

머시닝센터 장착형 연마 로봇의 성능 향상에 관한 연구

A Study on the Improvement of Performance of Polishing Robot Attached to Machining Center

°조 영 길*, 이 민 철**, 이 만 형**, 전 차 수***

*부산대학교 기계공학과 (Tel:+82-51-510-3081; Fax:+82-51-512-9835; E-mail: ygicho@hywon.pusan.ac.kr)

**부산대학교 지능기계공학과 (Tel:+82-51-510-2439; Fax:+82-51-512-9835; E-mail: mclee@hyowon.pusan.ac.kr)

***경상대학교 산업공학과 (Tel:+82-591-751-5338; Fax:+82-591-54-5236; E-mail: mhyoun@nongae.gsnu.ac.kr)

Abstracts Cutting process has been automated by progress of CNC and CAD/CAM, but polishing process has been depended on only experiential knowledge of expert. To automate the polishing process polishing robot with 2 degrees of freedom which is attached to a machining center with 3 degrees of freedom has been developed. This automatic polishing robot is able to keep the polishing tool normal on the curved surface of die to improve a performance of polishing. Polishing task for a curved surface die demands repetitive operation and high precision, but conventional control algorithm can not cope with the problem of disturbance such as a change of load. In this research, we develop robust controller using real time sliding mode algorithm. To obtain gain parameters of sliding mode control input, the signal compression method is used to identify polishing robot system. To obtain an effect of 5 degrees of freedom motion, 5 axes NC data for polishing are divided into data of two types for 3 axis machining center and 2 axis polishing robot. To find an efficient polishing condition to obtain high quality, various experiments are carried out.

Keywords polishing robot, sliding mode control, signal compression method, machining center, curved surface die

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 미진하여 대부분 경험적 지식에 의존하는 숙련공의 수작업으로 수행되고 있다. 그러나, 이와 같은 연마공정은 작업시 발생하는 먼지, 소음, 진동 등으로 인한 작업자들의 기피현상으로 기술인력이 점차 줄어들고 있는 실정이므로 연마 공정의 자동화는 절실히 요구되고 있다. 이에 3차원 곡면의 가공에 가장 적합한 것으로 알려져 있는 5축 연마 시스템을 구현하기 위하여 선행 연구에서는 3축 머시닝센터에 2자유도를 부가하여 연마 공구가 임의의 자유곡면과 항상 법선 방향을 유지하며 일정한 연마력으로 연마할 수 있는 머시닝센터 장착형 곡면금형 연마용 로봇 시스템을 개발하였다.⁽⁵⁾ 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 유효가동용의 증대 및 연속부인운전을 가능하게 하고, 가공 정밀도의 향상 및 복잡한 금형 연마가 용이할 것으로 예상된다. 그리고 산업현장에서 보편화된 3축 머시닝센터를 이용하여 5축 가공효과를 얻을 수 있다는 점이 개발된 연마 시스템의 가장 큰 장점이라 할 수 있다.

개발된 연마 시스템에 의한 연마 공정시 연마 공구는 연마면에 수직인 방향으로 일정한 힘을 가하면서 연마 작업을 수행해야 한다. 그러나 선행 연구에서 적용한 고전적인 제어알고리즘의 경우에는 부하의 변동 등 외란에 대한 로봇의 위치결정 정도가 떨어지게 되므로 가공물의 표면 거칠기에 악영향을 미치게 되었다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해서 슬라이딩 모드 제어 알고리즘을 적용하였으며⁽¹⁾, 절환 파라미터의 경계를 설정하기 위해서 신호압축법⁽⁴⁾을 이용하여 필요한 시스템 파라미터를 구하였다.

또한 구성된 시스템을 이용하여 최적의 효율적인 연마 조건을 제시하기 위하여 가공물의 표면 거칠기에 영향을 미치는 주축의 회전속도 및 이송속도, 가공시 연마면에 미치는 수직 가공력, 가공횟수 등의 가공조건⁽²⁾을 다양하게 설정하여 연마 실험을 수행하였다. 그리고 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. 본 연구에서는 사용자가 편리하게 사용할 수 있는 GUI(Graphic User Interface)환경에서 방대한 데이터를 분리할 수 있는 분리 프로그램을 개발하였다.

2. 연마 로봇의 슬라이딩 모드 제어

머시닝센터에 장착되는 2축 연마 로봇의 구조는 그림 1과 같

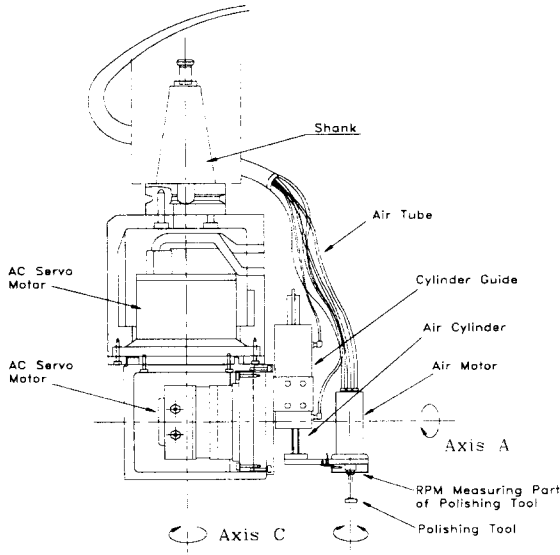


그림 1. 2축 연마 로봇의 구조
Fig 1. Structure of 2 link polishing robot

다.

2.1 슬라이딩 모드 제어

2축 연마 로봇에 대해 비례미분제어를 적용할 경우 외란에 의해 계측추종오차가 발생하였다. 이에 본 연구에서는 외란변화에 강인한 슬라이딩 모드 제어를 적용하였다.⁽³⁾ 비선형 미분방정식으로 표현되는 연마 로봇에 대해서 슬라이딩 모드 제어를 적용하기 위한 절환파라미터를 유도하는 것이 쉽지 않으므로 본 연구에서는 비선형 성분을 모두 외란으로 간주함으로써 선형 시스템의 경우와 같이 절환파라미터를 쉽게 유도할 수 있도록 하였다.

연마 로봇의 각 관절 서보계의 운동방정식에서 나타나는 비대각 요소, 원심력, 코리올리력 등의 비선형요소를 전부 외란으로 간주하여 변수 F_i 로 두면 연마 로봇의 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 , F_i , k_i , u_i 는 각각 등가관성모멘트, 등가점성감쇠계수, 토크상수 및 제어입력을 나타낸다.

연마 로봇이 슬라이딩 모드상에 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 속도는 다음과 같다.

$$e_i = \theta_i - \theta_{di}, \quad \dot{e}_i = \dot{\theta}_i - \dot{\theta}_{di} \quad (2)$$

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

$$s_i = c_i e_i + \dot{e}_i \quad (3)$$

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.

$$u_i = \psi_{ai} e_i + \psi_{bi} \dot{e}_i + \psi_{fi} \quad (4)$$

식 (4)에서 ψ_{bi} 항은 원심력과 코리올리력 등에 대한 보상항이며 ψ_{fi} 는 외란에 대한 보상항이다.

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

$$s_i s_i = s_i (c_i e_i + \dot{e}_i) \quad (5)$$

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

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

$$\begin{cases} \frac{k_i}{J_i} \psi_{ai} > 0 & \text{if } s_i e_i < 0 \\ \frac{k_i}{J_i} \psi_{ai} < 0 & \text{if } s_i e_i > 0 \end{cases} \quad (6a)$$

$$\begin{cases} c_i + \frac{k_i}{J_i} \psi_{bi} - \frac{B_i}{J_i} < 0 & \text{if } s_i \dot{e}_i > 0 \\ c_i + \frac{k_i}{J_i} \psi_{bi} - \frac{B_i}{J_i} > 0 & \text{if } s_i \dot{e}_i < 0 \end{cases} \quad (6b)$$

$$\begin{cases} \frac{k_i}{J_i} \psi_{fi} - \frac{F_i}{J_i} < 0 & \text{if } s_i > 0 \\ \frac{k_i}{J_i} \psi_{fi} - \frac{F_i}{J_i} > 0 & \text{if } s_i < 0 \end{cases} \quad (6c)$$

식 (6)에 의하면 각축의 절환 파라미터는 매니퓰레이터의 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 신호압축법에 의해 구해 질 수 있다.

2.3 절환파라미터의 선정

계의 동특성으로부터 비선형요소를 제외한 선형요소의 미지 파라미터를 추정할 수 있는 방법으로 신호압축법이 알려져 있다. 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 임펄스응답과 신호압축법에 의해 구한 선형요소만의 임펄스 응답간의 상호상관계수를 구하여 그 값이 최대가 될 때의 미지 파라미터가 참값이 되도록 추정하였다. 매니퓰레이터에 시험신호를 증폭해서 입력할 경우 계가 불안정하게 되므로, 비례제어루프를 이용해 그 결과를 측정하였다. 이 때 입력력 전달함수는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{K_{pi} k_i}{J_i s^2 + B_i s + K_{p_i} k_i} = \frac{\omega_{ni}^2}{s^2 + 2\xi_i \omega_{ni} s + \omega_{ni}^2} \quad (7)$$

단, k_{pi} ; i 관절에 대한 비례 게인

그림 2와 3은 신호압축법에 의한 2축 연마 로봇의 A, C축에 대한 실험결과로서 A, C축의 출력파형을 압축하고, 비선형요소를 제거한 파형을 Bode 선도로 나타낸 것이다. 이것을 이용하여 시스템 파라미터인 J_i 와 B_i 를 구할 수 있다. 신호압축법에서 구한 연마 로봇의 등가관성모멘트 J_i 와 등가점성계수 B_i 는 표 1과 같다. J_i 와 B_i 를 이용하여 식 (6)에 의해 슬라이딩 모드 존재 조건을 만족하는 절환 파라미터의 한계치를 구할 수 있다. 표 2는 실험에서 사용한 절환 파라미터 값이며 외란에 대응하는 제어입력 ψ_{fi} 는 다음과 같이 정의하였다.

$$\psi_{fi} = \begin{cases} M_{a1} + M_{a2} |e_i| & \text{if } s < 0 \\ -M_{a1} - M_{a2} |e_i| & \text{if } s > 0 \end{cases} \quad (8)$$

표 1. 로봇의 파라미터

Table 1. System parameter of robot

	ω_n (rad/sec)	ξ	J (Kg m^2)	B (Kg m^2 /s)
A축	12	0.4	0.0114	0.10944
C축	12	0.1	0.0991	0.23784

표 2 슬라이딩 모드를 위한 절환 파라미터

Table 2. Switching parameter for sliding mode

	c	ψ_a	ψ_b	M_1	M_2
A축	5	-11.04	-0.4	1	0.5
C축	8	0	-4.6	4	1

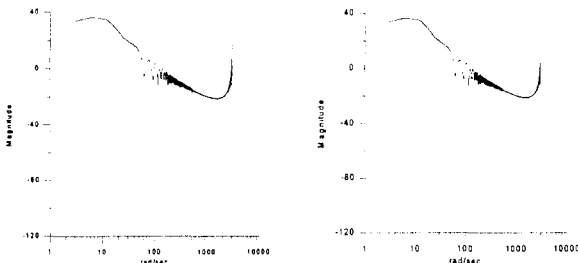


그림 2. A축의 응답

그림 3. C축 응답

Fig 2. Response of axis A

Fig 3. Response of axis C

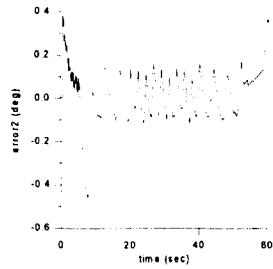


그림 5. PD제어에 의한 축 A의 궤적오차

Fig 5. Trajectory error of axis A by PD control

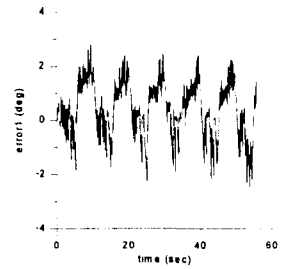


그림 6. PD제어에 의한 축 C의 궤적오차

Fig 6. Trajectory error of axis C by PD control

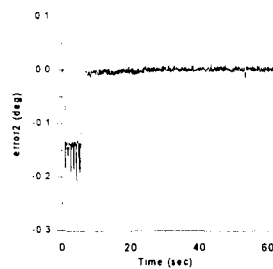


그림 7. 슬라이딩 모드에 의한 축 A의 궤적 오차
Fig 7. Trajectory error of axis A by sliding mode

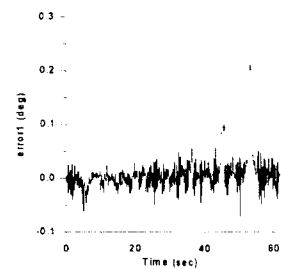


그림 8. 슬라이딩 모드에 의한 축 C의 궤적 오차
Fig 8. Trajectory error of axis C by sliding mode

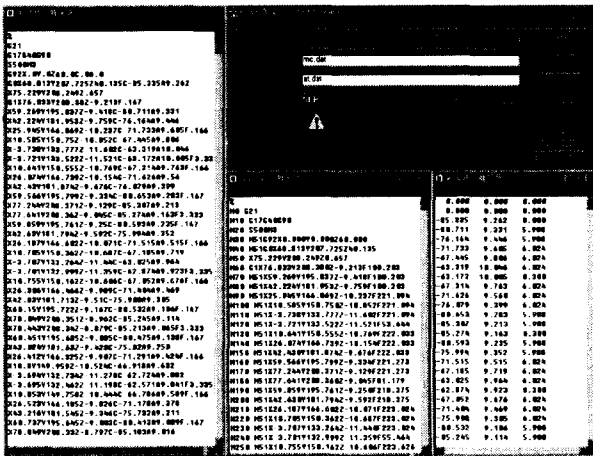


그림 4. 5축 가공 데이터 분리 프로그램

Fig 4. Polishing data separation program for two controller

절환면 주변에서 채터링을 경감시키는 방안으로 현재 상태와 절환선과의 거리가 설정된 불감대 영역으로 수렴하면, M_1 이 수렴하지 않은 경우에 비해 작은 값을 갖도록 하였다.

3. 5축 NC 데이터의 분리

개발된 5축 연마 시스템의 경우 연마작업을 수행하기 위해 생성된 데이터는 5축 NC 데이터이다. 그러나 2개의 제어기가 독립적으로 존재하므로 5축 NC 데이터를 직접 이용할 수는 없고 3축 머시닝센터용 NC 데이터와 연마로봇의 궤적 데이터로 분리하여 각각의 시스템에 사용하게 된다. 분리된 3축 NC 데이터는 미리 머시닝센터에 직렬(serial) 통신으로 전송해 두고, 2축 궤적 데이터는 호스트 컴퓨터에서 파일로 저장해 두었다가 연마작업을 수행하게 된다. 분리 프로그램의 주된 목적은 NC 데이터의 모달(modal)기능을 2축 궤적에 반영하고, 이송속도를 시간으로

환산하는 것이다. 또한 NC 데이터의 크기가 큰 경우 도스에서의 접근이 용이하지 않으므로 사용자의 편리함을 위해 윈도우즈 환경에서 구동이 가능한 프로그램을 개발하였다. 그림 4는 데이터 분리 작업후의 모습으로 왼쪽이 5축 NC 데이터 파일이고, 가운데와 오른쪽부분에 각각 분리된 3축 NC 데이터 파일과 2축 로봇의 궤적 파일을 나타내고 있다.

4. 실험 및 고찰

4.1 궤적제어실험

연마 로봇에 대해 비례미분제어를 적용할 경우 비선형 성분 및 가공물과 연마 공구사이의 마찰력으로 인해 발생하는 외란 때문에 궤적오차가 발생하는데, 그림 5와 6은 축 A와 축 C의 궤적 오차를 나타낸 것이다. 가공 경로는 섀도우 마스크(shadow mask)를 가공하기 위한 것으로 그림 7, 8은 슬라이딩 모드 제어에 의한 축 A와 축 C의 궤적오차를 나타낸 것이다. 실험결과에서 궤적의 변화율이 클 경우 상대적으로 오차가 크게 발생하였으나, 연마 작업에는 영향을 주지 못할 정도이고, 비례미분제어 결과에 비해 궤적제어성능이 우수함을 알 수 있다.

4.2 연마실험

금형 품질의 척도가 되는 표면 거칠기는 연마중의 주축속도, 이송속도, 수직 가공력 등에 의해서 영향을 받는 것으로 알려져 있지만 실제로 어떠한 조건으로 가공했을 때 좋은 표면 거칠기를 얻을 수 있는가에 대한 정량적인 결과는 알려져 있지 않다. 단지 표면 거칠기는 연마횟수에 지수적으로 향상되는 것으로만 알려져 있다.⁽²⁾ 그러므로 효율적인 연마 작업을 수행하기 위해서는 적절한 임계연마횟수를 결정할 필요가 있다.

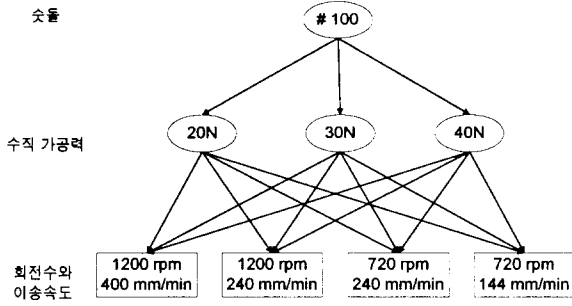


그림 9. 연마 조건
Fig 7. Polishing condition

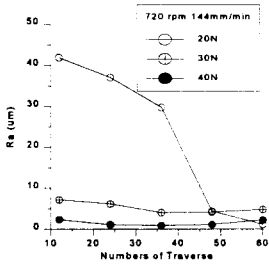


그림 10. 표면 거칠기
Fig 10. Roughness

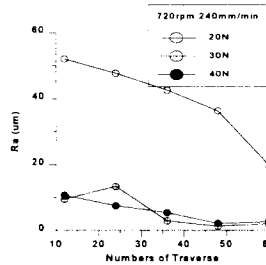


그림 11. 표면 거칠기
Fig 11. Roughness

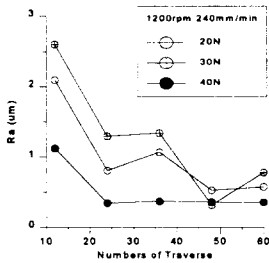


그림 12. 표면 거칠기
Fig 12. Roughness

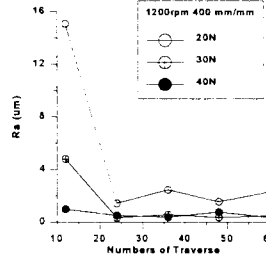


그림 13. 표면 거칠기
Fig 13. Roughness

본 연구에서는 여러 가지 조건에 대해 가공횟수에 따른 표면 거칠기를 측정하여 효율적인 연마 조건 및 연마횟수를 제시하고자 한다. 가공물은 TV의 브라운관 형상인 웨도우 마스크 곡면으로 3차원 형상을 가진다.

연마 실험 조건은 다음과 같다. 정삭은 반경 5 mm의 볼엔드 밀을 사용하였고, 효율적인 가공 방법⁽³⁾으로 알려진 fP(feed rate, pick feed) concept에 따라 이송속도는 350 mm/min, 주축속도는 700 rpm, 피이크피이드는 0.5 mm의 조건으로 결삭하여 가공면의 전체 표면 거칠기가 균일하도록 하였다. fP concept는 볼엔드밀의 1회전당 이송량 f와 피이크피이드량 P가 일치할 경우, 즉 "f=P" 일 때, 가공표면 거칠기와 연마 가공능률이 최적화된다는 개념이다.

연마 실험 조건은 그림 9와 같다. 수직 가공력을 20N, 30N, 40N으로 변화시키고 이에 따른 연마 공구의 회전속도와 이송속도를 각각 설정한 후 이송횟수를 증가시킴으로써 효율적인 연마 조건을 선정하고자 하였다. 본 실험에서 사용한 연마 시트(sheet)는 #100의 다이아몬드 시트이다. 2축 연마 로봇에 의한 연마 작업후 거칠기 측정에는 Talyor-Hobson사의 Form Talysurf Series 2를 사용하였다. 곡면에 대하여 촉침이 수직이 되도록 자동 틸팅(auto tilting)하여 8 mm를 측정하였으며 12회부터 측정된 결과는 그림 10, 11, 12, 13과 같다.

4.3 실험결과

연마 숙련공의 작업시 수직 가공력은 20N~40N으로 알려져 있으나, 비교적 거친 면을 연마할 경우에는 40N의 경우가 능률적임을 알 수 있다. 그리고 이송 속도에 대한 주축 속도의 비율이 클수록 능률적이지만 1200 rpm, 400 mm/min의 조건으로 연마할 경우 연마 숫돌과 가공물의 표면이 쉽게 타는 현상이 있었다. 이것은 연마 숫돌 입자와 연마표면의 과도한 마찰열에 기인하는 것으로 생각된다. 그림 12와 13에서 동일한 주축속도에서 240 mm/min의 이송속도로 24회 연마하는 경우보다 400 mm/min의 이송속도로 24회 연마하는 경우의 연마 시간이 17% 적으며 표면 거칠기도 큰 차이가 없어 후자가 효율적임을 알 수 있다. 표면 거칠기는 연마횟수가 증가하더라도 어느 정도 이상은 개선되지 않게 되는데 대체로 24회 정도가 임계횟수임을 연마 실험을 통해 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 기존의 3축 머시닝센터에 2자유도를 부가하여 3차원 자유곡면의 연마가 가능한 연마 로봇의 궤적 제어에 슬라이딩 모드 제어 알고리즘을 적용하여 연마 작업시 발생하는 부하변동이나 외란 등에 대처하고자 하였다. 그 결과 제어 추종 성능이 비례미분제어를 사용한 경우에 비해 우수함을 확인하였다. 또한 여러 가지 가공 조건을 설정하여 연마 실험을 수행하고 표면 거칠기를 측정하였다. 그 결과 비교적 거친 표면에 대해서 수직 가공력을 40N으로 하는 것이 능률적이고, 이송속도에 대한 주축속도의 비율이 큰 경우가 효율적이라는 것을 알 수 있었다. 그리고 5축 NC 데이터를 3축 머시닝센터용 데이터와 2축 로봇용 궤적 데이터로 분리 할 수 있는 윈도우즈용 분리 프로그램을 개발하였다.

참고 문헌

- [1] Young, K. K. D., "Controller Design for Manipulator Using Theory of Variable Structure System," IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, Vol. 8, No.2, pp.101-109, 1978.
- [2] 佐佐木哲夫, 他3名, "金型磨き作業の知識獲得と自動化に関する研究(第1報)金型熟練工の手磨き特性", 精密工學會誌, Vol. 57, pp. 497-503,1991
- [3] 이두찬, "금형자동연마의 최적조건선정 전문가시스템 개발", 부산대학교 정밀기계공학과 석사학위 논문, 1997
- [4] 이민철, 靑島伸治, "슬라이딩 모드를 이용한 로봇 매니퓰레이터의 실시간 제어에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제16권, pp.2011-2020, 1992.
- [5] 하덕주, 이민철, 최영규, 이만형, "머시닝센터 장착형 곡면금형 연마용 로봇 시스템 개발에 관한 연구", 한국자동차제어학회 논문집, 제2권, pp. 1312-1315, 1996