

머시닝센터 장착형 곡면금형 연마용
로봇 시스템 개발에 관한 연구

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

하 덕 주, 이 민 철*, 최 영 규**, 이 만 형***

*부산대학교 기계공학과 (Tel:051-510-2439; Fax: 051-512-9835; E-mail: mclee@hyowon.cc.pusan.ac.kr)

**부산대학교 전기공학과 (Tel:051-510-2371; Fax: 051-513-0212; E-mail: ykchoi@hyowon.cc.pusan.ac.kr)

***부산대학교 제어기계공학과 (Tel:051-510-2331; Fax: 051-512-9835; E-mail: mahlee@hyowon.cc.pusan.ac.kr)

Abstracts Polishing work for a curved surface die demands simple and repetitive operations and requires much time while it also demands high precision. Therefore it is operated by skilled worker in handiwork. But workers avoid polishing work gradually because of the poor environments such as dust and noise. In order to reduce the polishing time and to alleviate the problem of shortage of skilled workers, researches for automation of polishing have been pursued in the developed countries such as Japan. In this research we develop a polishing robot with 2 degrees of freedom motion and pneumatic system, and attach it to machining center with 3 degrees of freedom to form an automatic polishing system which keeps the polishing tool vertically on the surface of die and maintains constant pneumatic pressure. The developed polishing robot is controlled by real time sliding mode control using DSP(digital signal processor). 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 polishing robot.

Keywords Polishing robot, Machining center, Digital signal processor, Curved surface die, Constant pressure

1. 서론

산업현장에서의 금형(자동차, 가전제품 등의 외관)의 연마 공정은 대부분이 숙련공의 수작업으로 수행되고 있다. 그러나, 이와 같은 연마공정은 작업시 발생하는 먼지, 소음, 진동 등으로 인하여 작업자들이 점차 기피하여 기술인력이 점차 줄어들고 있는 실정이다. 또한, 전체 금형제작 시간의 약 30~50%를 차지하므로 상당히 많은 시간을 요하는 작업이고⁽²⁾, 일반적으로 제품의 외관은 제품 품질에 직접적으로 영향을 미치며, 소비자의 구매욕과 관련되므로 연마 공정은 매우 중요한 공정이라 할 수 있다.

3차원 자유곡면을 이루고 있는 금형의 경우는 연마작업이 매우 어렵고, 시간 또한 많이 소요되는 작업이다. 이러한 금형 연마의 자동화를 통한 생산성 향상(연마시간의 단축, 인력난 해소, 품질향상, 후공정 및 형상가공의 단축 등)을 추구하고자 선진국에서는 이미 활발히 연구가 진행되어 왔다. 일본의 경우, 5축 머시닝센터(machining center)를 이용한 자동연마 시스템이 이미 상용화 되어 판매되고 있다. 국내의 산업현장에서도 금형연마의 자동화에 대한 필요성이 더욱 절실해지고 있다. 한편, 산업현장에서 보편화된 대부분의 머시닝센터는 3축 머시닝센터로서, 이를 이용한 연마 작업은 충분한 자유도를 가지지 못하므로 3차원 자유곡면의 연마에는 제약이 따른다. 즉 금형 형상이 복잡할 경우는 공작물을 여러번 셋팅해야 하며, 금형의 형상에 따라 복잡한 고정구의 제작에 많은 시간과 인력이 소비된다. 반면에, 3차원 곡면의 가공에 가장 적합한 것으로 알려져 있

는 5축 연마 시스템의 경우에는 충분한 자유도의 부여로 인하여 공작물의 준비대체 시간과 고정구의 제작에 소요되는 시간이 감소되고, 인적비용의 절감 효과를 기대할 수 있으며, 유효가동율의 증가, 연속무인운전이 가능하고, 가공 정밀도의 향상 및 복잡한 금형연마가 용이하다는 등의 장점을 가지고 있다⁽⁶⁾. 그러나, 3차원 곡면 연마가 가능한 다관절 로봇에 의한 5자유도 연마 시스템의 경우에는 공작 기계와 비교해서 강성과 위치결정정도가 떨어지는 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 충분한 강성을 가지는 3축 머시닝센터에 2자유도를 부가하여 연마공구가 임의의 자유곡면과 항상 법선 방향으로 유지하며 일정한 연마력으로 연마를 할 수 있는 머시닝센터 장착형 곡면금형 연마용 로봇 시스템을 개발하여 연마공정의 자동화를 도모하고자 한다.

2. 연마로봇 시스템의 구성

2.1 머시닝센터 장착형 2자유도 로봇의 제작

본 연구를 수행하기 위해서 제작한 머시닝센터 장착형 2자유도 로봇의 외관은 사진 1이고, 머시닝센터에 장착하기 위한 샹크(shank)는 사진 2와 같다. 2자유도 로봇의 구조는 곡면금형의 5축 연마가공을 위해서 3축 머시닝센터에 필요한 2자유도를 부여하기 위해 적합한 구조로 설계하였으며, 그 구조는 그림 1과 같다. 연마 작업시의 연마력, 허용 모멘트, 허용 최대토크 등의 제반사항이 고려되었고, 설계시 머시닝센터의 z축 이송(feed)의 제약으로 인한 연마 부속장치의 크기에 제한을 두었다. 본 연구에서는 이런 사항들을 고려하여 베가토크 모터를 축C로, AC

서보모터(하모닉 드라이브 내장형)를 축A로 구성하였다^(3,4,5). 그리고, 연마시에 일정한 압력을 부여하는 부분은 공압 실린더를 이용하였고, 연마에 사용되는 연마 스톨을 회전시키는 부분은 공압 모터를 이용하였다. 또한, 공압 모터를 지지하면서 공압 실린더에 의해 움직이도록 실린더 가이드를 부착하여 견고성을 부여하였다.

2.2 작동원리

그림 1에서 보는 바와 같이 머시닝센터 장착형 2자유도 로봇의 축C와 축A에 의해 연마공구가 연마면에 법선방향

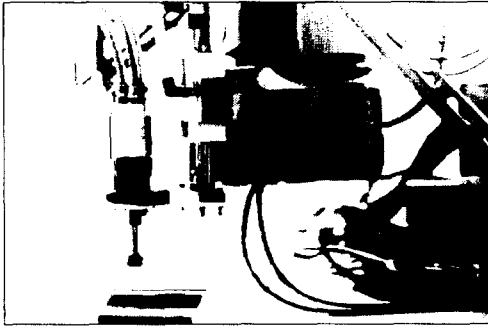


사진 1. 개발한 로봇의 외관
Pic. 1. Appearance of the developed robot

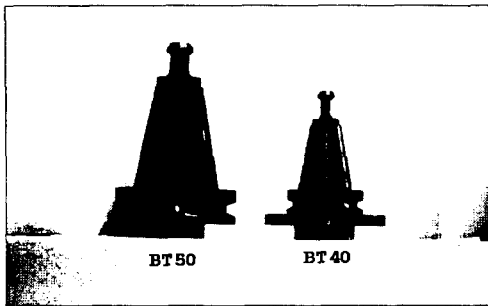


사진 2. 머시닝 센터 부착용 샹크
Pic. 2. Shank for attaching to machining center

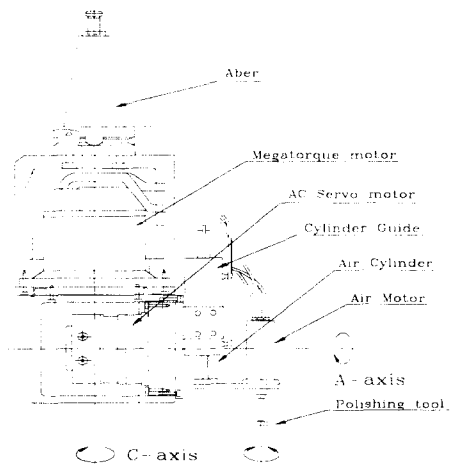


그림 1. 2자유도 연마로봇의 구조
Fig. 1. Structure of polishing robot with two degree of freedom

에 놓이도록 각도 제어가 이루어져 원하는 연마궤적을 따르게 된다. 로봇이 급형의 연마면에 수직이 되면 일정한 연마력을 부여하는 공압 실린더에 의해 연마공구는 연마면을 일정한 힘으로 누르게 된다. 이때 공압 모터의 회전력에 의해 연마공구가 회전하면서 연마작업을 수행해 나간다. 이런 일련의 동작들은 머시닝 센터와 동기를 이루면서 동시에 이루어진다.

2.3 모델링 및 기구학

로봇이 연마 작업을 수행하기 위해서는 연마 공구의 궤적을 따라 이동하는 로봇의 단말 효과기(end effector)에 대한 기구학 및 역기구학 해를 도출해야 한다. 이를 위하여 구성된 머시닝센터에 장착된 로봇을 간략히 형상화해서 좌표계를 표시하면 그림 2와 같다. 머시닝센터의 기준 좌표계 (x_0, y_0, z_0)로부터의 로봇 각축의 위치가 ($l_x, l_y, l_z, \theta_4, \theta_5$)로 주어질 때 로봇의 절대 좌표계 X, Y, Z 에서 공구단좌표계 x,y,z 까지의 좌표 변환은 D-H(Denavit-Hartenberg) 표현방식을 이용하면 표 1과 같이 구해진다⁽⁷⁾. 이를 이용하여 최종적으로 연마시 2자유도 로봇이 생성해야 할 궤적을 구하기 위해서 역기구학해를 산출하면 각 축이 운동해야 할 이동량 ($l_x, l_y, l_z, \theta_4, \theta_5$)는 식 (1), (2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x - l_1 C_4 C_5 - l_2 S_4 - l_3 C_4 S_5 \\ P_y + l_1 S_4 C_5 - l_2 C_4 + l_3 S_4 S_5 \\ P_z + l_1 S_5 - l_3 C_5 \end{bmatrix} \quad (1)$$

표 1. D-H 표현방식에 의한 관절좌표 파라미터
Table 1. Polishing robot link coordinate parameters by D-H representation

Polishing robot arm link coordinate parameters				
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	$\theta_4 + 90$	90	0	$d_3 = 0$
5	$\theta_5 - 180$	90	0	l_2
6	180	180	l_1	l_3

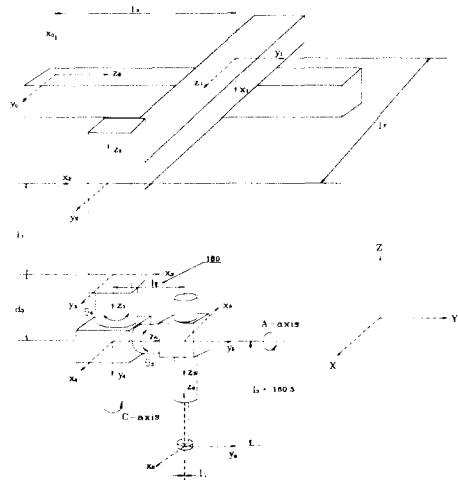


그림 2. 연마로봇의 좌표계 설정
Fig. 2. Establishing link coordinate systems for polishing robot

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

$$\theta_5 = \text{atan2}(a_1/C_4, a_3) \quad (2)$$

2.4 머시닝센터와 연마로봇 간의 동기화

연마로봇이 머시닝센터와 동일한 시간대에서 동작하면서 연마작업을 수행하기 위해서는 연마면의 한 지점에 해당하는 머시닝센터의 위치이동과 연마 로봇의 각도 제어가 동시에 이루어져야 한다. 이를 위해 머시닝센터를 제어하는 NC 제어기의 M51 Code를 두 시스템간의 동기신호로 이용한다. 동기화 방법은 그림 3과 같은 회로를 이용한다. 머시닝센터는 M51 Code를 발생함과 동시에 위치이동이 시작되고, DSP는 포토커플러(photo-coupler)를 통해 M51 Code를 인식하여 각도 제어가 이루어진다. 이와 같은 방법으로 순차적으로 각 연마지점을 이동해 나가면서 연마가 이루어진다.

2.5 5축 NC 데이터의 분리

본 연구에서 개발한 5축 연마 시스템이 연마작업을 수행하기 위해 필요한 데이터는 5축 NC 데이터이다. 그러나, 5축 NC 데이터를 직접 이용할 수는 없으므로 3축 머시닝센터용 NC 데이터와 연마로봇의 궤적 데이터로 분리하여 각각의 시스템에 사용하게 된다. 분리된 3축 NC 데이터는 미리 머시닝센터에 직렬(serial) 통신으로 전송해 두고, 궤적 데이터는 호스트 컴퓨터에서 파일로 저장해 두었다가 연마작업 수행과 동시에 DSP에서 동기신호 M51을 확인하면서 궤적 데이터를 제어해 나간다. 그림 4는 분리된 데이터의 일부이다.

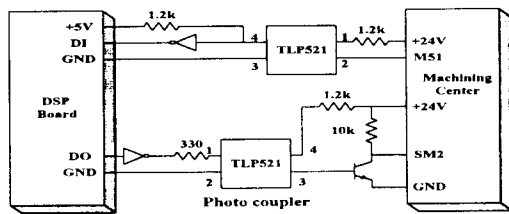


그림 3. 동기화를 위한 회로

Fig. 3. Circuit for synchronization between machining center and robot

< 5축 NC data >

G21
G17G40G90
M19
G92X.0Y.0Z60.0C.0A.0
G0X90.0Z50.0
Z30.0
G1Z20.0F.167
X80.0F.133
X263.235Y-
180.0Z19.894C90.0A3.493F.204
X268.0Z19.429A7.333F.226
X274.145Z18.421A11.455F.247

< 3축 NC data >

N10 G21
N20 G17G40G90
N30 M19
N40 M51G92X0.000Y0.000Z60.000
N50 G0X90.000Z50.000
N60 Z30.000
N70 G1Z20.000F100.200
N80 X80.000F79.800
N90 M51X263.235Y-180.000Z19.894F3143.919
N100 M51X268.080Z19.429F66.000
N110 M51X274.145Z18.421F91.116

< C, A 축 궤적 data >

C	A	time
0.000	0.000	0.000
90.000	3.493	4.902
90.000	7.333	4.425
90.000	11.455	4.049
90.000	15.729	3.802
90.000	19.932	3.717
90.000	23.687	3.861
90.000	26.263	4.464
90.000	25.925	5.051
90.000	22.186	5.131
90.000	17.484	4.386

그림 4. 5축 NC data의 분리 예

Fig. 4. Example of two type data divided from 5-axis NC data

3. 실험

3.1 실험장치

5축 연마가공을 위한 연마로봇 시스템의 전체 블록선도는 그림 5와 같다. 제작된 머시닝센터 장착형 연마로봇을 구동하기 위한 실험장치는 그림 5에서 보는 바와 같이 DSP C40 시스템을 이용하여 2자유도 로봇 위치의 실시간 동기제어가 가능하도록 연마로봇용 고속 제어시스템을 구성하였다. 산업용 컴퓨터는 제어 프로그램, 입출력 데이터, 머시닝센터로의 NC 데이터 전송 등을 관리한다. DSP 보드는 제어 알고리즘의 계산과 디지털 신호의 입출력과 제어 입력신호를 처리한다. DIO 카드는 로봇으로부터의 측정된 위치 신호와 머시닝센터의 NC 제어기에서 발생하는 M51 Code를 체크하여 DSP로 전달하고, 해제 신호를 머시닝센터로 전송한다. 또한 공압 모터의 정·역방향 회전을 위한 신호의 I/O도 담당한다. D/A 카드는 DSP로부터의 디지털 제어출력을 아날로그로 바꾸어 로봇의 모터를 구동하기 위한 서보 드라이브로 보내주는 기능을 수행한다. 각 축의 서보 드라이브는 D/A 카드로부터 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 카드로 보내는 기능을 수행한다. 일정한 연마력을 부여하는 정압을 얻기 위한 공압 시스템은 그림 6과 같이 구성하였다. 정압의 유지는 압력 정밀 레귤레이터를 사용하여 공압 실린더 양단의 일정한 압력차를 이용하고, 이 압력은 압력 센서를 이용하여 계속할 수 있게 구성되어 있다. 솔레노이드 밸브는 연마공구의 회전력을 얻기 위한 공압 모터의 정·역 회전방향을 제어한다.

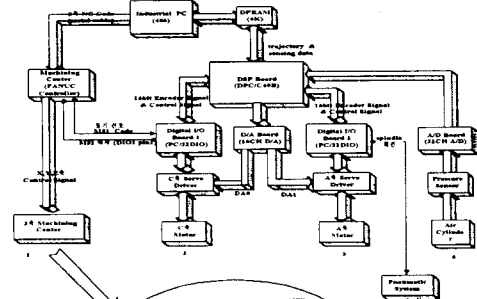


그림 5. 전체 시스템의 블록선도
Fig. 5. Block Diagram of total system

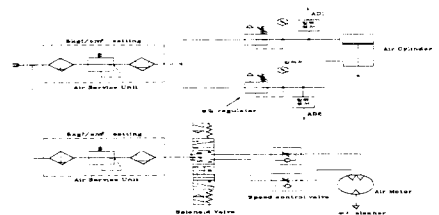


그림 6. 공압 시스템의 구성
Fig. 6. Configuration of pneumatic system

3.2 슬라이딩 모드 제어 실험

연마작업은 연마 전가공면의 표면상태에 따라 부하변동이나 외란 등이 작용하므로 고정도의 제어를 위해서는 강인한 제어알고리즘이 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 슬라이딩 모드 제어를 적용하여 외란이나 부하변동에 대처할 수 있도록 하였다^[1]. 축 C는 180°, 축 A는 90° 위치제어를 행했을 때의 위상궤적, 위치오차, 속도오차선도는 각각 그림 7, 8, 9, 10, 11, 12에 나타낸다. 그 결과를 보면 축C나, 축A의 위치제어가 정밀하면서도 거의 채터링 없이 제어가 수행되었음을 알 수 있다. 따라서 연마작업시 발생하는 진동이나 부하변동에 강인한 위치제어를 수행할 수 있다.

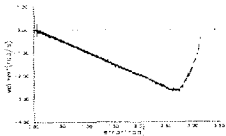


그림 7. C축의 위상궤적
Fig. 7. Phase trajectory of C-axis

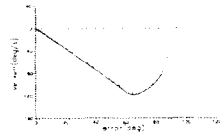


그림 8. A축의 위상궤적
Fig. 8. Phase trajectory of A-axis

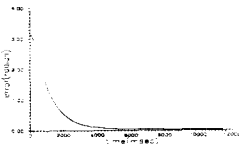


그림 9. C축의 위치오차
Fig. 9. Position error of C-axis

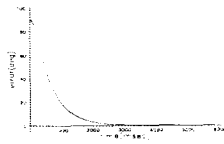


그림 10. A축의 위치오차
Fig. 10. Position error of A-axis

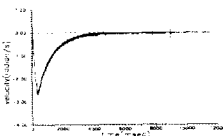


그림 11. C축의 속도오차
Fig. 11. Velocity error of C-axis

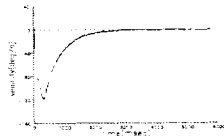


그림 12. A축의 속도오차
Fig. 12. Velocity error of A-axis

3.3 연마 성능 실험

구성된 연마로봇의 성능을 시험해보기 위해 평면의 연마작업을 수행해 보았다. 사용된 금형강은 SKD11이고, 연마 전가공면의 가공조건은 다음과 같다.

- Ball End Mill : R = 5 mm
- Spindle rpm : 700 rpm
- Feed Rate : 350 mm/min
- > 1회전당 이동거리 : 0.5 mm
- Pick Feed : 0.5 mm

그리고, 연마조건은 다음과 같다.

- 가압력 : 32 N
- 공압 모터 회전수 : 800 rpm
- 이송속도 : 400 mm/min
- 연마공구 : #200, #800

연마 전의 표면과 연마 후의 표면은 사진 3, 4와 같다. 평면의 연마가공면은 사진 4에서 보는 바와 같이 양호한 표면상태를 가짐을 알 수 있다.

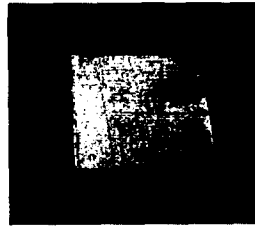


사진 3. 연마 전의 표면
Pic. 3. Surface before polishing

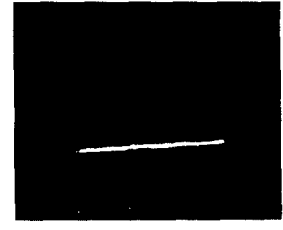


사진 4. 연마 후의 표면
Pic. 4. Surface after polishing

4. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 기존의 3축 머시닝센터에 2자유도를 부가하여 3차원 자유곡면의 연마가 가능한 연마로봇을 제작하여 곡면연마의 자동화를 이루기 위한 연구를 수행하였다. 이를 위해 머시닝센터 장착형 2자유도 연마로봇을 설계·제작하였고 일정한 연마력을 얻기 위한 공압시스템을 구성하였다. 연마로봇의 제동제어를 위해 DSP를 이용한 고속제어기를 구성하여 연마작업시 발생하는 부하변동이나 외란 등에 강인한 슬라이딩 모드 제어 알고리즘을 적용하였다. 그 결과 제어 추종성능이 우수함을 확인하였다. 동시에 머시닝센터와 연마로봇간의 동기화 인터페이스를 구현하였다. 또한 개발된 연마로봇 시스템을 이용하여 평면 연마 실험을 수행하여 로봇의 연마성능을 확인하였다.

현재, 연마로봇 시스템을 이용한 곡면연마를 위한 금형을 제작 중이며 향후과제로서 3차원 자유곡면 형상의 금형을 연마하여 그 성능을 평가할 예정이다. 또한 다양한 형태의 금형 연마가 가능하도록 통합 프로그램을 구성할 예정이다.

참고 문헌

- [1] M.C.Lee, et al, " Implementation of a New Sliding Mode Control for SCARA Robot", '95 ACC, vol.1, pp. 1387~1389, 1995.
- [2] K. Moriguchi, T. Kondo, S. Igarachi, " Study on Automatic Polishing of Injection -Mold Polishing with constant pressure under controlled tool staying time-", 砥粒加工學會學術講演會講演文集, 1995
- [3] NSK, *Megatorque Motor System, NSK User's Guide*, 1991
- [4] Harmonic Drive Systems Co., *AC Servo Actuator - FH200 series, Harmonic Drive Systems Co. User's Guide*, 1993
- [5] Harmonic Drive Systems Co., *AC Servo Control Unit HA-600 series, Harmonic Drive Systems Co. User's Guide*, 1993
- [6] 양민양, 조현덕, "자유곡면을 위한 5-축 정밀가공에 관한 연구", 한국과학기술원 박사학위 논문, pp. 1-3, 1993
- [7] 박삼진, 이수홍, 류갑상 외 6명, 3차원 곡면의 설계 및 가공 통합 시스템 개발, 5차년도 보고서, 한국기계연구원, 1993