4.049
90.000	15.729	3.802
90.000	19.932	3.717
90.000	23.987	3.861
90.000	28.263	4.464
90.000	26.925	5.051
90.000	22.186	5.181
90.000	17.484	4.398

Fig. 10 Example of two type data divided from 5-axes NC data

위해 가상의 불감대를 설정하여 설정된 불감대 내에서 제어 계인을 작게 가변하여 줌으로써 불연속 제어 입력에 기인한 채터링을 줄일 수 있는 방법을 적용하고자 한다^{(11)~(13)}.

3.1 비선형 성분을 외란으로 간주한 슬라이딩 모드 제어

비선형 미분방정식으로 표현되는 연마로봇에 대해서 슬라이딩 모드 제어를 적용하기 위한 절환 파라미터를 유도하는 것은 쉽지 않다. 이에 대해 비선형 성분을 모두 외란으로 간주하면 선형시스템의 경우와 같이 절환파라미터를 쉽게 유도할 수 있다.

우선, n관절 로봇의 각 관절 서보계의 운동방정식에서 나타나는 비대각요소, 원심력, 코리올리력 등의 비선형요소를 전부 외란으로 간주하여 변수 F_i로 두면 로봇의 전체운동방정식은 다음과 같이 간단히 기술된다.

$$J \ddot{\theta} + B\dot{\theta} + F = ku \tag{7}$$

여기서, J, B, k, u는 각각 관성모멘트, 점성감쇠 계수, 토크상수, 제어입력을 나타내는 n차원의 행렬이다. 다음으로, 로봇이 슬라이딩 모드상에 존재하도록 하는 절환파라미터를 유도하기 위해 로봇의 i 번째 관절의 목표각도, 각속도, 각가속도를 각각 θ_{di}, $\dot{\theta}_{di}$, $\ddot{\theta}_{di}$ 로 두고 측정된 각도 및 각속도

를 각각 $\theta_i, \dot{\theta}_i$ 로 두면 그 추종오차와 오차의 속도는 다음과 같다.

$$e_i = \theta_i - \theta_{di}, \dot{e}_i = \dot{\theta}_i - \dot{\theta}_{di} \quad (8)$$

e_i 와 \dot{e}_i 를 상태로 하는 오차상태공간 상에서 각 축에 대하여 슬라이딩 모드가 발생하는 절환선은 다음과 같이 정의한다.

$$s_i = c_i e_i + \dot{e}_i \quad (9)$$

비선형 성분을 외란으로 가정하였으므로 외란으로 간주된 항들에 의해서 슬라이딩 모드의 존재 조건을 벗어나는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 실제 외란의 영향을 억제하면서 슬라이딩 모드의 존재 조건을 만족시키기 위해서 다음과 같은 외란에 대응할 수 있는 적절한 제어 입력을 정의한다 (11)~(13).

$$u_i = \psi_{ai} e_i + \psi_{fi} + \psi_{\beta i} \dot{\theta}_{di} + \psi_{\gamma i} \ddot{\theta}_{di} \quad (10)$$

$$\psi_{ai} = \begin{cases} \alpha_{1i} & \text{if } s_i e_i > 0 \\ \alpha_{2i} & \text{if } s_i e_i < 0 \end{cases}$$

$$\psi_{fi} = \begin{cases} u_{fi}^- & \text{if } s_i > 0 \\ u_{fi}^+ & \text{if } s_i < 0 \end{cases}$$

$$\psi_{\beta i} = \begin{cases} \beta_{1i} & \text{if } s_i \dot{\theta}_{di} > 0 \\ \beta_{2i} & \text{if } s_i \dot{\theta}_{di} < 0 \end{cases}$$

$$\psi_{\gamma i} = \begin{cases} \gamma_{1i} & \text{if } s_i \ddot{\theta}_{di} > 0 \\ \gamma_{2i} & \text{if } s_i \ddot{\theta}_{di} < 0 \end{cases}$$

$$\psi_{fi} = \begin{cases} u_{fi}^- = M_{1i} + M_{2i} \times f(e_i) & \text{if } s_i > 0 \\ u_{fi}^+ = -M_{1i} - M_{2i} \times f(e_i) & \text{if } s_i < 0 \end{cases}$$

단, $f(e_i) = |e_i|$

여기서 $\psi_{\beta i}$ 와 $\psi_{\gamma i}$ 는 궤적 제어를 수행할 때 $\dot{\theta}_{di}$ 와 $\ddot{\theta}_{di}$ 에 의한 영향으로 슬라이딩 모드의 존재 조건으로부터 벗어나려는 것을 방지하기 위한 제어 입력으로 피드 포워드(feed-forward)요소이며, ψ_{fi} 는 외란의 영향을 억제하기 위해 주어지는 제어 입력이다. ψ_{fi} 에서 M_{1i} 는 외란의 최대값을 고려하여 그 크기를 결정한다.

i 번째 관점에서 슬라이딩 모드가 발생하기 위

한 슬라이딩 모드의 존재 조건식을 만족하는 각 절환파라미터의 조건식은 $c_i - \frac{B_i}{J_i} < 0$ 일 때 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{cases} k_i \alpha_{1i} + B_i c_i - J_i c_i^2 < 0 & \text{if } s_i e_i > 0 \\ k_i \alpha_{2i} + B_i c_i - J_i c_i^2 > 0 & \text{if } s_i e_i < 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} u_{fi}^- = M_{1i} + M_{2i} \times |e_i| < F_i/k_i & \text{if } s_i > 0 \\ u_{fi}^+ = -M_{1i} - M_{2i} \times |e_i| > F_i/k_i & \text{if } s_i < 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} k_i \beta_{1i} - B_i < 0 & \text{if } s_i \dot{\theta}_{di} > 0 \\ k_i \beta_{2i} - B_i > 0 & \text{if } s_i \dot{\theta}_{di} < 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} k_i \gamma_{1i} - J_i < 0 & \text{if } s_i \ddot{\theta}_{di} > 0 \\ k_i \gamma_{2i} - J_i > 0 & \text{if } s_i \ddot{\theta}_{di} < 0 \end{cases} \quad (14)$$

다입력계의 슬라이딩 모드 제어를 실현하기 위하여 식 (10)에서 제시한 제어입력을 계층제어법에 의해서 부가한다. 이 때 우선순위의 계층이 슬라이딩 모드에 들어가기까지는 하위순위로 가정한 계층이 우선순위의 운동에 의한 간섭을 극복할 수 있도록 비례제어입력을 인가하는 하이브리드(hybrid)방식을 이용한다. 즉, 우선순위의 계층이 $|s_i| < \epsilon_i$ 를 만족하면 슬라이딩 모드에 들어간 것으로 간주하여 순차적으로 최하위계층까지 의사 슬라이딩 모드에 들어가게 하는 것이다(14).

3.2 불감대를 둔 슬라이딩 모드 제어

Fig. 11은 매니플레이터 각 링크의 오차상태공간을 표시한 것으로 0-0는 $s = 0$ 인 절환선을 나타낸다. 의사 슬라이딩 모드에의 수렴여부를 판별하기 위해서 절환선과 나란하게 일정한 폭($|s| = \epsilon$)을 가진 보조선으로 c-c, d-d를 나타내었다. 불감대 설정 및 의사 슬라이딩 모드에의 수렴 여부를 판별하는데 이용하기 위한 상태값과 절환면 사이의 거리를 다음과 같은 점과 직선사이의 거리 D로 나타내었다.

$$D = \frac{|c_i e_i + \dot{e}_i|}{\sqrt{c_i^2 + 1}} \quad (15)$$

절환면 주변에서 발생하는 채터링을 경감시키는 방안으로 상태변수와 절환면 사이의 거리가 $D = \delta$ 의 값을 가지는 보조선 a-a와 b-b를 불감대

로 설정하여 상태변수의 절대치가 이 영역으로 수렴하면, 식 (10)의 제어 입력식에서 외란에 대응하기 위한 제어 입력 M_{ii} 를 Fig. 12와 같이 연속적으로 제적의 상태에 따라 가감할 수 있도록 한다.

4. 실험 및 결과 고찰

4.1 슬라이딩 모드 제어 실험

금형의 연마는 연마숫돌이 금형표면에 접촉하여 작업이 진행되므로 연마시에는 정삭가공 후에 생긴 커터 자국(cut mark)이나 금형표면의 불규칙한 형상 등으로 인해 연마숫돌에는 상당히 불규칙한 힘이 전달된다. 이로 인해 연마로봇의 각 축에는 부하변동이나 진동 등의 외란에 의해 연마제적의 제어에 큰 영향을 미친다. 따라서, 외란이나 부하변동에 강인한 제어 알고리즘이 필요한데 본 연구에서는 불감대를 둔 슬라이딩 모드 제어 알고리즘을 적용하여 연마시 제어의 강인성을 평가하고자 한다.

슬라이딩 모드 제어에 적용되는 절환면의 기울기를 축 C, 축 A에 대해 각각 $c_1 = 2, c_2 = 2$ 로 선정하고, 절환파라미터의 값을 Table 3과 같이 두었다. 실험에서 사용된 샘플링 시간은 1 msec로 하였고 매 샘플링 시간마다 제어결과 데이터가 DSP에서 PC의 데이터 파일로 전송된다. 계층제어법을 적용하는데 필요한 의사 슬라이딩 모드 영역 이내로의 수렴여부를 판별하기 위해서 $\varepsilon_1 = 0.5, \varepsilon_2 = 0.4$ 로 설정하여 ε_i 이내로 수렴하기 전에는 의사 슬라이딩 모드가 발생하기 전인 것으로 간주한다. 의사 슬라이딩 모드가 발생하기 이전의 하위 계층의 제어는 축 C의 경우 $K_{p1} = 1.4$ 의 비례계인과 $K_{d1} = 0.12$ 의 미분계인을 가지는 비례미분 제어를 이용하고, 축 A의 경우는 $K_{p2} = 1.3$ 의 비례 계인을 가지는 비례 제어에 의해 제어되도록 하였다. 이때의 비례 및 미분계인은 오버슈트가 발생하지 않을 정도의 계인값으로 시행착오적으로 적절히 선정하였다. 과도 응답에 대한 제어 입력식은 기준 입력의 속도 성분과 가속도 성분이 0이 되므로 식 (9)로부터 다음과 같이 구해진다.

$$u_i = \psi_{ai}e_i + \psi_{fi} \quad (16)$$

채터링 경감을 위하여 불감대 이내에서의 외란에 대응하는 제어 입력인 ψ_{fi} 를 Fig. 12와 같이 두

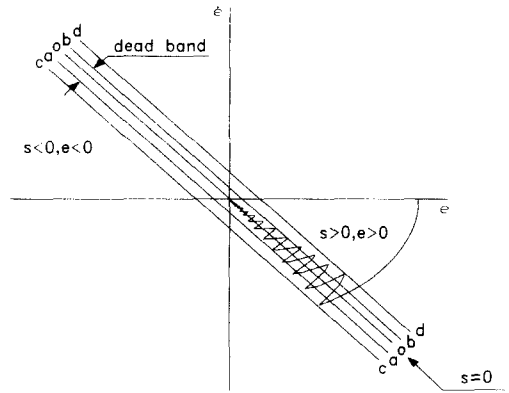


Fig. 11 Phase plane with a dead zone around the switching line

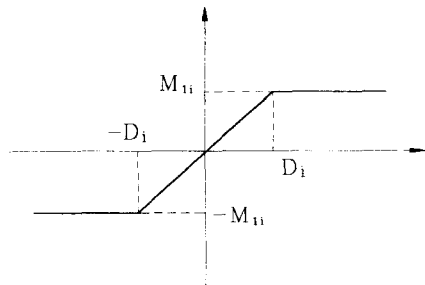


Fig. 12 Control input gain M_{ii} within the dead zone

Table 3 Switching parameters

	α_i	M_i	D_i	M_2
Axis C	-0.04 $s_1e_1 > 0$ -0.01 $s_1e_1 < 0$	$M_1 = 1.0$	$D_1 = 0.01$	0.0
Axis A	-0.12 $s_2e_2 > 0$ -0.05 $s_2e_2 < 0$	$M_2 = 1.2$	$D_2 = 0.1$	0.0

었다. 여기서 α_i 와 ψ_{fi} 에 대한 불감대의 크기는 Table 3과 같다. Table 3의 절환파라미터를 이용하여 스텝 입력에 대한 실험을 수행한 결과인 축 C, 축 A의 위치제어 결과 선도는 Fig. 13 및 Fig. 14와 같고, 속도선도는 Fig. 15, 16과 같다. 그 결과를 보면 위치오차가 거의 없이 제어 추종성능이 우수함을 알 수 있으나, 축 C의 속도선도에서 보인 축 A의 경우보다 채터링이 약간 더 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 축 C를 구성하는 메가토크 모터

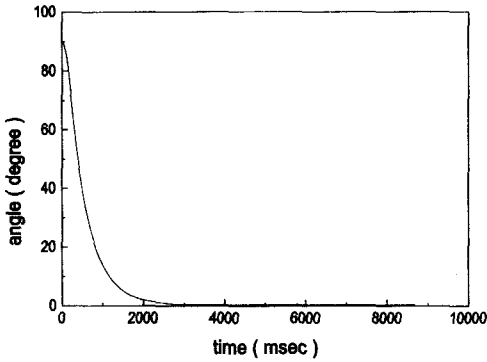


Fig. 13 Position error of axis C by sliding mode control

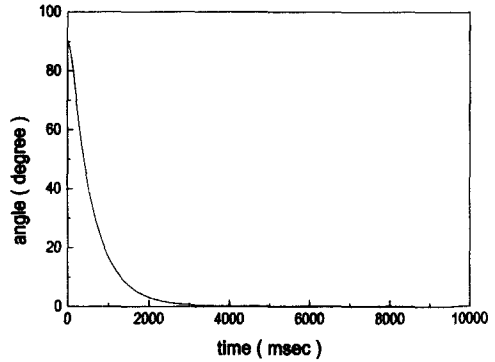


Fig. 14 Position error of axis A by sliding mode control

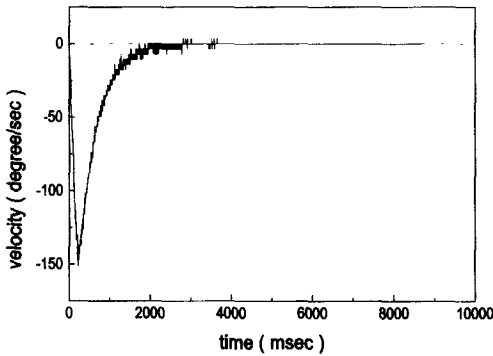


Fig. 15 Velocity error of axis C by sliding mode control

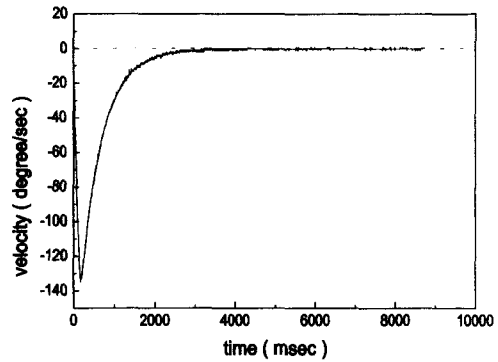


Fig. 16 Velocity error of axis A by sliding mode control

는 직접 구동형 모터이기 때문에 축 A를 구성하는 하모닉 드라이브 내장형 AC 서보 모터에 비해 제어 성능이 민감하기 때문으로 판단된다.

4.2 연마 성능평가 실험

제작한 연마로봇의 연마 성능을 평가하기 위해 연마로봇을 이용한 평면 연마와 연마로봇을 머시닝 센터에 부착시킨 5축 자동 연마로봇 시스템에 의한 곡면 연마실험을 수행하였다. 이때 사용된 금형은 일반적으로 금형재료로 많이 이용되고 있는 SKD11 이고, 연마공구는 Nagase사의 연마공구를 사용하였다.

4.2.1 연마공구 및 연마공구의 조건

금형을 기계가공(황삭, 정삭가공)한 후에는 커터 자국(cut mark, cusp)이 생성된다. 연마작업은 기계가공에 의해 발생하는 커터 자국을 제거하고, 금형 표면을 경면화 하는 작업으로 이러한 연마작업에는 연마공구가 중요한 부분을 차지한다. 연마작업을 위한 연마공구의 조건 및 고려 사항은 다음과 같다⁽⁵⁾.

- 1) 연마공구의 자세는 곡면과 항상 법선방향을 유지하도록 해야 한다.
- 2) 연마공구는 연마면이 바닥에만 존재하도록 해야 한다.
- 3) 연마공구와 단말효과기(end effector)에 해당하는 연마숫돌의 연결은 유연성을 가지도록 볼

조인트(ball joint)나 유니버설 조인트(universal joint)와 같이 유연성을 가져야 한다.

- 4) 연마력 부여를 위한 정압기구로 공압 실린더가 사용될 경우에는 공작물과 공구의 법선 방향 거리는 유효구간(공압실린더의 행정거리) 내에서는 연마 깊이에 영향을 주지 않도록 해야 한다.
- 5) 공작물의 경면가공을 위한 균질한 표면 처리를 위해서 연마 패턴도 중요한 고려대상에 해당한다.
- 6) 플랫 엔드 밀(flat end-mill)이나 볼 엔드 밀과 같이 측면 절삭에 의한 공구는 연마작업에 적용될 수 없다.

이러한 점들을 고려하여 본 연구에서는 Nagase 사의 유연한 형태의 볼 조인트(ball joint)로 구성된 연마공구를 사용하여 연마실험을 수행하였다. 볼 조인트 형태의 연마공구는 매쉬(mesh)가 각각 #100, #200, #400, #800인 연마숫돌을 부착하여 사용할 수 있는 형태로 되어 있다. Fig. 17은 볼 조인트 형태의 연마공구의 구조를 나타내고, Photo 3은 연마숫돌을 나타낸다.

4.2.2 평면 연마 실험

평면의 연마실험은 볼 조인트 형태의 #200, #800의 연마공구를 사용하였다. 연마조건은 가압력이 약 27 N, 연마횟수는 #200, #800의 연마공구로 각각 20회 반복하였다. 평면 연마실험은 연마로봇만을 이용하였으므로 축 A는 고정되고, 축 C의 회전만 주어져 금형의 표면을 원형으로 연마하게 된다. Table 4는 평면 연마 전의 가공면의 가공조건과 연마시의 가공조건을 나타낸다. Photo 4 (a)는 연마 전의 표면이고, Photo 4 (b)는 연마 후의 표면을 나타낸다.

표면 거칠기 측정은 TOKYO SEIMITSU의 형상조도 측정기(규격 : SURFCOM 200B, 모델명 : E-RA-SOIA)를 이용하여 각각 3회 측정하여 평균치로 그 면의 표면 거칠기로 하였다. 연마 전의 가공면 표면 형상은 Fig. 18과 같고, 연마 후의 표면 형상은 Fig. 19와 같다. 연마 전의 가공면의 표면 거칠기는 최대높이 Rmax가 23.76 (μm), 중심선 평균 거칠기 Ra가 4.05 (μm)이다. 그리고, 연마 후의 가공면의 표면 거칠기는 Rmax가 2.46 (μm), Ra가 0.18 (μm)로 측정되었다. 이는 일반적으로 금형의

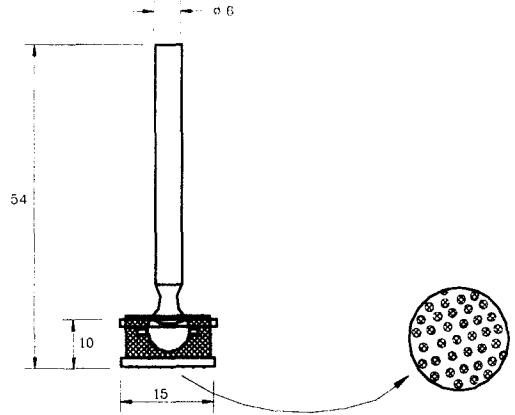


Fig. 17 Structure of polishing tool of ball-joint type

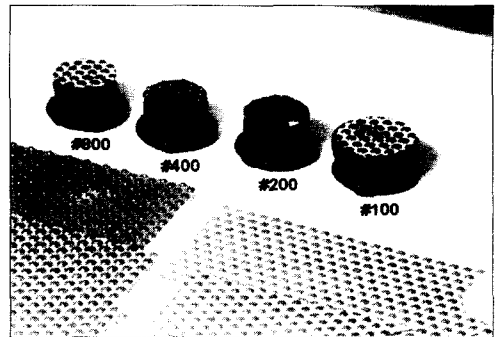


Photo 3 Ball-joint type polishing tool

Table 4 Polishing condition of plane surface

Size of workpiece		60×40×10
Shape		Plane
Condition before polishing	Material	SKD11
	Ball End Mill	R = 5 mm
	RPM	700 rpm
	Feed rate	350 mm/min
	Pick feed	0.5 mm
Polishing condition	Polishing tool	#200, #800
	RPM	800 rpm
	Polishing force	27 N
	Feed rate	400mm/min
	Polishing number	#200 - 20 #800 - 20
Time		#200 - 10 min. #800 - 10 min.

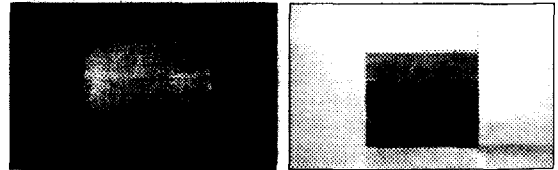
표면 거칠기 R_{max} 2~5 (μm)를 만족하는 값이다⁽¹⁵⁾. 개발한 연마로봇에 의해 약 10분 정도 연마 했음에도 불구하고 표면 거칠기 측정결과를 보면 연마특성이 양호하게 얻어짐을 알 수 있다.

4.2.3 곡면 연마 실험

구성된 5축 자동 연마로봇 시스템에 의한 연마 성능을 평가하기 위하여 곡면금형의 연마실험을 수행하였다. 실험에 사용된 금형은 평면연마에서와 마찬가지로 SKD11 금형강이고, 규칙적인 곡면(ruled surface)을 가지는 금형을 설계 제작하였다. 제작된 금형은 머시닝센터를 사용하여 플랫폼 엔드밀에 의한 황삭가공으로 곡면의 윤곽을 가공한 후 3축 가공용 NC 프로그램을 이용하여 정삭가공용 NC 데이터를 생성하여 볼 엔드 밀에 의해 Fig. 20과 같은 경로의 정삭가공으로 제작되었다. 또한, 연마용 NC 데이터는 5축 가공용으로 생성되었으며, 이는 5축 NC 데이터 분리 프로그램을 이용하여 머시닝센터용 3축 NC 데이터와 연마로봇용의 연마레직 데이터로 분리하였다.

연마실험에 사용된 연마공구는 #200, #800의 연마공구를 사용하였고, 연마 전·후의 가공조건은 Table 5와 같다. Photo 5는 5축 자동 연마로봇 시스템에 의한 규칙적인 곡면 형태의 금형연마 장면으로 금형의 곡면과 연마공구가 정확히 법선방향을 유지함을 알 수 있다. Photo 6은 정삭가공에 의한 기계가공면이고, Photo 7은 연마 후의 가공면을 나타낸다. 이때 연마공구의 경로는 정삭가공에 의한 커터 자국의 수직방향으로 생성된 5축 NC 데이터에 의한 연마공구의 이동경로와 동일한 경로로 연마작업을 수행하였다. Photo 7에서 보는 바와 같이 5축 자동 연마로봇 시스템에 의해 금형의 곡면이 깨끗하게 연마되었음을 확인할 수 있다. Mitutoyo사의 형상 조도 측정기(SURF TEST SV-400)를 이용하여 연마면의 표면 거칠기를 측정해 본 결과 R_{max} 가 0.9 ~ 4.5 (μm), R_a 가 0.13 ~ 1.03 (μm)로 나타났다. 이는 곡면금형이 요구하는 R_{max} 2 ~ 5 (μm)를 만족하는 양호한 표면이라 할 수 있다⁽¹⁵⁾. 그러나, 연마시간이나 연마공구의 회전수, 이송속도 등의 연마조건이 최적이라고는 볼 수 없으므로 본 연구에서 개발한 연마로봇에 적합한 최적의 연마조건의 선정을 위한 실험이 요구되어 진다.

이상의 실험결과를 종합해 보면 본 연구에서 개발한 머시닝센터 장착형 연마로봇을 이용한 5축 자



(a) Before polishing (b) After polishing
Photo 4 Polishing surface

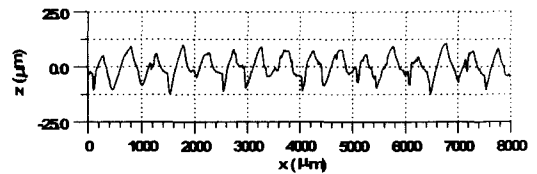


Fig. 18 Surface shape before polishing
($R_{max}=23.76 \mu\text{m}$, $R_a=4.05 \mu\text{m}$)

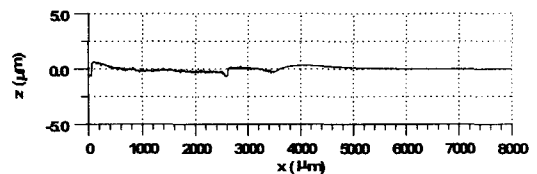


Fig. 19 Surface shape after polishing
($R_{max}=2.46 \mu\text{m}$, $R_a=0.18 \mu\text{m}$)

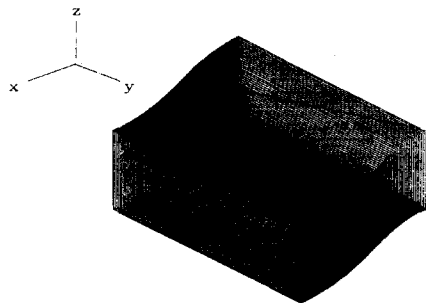


Fig. 20 Trajectory of ball end mill



Photo 5 Curved surface polishing

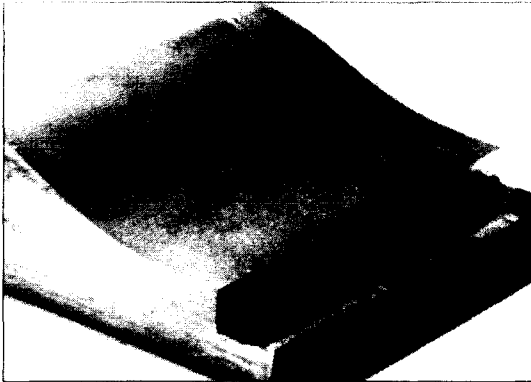


Photo 6 Curved surface before polishing

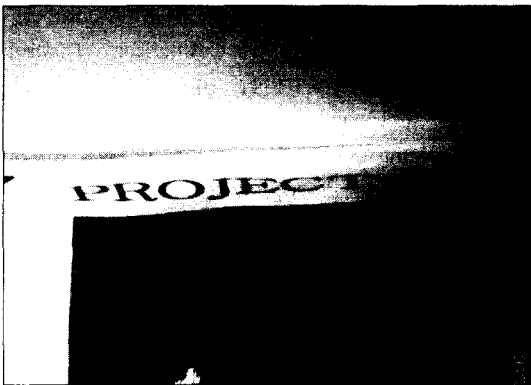


Photo 7 Curved surface after polishing

동 연마로봇 시스템에 의해 자유곡면 금형의 연마가 가능하다는 것이 실험적으로 입증되어 금형의 연마공정의 자동화에 크게 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 지금까지의 금형 연마공정에서 대부분이 숙련공에 의해 수작업으로 수행되어 왔던 곡면금형의 연마작업을 자동화하기 위해 머시닝센터 장착형 2축 연마로봇을 제작하여 3축 머시닝센터에 장착시킴으로 5축 연마로봇 시스템의 효과를 얻을 수 있는 자동 연마로봇 시스템을 개발하였다. 개발한 연마로봇 시스템을 이용하여 연마실험을 수행한 결과 평면 금형 연마인 경우 Ra가 0.18 (μm), 곡면 금형의 연마인 경우 Ra가 최대 1.03 (μm)으로 비교적 양호한 연마성능을 얻을 수 있었다. 따

Table 5 Polishing condition of curved surface

Size of workpiece		100×80×40
Shape		Ruled surface
Condition before polishing	Material	SKD11
	Ball End Mill	R = 5 mm
	RPM	700 rpm
	Feed rate	350 mm/min
	Pick feed	1.0 mm
Polishing condition	Polishing Tool	#200, #800
	RPM	800 rpm
	Polishing force	10 N
	Feed rate	80 mm/min
	Polishing number	#200 - 8 #800 - 8
	Time	#200 - 2 hour #800 - 2 hour

라서, 3축 머시닝센터에 2자유도의 연마로봇을 장착하여 5축 연마가공을 가능케 함으로써 5축 전용 연마 시스템보다 저가격으로 자동 연마 시스템을 구성할 수 있게 되었다. 연마작업시 발생하는 진동 및 연마력의 변동 등으로 연마로봇의 궤적제어에서 발생하는 오차를 줄이기 위해 DSP를 이용한 고속 제어기를 구성하여 부하변동이나 외란 등에 강인한 슬라이딩 모드 제어알고리즘의 적용을 가능케 하였으며, 연마작업을 수행한 결과 궤적 제어추종성능이 우수함을 확인하였다. 또한 머시닝센터와 연마로봇간의 동기화 인터페이스를 구현함으로써 5자유도를 부여할 수 있는 시스템의 효과를 얻으므로 임의의 곡면을 가진 금형의 경우에도 정확한 곡면 연마궤적이 형성됨을 확인하였다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금 및 부산대학교 기성회 재원 연구비의 지원으로 이루어 졌음.

참 고 문 헌

1. M. Kunieda, T. Nakagawa, and T. Higuchi, "Robot Polishing of Curved Surface with Magnetically Pressed Polishing Tool," JSPE, Vol. 54, No.1, pp. 121-125, 1988.
2. 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壓磨キ加工," 日本研 粒加工學會 學術講演會 講演文集, pp. 431-434, 1995.
3. 박균명, 장진희, 한창수, "자동경면 다듬질 장치의 실험적 분석에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제12권 제 9호, pp. 30-39, 1995.
4. 조현덕, 자유곡면을 위한 5-축 정밀가공에 관한 연구, 박사학위논문, 한국과학기술원, 1993.
5. 박삼진 외 8명, 3차원 곡면의 설계 및 가공 통합시스템 개발, 최종보고서, 한국기계연구원, 1993.
6. NSK, Megatorque Motor System, User's Guide, NSK, 1991.
7. Harmonic Drive Systems Co., AC Servo Actuator - FH2000 series, User's Guide, Harmonic Drive Systems Co., 1993.
8. Harmonic Drive Systems Co., AC Servo Control Unit HA-600 series, User's Guide, Harmonic Drive Systems Co., 1993.
9. M. C. Lee and N. Aoshima, "Real Time Multi-Input Sliding Mode Control of a Robot Manipulator Based on DSP," Proceeding of Society of Instrument and Control Engineers, pp. 1223-1228, 1993.
10. 이민철, 靑島伸治, "슬라이딩 모드를 이용한 로봇 매니플레이터의 실시간 제어에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제 16권, 제 11호, pp. 2011-2020, 1991.
11. 이민철, 신기태, "슬라이딩 모드 제어를 이용한 SCARA 로봇의 동적시뮬레이터 개발에 관한 연구," 대한기계학회논문집(A), 제 21권, 제 4호, pp. 535-548, 1997.
12. M. C. Lee, K. Son, D. S. Ahn, M. H. Lee, J. M. Lee, and S. H. Han, "Implementation of a New Sliding Mode Control for SCARA Robot," Proceeding of the '95 American Control Conference, pp. 1387-1391, 1995.
13. M. C. Lee and S. J. Go, "Real Time Fuzzy-Sliding Mode Control for SCARA Robot Based on DSP," Proceeding of 2nd Asian Control Conference, pp. 599-602, 1997.
14. 진상영, 이민철, 이만형, "슬라이딩 모드를 이용한 SCARA 로봇의 궤적제어에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제 19권, 제 1호, pp. 99-110, 1995.
15. 정재현, 금형곡면의 연마가공 시스템, 연구결과 보고서, 부산대학교 ERC/NSDM, 1995.

부 록

A. Comparison of characteristics between the developed polishing robot system and the conventional system

	Developed polishing robot system	5 axes polishing robot system	6 axes polishing robot system
Structure	Machining center + 2 axes polishing robot	Gantry type	6 axes robot + 3 axes tool system
Construction degree of freedom	5	6	6
Stiffness	Good	Good	Bad
Control performance	Good	Fair	Fair
Cost	Cheap	Expensive	Expensive

B. Specification of polishing robot system

Item	Specification	Maker	Model type
Maching center	Maching Center with 3 axes	DAEWOO Heavy Ind.	ACE-V30
Polishing robot	Axis C	Megatorque motor	NSK
	Axis A	AC servo motor with harmonic drive	Harmonic drive systems
Rotation tool	Single cylinder	FESTO	DSN-25-50-PPV
Polishing force	Air motor	FUJI	F-6SM-28R
Controller for polishing robot	DSP controller	Loughborough Sound Images Ltd	DPC/C40B