

머시닝센터 장착형 로봇을 이용한 곡면금형의 연마 자동화에 관한 연구

A Study on the Automation of Polishing for Curved Surface Die Using Robot Attached to Machining Center

조 영 길(부산대 대학원), 이 민 철(부산대 공대), 이 만 형(부산대 공대)
Y.G. Cho (Graduate School, Pusan Univ), M.C. Lee(Pusan Univ), M.H. Lee(Pusan Univ)

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. However 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.

In this research, a polishing robot with 2 degrees of freedom motion attached to machining center with 3 degrees of freedom and pneumatic system forms an automatic polishing system which keeps the polishing tool vertically on the surface of die and maintains constant pneumatic pressure. A synchronization between machining center and polishing robot is accomplished by using M code of machining center. A ruled surface and shadow mask are polished by the developed polishing robot.

Key Words : polishing robot(연마 로봇), machining center(머시닝센터), curved surface die(곡면 금형), constant pressure(정압), shadow mask(쉐도우 마스크), digital signal processor(디지털신호 처리기)

1. 서론

산업현장에서의 금형의 연마 공정은 대부분이 숙련공의 수작업으로 수행되고 있다. 그러나, 연마 공정은 작업시 발생하는 먼지, 소음, 진동 등으로 인하여 작업자들이 점차 기피하게되어 기술 인력이 점차 줄어들고 있는 실정이다. 또한, 금형의 연마 공정은 전체 금형제작 시간의 약 30~50%를 차지하므로 상당히 많은 시간을 요하는 작업이고⁽¹⁾, 연마 품질은 제품의 외관에 직접적인 영향을 미치므로, 연마 공정은 매우 중요하다고 할 수 있다.

3차원 자유 곡면을 이루고 있는 금형의 경우는 연마 작업이 매우 어렵고, 시간 또한 많이 소요되는 작업이다. 이러한 금형 연마의 자동화를 통한 연마 시간의 단축, 인력난 해소, 품질 향상, 후공정 및 형상 가공의 단축 등을 추구하고자 선진국에서는 이미 활발한 연구가 진행되어 왔으며, 5축 머시닝센터(machining center)를 이용한 자동 연마 시스템의 상품화가 이루어져 왔다. 국내의 산업현장에서도 금형연마의 자동화에 대한 필요성이 더

욱 절실해지고 있다. 한편, 산업현장에서 보편적으로 사용되고 있는 대부분의 머시닝센터는 3축 머시닝센터로서, 이를 이용한 연마 작업은 충분한 자유도를 가지지 못하므로 3차원 자유 곡면의 연마에는 제약이 따른다. 즉 금형 형상이 복잡할 경우는 공작물을 여러번 셋팅해야 하며, 금형의 형상에 따라 복잡한 고정구의 제작에 많은 시간과 인력이 소모된다. 반면에, 3차원 곡면 가공에 가장 적합한 것으로 알려져 있는 5축 연마 시스템의 경우에는 충분한 자유도의 부여로 인하여 공작물의 준비 대체 시간과 고정구의 제작에 소요되는 시간이 감소되고, 인적 비용의 절감 효과를 기대할 수 있으며, 유효 가동율의 증가 및 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 연마 공구가 임의의 자유곡면과 항상 법선 방

항을 유지하면서 일정한 연마력으로 연마할 수 있는 머시닝센터 장착형 2축 곡면 금형 연마용 로봇 시스템을 제작하여 연마 공정의 자동화를 도모하고자 한다. 또한 연마 성능 평가를 위해 임의의 곡면을 가진 금형 연마를 시도하여 그 성능을 검토하고자 한다.

2. 연마 시스템의 구성

2.1 전체구성

본 연구를 수행하기 위해서 제작된 시스템의 전체 구성은 그림 1과 같다. 머시닝센터 장착형 연마로봇을 구동하기 위한 제어기로서 DSP C40 시스템을 이용하여 2자유도 로봇 위치의 실시간 동시제어가 가능하도록 구성하였다. DSP(digital signal processor) 보드는 산업용 컴퓨터의 슬롯에 장착되어 DPRAM을 통해 컴퓨터와 통신하고 제어 알고리즘의 계산과 디지털 신호의 입출력 및 제어입력신호를 처리한다. 컴퓨터에서는 제어 프로그램, 입출력 데이터, NC 데이터 생성 및 머시닝센터로의 전송 등을 관리한다. DIO 카드는 로봇으로부터의 측정된 위치 신호와 머시닝센터의 NC 제어기에서 발생하는 M51 코드를 검사하여 DSP로 전달하고, 해제 신호를 머시닝센터로 전송한다. 또한 공압 모터의 정·역방향 회전을 위한 신호의 I/O도 담당한다. D/A 카드는 DSP로부터의 디지털 제어출력을 아날로그신호로 바

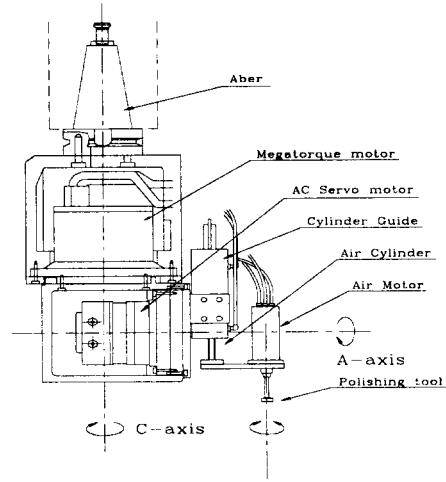


그림 2. 2자유도 연마로봇의 구조

꾸어 모터의 서보 드라이브로 전달하며, 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. 솔레노이드 밸브는 연마 공구의 회전력을 얻기 위한 공압 모터의 정·역 회전방향을 제어한다.

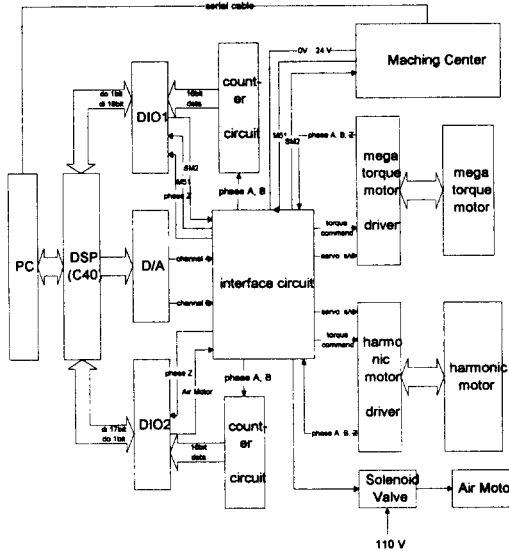


그림 1. 전체 시스템 블록선도

2.2 연마 로봇의 구조

연마 로봇의 구조는 곡면금형의 5축 연마가공을 위해서 3축 머시닝센터에 2자유도를 부여한 구조로 제작하였으며, 그 구조는 그림 2와 같다. 로봇의 구성을 위해서 연마 작업시의 연마력, 허용 모멘트, 허용 최대토크 등의 제반사항이 고려되었으며, 메가토크 모터를 축C로, AC 서보모터(하모닉 드라이브 내장형)를 축A로 구성하였다(3,4,5). 연마시에 일정한 압력을 부여하는 부분은 공압 실린더를 사용하였고, 연마에 사용되는 연마숫돌을 회전시키는 부분은 공압 모터를 사용하였으며, 연마숫돌은 유니버설 조인트의 원리를 이용하여 공압 모터의 주축에 장착하였다.

2.3 머시닝센터와 로봇의 동기화

머시닝센터와 연마 로봇이 동일한 시간대에 운동을 시작하기 위해서 머시닝센터의 M51 코드를

이용한 동기화 과정이 필요하다. 머시닝센터의 지령에 M51코드가 존재할 경우 머시닝센터는 SM2 신호가 발생할 경우에만 다음 명령으로 진행하는 성질을 이용하였다. M51 신호는 오픈 콜렉터 (open collector) 방식으로 출력되므로 그림 3과 같은 회로로 검출한다.

2.3 공압 시스템

연마시 일정한 연마력을 부여하는 정압을 얻기 위한 공압 시스템은 그림 4와 같다. 정압의 유지는 압력 정밀 레귤레이터를 사용하여 공압 실린더 양단의 일정한 압력차를 이용하고, 이 압력은 압력 센서를 이용하여 계측할 수 있게 구성하였다. 압력 레귤레이터의 특성을 파악하기 위하여 정상상태에서 실린더의 로드 수직 방향으로 10N 정도의 힘을 주었다. 이 때의 압력의 변화는 그림 5와 같이, 0.9초 부근에서 0.35 kg/cm²로 증가했다가 20 msec안에 정상상태에 도달함을 알 수 있다.

2.5 모델링 및 기구학

연마 공구의 궤적을 따라 이동하는 로봇의 단말 효과기(end effector)에 대한 기구학 및 역기구학 해를 도출하기 위하여 머시닝센터에 장착된 로봇을 간략히 형상화해서 좌표계를 표시하면 그림 6과 같다. 기준 좌표계 (x₀, y₀, z₀)로부터의 로봇 각축의 위치가 (l_x, l_y, l_z, θ₄, θ₅)로 주어질 때 로봇의 절대 좌표계 (X, Y, Z)에서 공구 선단좌표계 (x,y,z) 까지의 좌표 변환 행렬을 유도하기 위해서는 D-H(Denavit- Hartenberg) 표현방식을 이용하면 체계적으로 용이하게 구해진다⁽⁷⁾. 구한 D-H 파라미터는 표 1과 같다. 이를 이용하여 최종적으로 연마시 2자유도 로봇이 생성해야 할 궤적을 구하기 위해서 역기구학 해를 대수적으로 산출하면 각축의 이동량 (l_x, l_y, l_z, θ₄, θ₅)는 식 (1), (2)와 같이 구해진다. 여기서 l_{xc}, l_{yc}, l_{zc}는 머시닝센터의 초기 좌표설정시 일정한 값을 가진다.

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

$$\begin{aligned} \theta_4 &= \text{atan2}(-a_x, a_y) \\ \theta_5 &= \text{atan2}(a_x/S_4, a_z) \end{aligned} \quad (2)$$

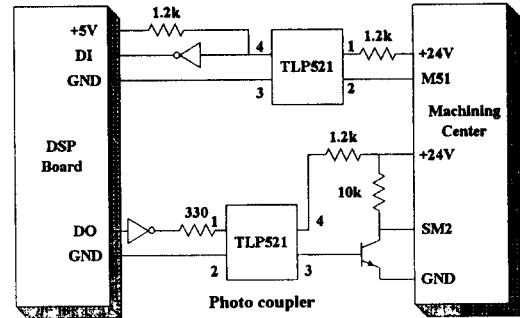


그림 3. 동기화를 위한 회로

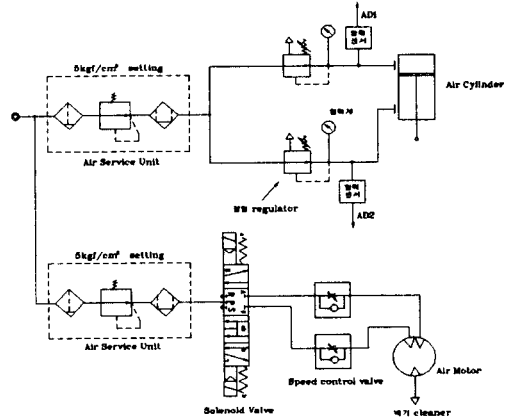


그림 4. 공압 시스템의 구성

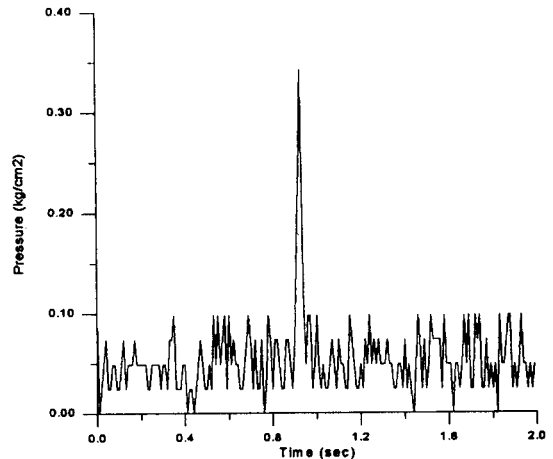


그림 5. 압력 레귤레이터의 특성

표 1. D-H 표현방식에 의한 관절 파라미터

Joint	θ_i	α_i	a_i	d_i
1	180	-90	0	l_x
2	90	-90	0	l_v
3	180	0	0	l_z
4	θ_4+270	-90	0	0
5	θ_5+180	90	0	l_2
6	90	180	l_1	l_3

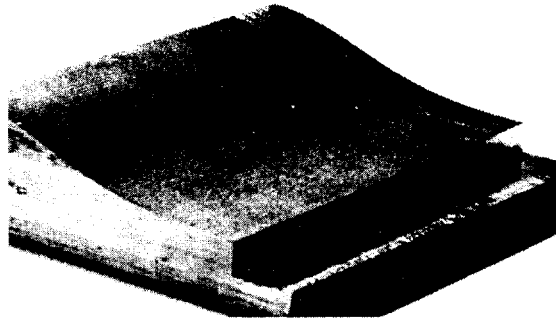


사진 1. 정삭 가공후의 ruled surface

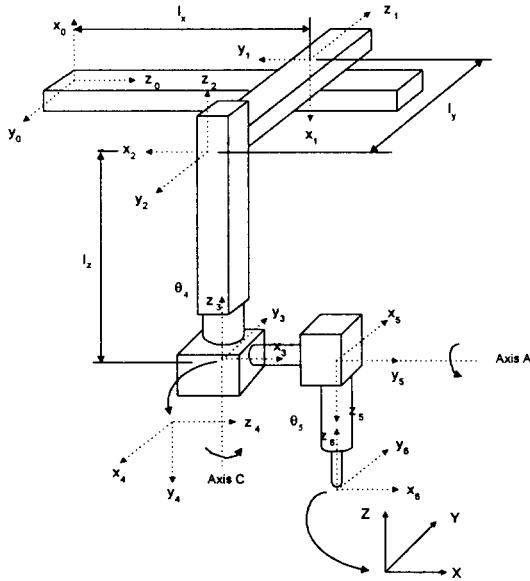


그림 7. 연마로봇의 좌표계 설정

3. 실험

3.1 5축 데이터의 분리 및 2축 데이터 보간

3축 제어기와 2축 제어기가 독립적으로 존재하므로 5축 NC 데이터를 직접 이용할 수는 없다. 그러므로 3축 머시닝센터용 NC 데이터와 연마로봇의 궤적 데이터로 분리하여 각각의 시스템에 사용하게 된다. 데이터 분리의 경우 동기화를 위해서 머시닝센터에는 이송속도(feed rate), 로봇에는 이동시간의 정보가 필요하다. 5축 NC 데이터에서 축A와 축C의 위치정보를 추출하고 3차원 공간상에서 X, Y, Z축의 이송거리와 이송속도를 이용하여 목표 궤적사이의 이동시간을 산출한다. 동기화를 위해서는 머시닝센터의 입력 데이터에 M51 코드를 추가한다. 로봇 제어서의 궤적 보간은 1msec 단위로 DDA(digital differential analyzer)방식을 사용하였다.

표 2. 정삭 가공 조건

Shape	Ruled surface	Shadow mask
Size	100×80×40mm	268×144×40mm
Material	SKD11	SKD11
Ball End Mill	R = 5mm	R = 5mm
Spindle	700 rpm	500 rpm
Feed Rate	350 mm/min	100 mm/min
Pick Feed	1.0 mm	0.5 mm

표 3. 연마 조건

Direction	Only horizontal	Vertical & horizontal
Force	7 N	15 N
Tool(Mesh)	R = 5 mm (#800)	
Spindle	800 rpm	
Feed Rate	100 mm/min	
Pick Feed	0.5 mm	

3.2 연마 실험을 위한 전가공

연마 실험을 위해 ruled surface와 웨도우 마스크(shadow mask)를 제작하였다. 황삭 가공은 반경 10mm의 플랫 엔드 밀(flat end mill)을 사용하였으며, 곡면의 형상은 사진 1과 같고, 정삭 가공 조건은 표 2와 같다.

3.3 연마 실험

본 연구에서 구성한 연마로봇을 이용하여 곡면과 웨도우 마스크에 대해 연마 작업을 수행하였다. 먼저 횡방향으로 메쉬(mesh) 200번을 가진 연마 스톨을 이용하여 연마한 후 연마 조건을 표 3과 같이 설정하여 연마 방향과 가압력이 연마면에 미치는 영향을 평가하였다. 연마 후의 ruled



사진 3. 연마 후 ruled surface



사진 4. 연마 후 웨도우 마스크

표 4. 연마 후 표면 거칠기

position	ruled surface		shadow mask	
	Ra (μm)	Rmax (μm)	Ra (μm)	Rmax (μm)
1	0.254	1.46	0.09	0.8
2	1.166	5.20	0.55	7.6
3	0.213	2.84	0.25	1.4
4	1.528	8.88	0.12	1.0

surface의 경우는 사진 3, 웨도우 마스크의 경우는 사진 4와 같고, 표면 거칠기를 측정한 결과는 표 4와 같다. 위치 1과 2는 곡면의 법선 방향으로 15N의 힘을 가한 곳이고, 위치 3과 4는 7N의 힘을 가한 곳이다. 종방향으로 연마후 횡방향으로 연마한 곳은 위치 1과 3이고, 횡방향으로만 2회 연마한 곳은 위치 2와 4이다. 이 결과를 통해 5축 곡면 연마후 만족할 만한 연마면을 얻을 수 있음

이 확인되었고, 곡면의 법선 방향으로 15N의 힘을 가하면서 횡방향과 종방향을 교대로 연마한 쪽의 연마면이 더 양호함을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 기존의 3축 머시닝센터에 2자유도를 추가하여 3차원 자유곡면의 연마가 가능한 연마로봇을 이용하여 곡면연마의 자동화에 관한 연구를 수행하였다. 머시닝센터와 연마로봇간의 동기화 인터페이스를 구현하였으며 5축 NC 데이터를 3축 머시닝센터용 데이터와 2축 로봇용 데이터로 분리·생성하여 5축 연마시스템을 구현하였다. 개발된 연마로봇 시스템을 이용하여 곡면 및 웨도우 마스크에 대한 연마 실험을 통해서 로봇의 연마성능이 양호함을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 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
2. 하덕주, 이민철, 최영규, 이만형, "머시닝센터 장착형 곡면금형 연마용 로봇 시스템에 관한 연구", 96한국자동제어학술회의논문집, pp. 1312 - 1315, 1996
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