

머시닝센터 장착형 2축 연마 로봇의 성능 평가 (The Evaluation of Performance of 2-Axis Polishing Robot Attached to Machining Center)

박준혁*(한국공작기계 기술연구소), 안대균(한국공작기계),
이민철(부산대학교 기계공학부), 고석조(부산대학교)

J. H. Park*(Hankook Machine Tools), D. K. Ahn(Hankook Machine Tools),
M. C. Lee(Pusan National Univ.), S. J. Go(Pusan National Univ)

Abstract

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, a 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, a new sliding mode control algorithm is applied to the robot. The signal compression method is used to identify polishing robot system. To obtain an effect of 5 degrees of freedom motion, a synchronization between the machining center and polishing robot is accomplished by using M code of machining center. And also a trajectory for polishing the curved surface die by 5 axes machining center is divided into data of two types for 3 axes machining center and 2 axes polishing robot. To evaluate polishing performance of the robot, various experiments are carried out.

1. 서론

최근 다품종 소량생산의 추세로 인한 금형 수요가 증가함에 따라 능률적인 금형 가공의 요구가 증가되고 있다. 금형의 가공 공정 중에서 형상 가공의 경우는 NC공작기계 및 CAD/CAM의 발전으로 자동화가 많이 진전되고 있다. 그러나, 금형 품질에 직접적인 영향을 미치는 연마공정은 자동화가 미진하여 경험적 지식에 의존하는 숙련공의 수작업으로 수행되고 있으나, 연마 작업시 발생하는 먼지, 소음, 진동 등으로 인한 작업자들의 기피로 기술인력이 점차 줄어들고 있어 연마 공정의 자동화가 절실히 요구되고 있다. 이에 3차원 곡면 가공에 가장 적합한 5축 연마 시스템을 구현하기 위하여 선행 연구에서 3축 머시닝센터에 2자유도를 부가하여 연마 공구가 자유곡면과 항상 법선 방향에서 일정한 연마력으로 연마할 수 있는 머시닝센터 장착형 곡면금형 연마용 로봇 시스템을 개발하였다[1]. 개발된 5축 연마 시스템에 의해 연마 작업을 할 경우, 공작물의 준비 시간이 감소되고, 인적비용의 절감 효과를 기대할 수 있다. 또한 유효가동율의 증대 및 연속무인운전을 가능하게 하고, 가공 정밀도의 향상 및 복잡한 금형의 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.

연마 공구는 연마면에 수직인 방향으로 일정한 힘을 가하면서 연마 작업을 수행해야 한다. 그러나, 선행 연구의 고전적인 제어알고리즘의

경우에는 부하의 변동 등 외란에 대한 로봇의 위치결정 정도가 떨어지게 되므로 가공물의 표면 거칠기에 악영향을 미치게 되어 이러한 문제를 해결하기 위해서 슬라이딩 모드 제어 알고리즘을 적용하였으며, 절환 파라미터의 경계를 선정하기 위해서 신호압축법을 이용하여 필요한 시스템 파라미터를 구하였다[2,3].

본 연구에서는 3차원 형상을 가진 웨도우 마스크 급형을 제작하여 다양한 연마조건으로 연마 실험을 수행하여 연마 성능을 평가하고 연마품질 및 생산성에 영향을 미치는 인자들인 연마숫돌의 입도, 수직가공력, 연마방향 등의 가공조건에 대한 정량적 특성을 파악하고자 하였다. 숙련공에 의한 연마공정은 작업자의 숙련도에 의하여 제품의 품질 및 생산성이 좌우된다. 따라서 자동화 및 고능률, 고정밀도를 위해서는 작업자의 숙련도를 대신할 연마지식이 필요하게 된다[1]. 실험으로 추정된 연마 조건에 의해 웨도우 마스크 급형 전체에 대한 연마 실험을 수행함으로써 로봇의 제어성과 궤적정도 및 연마 성능을 평가하고자 하였다. 개발된 시스템을 이용하여 5축 연마 효과를 구현하기 위해서는 CAM 시스템에서 생성된 5축 가공데이터를 3축 머시닝센터 코드와 2축 로봇의 궤적 입력으로 분리해야 한다. 본 연구에서는 사용자가 쉽게 접근할 수 있는 GUI(Graphic User Interface)환경에서 방대한 데이터를 분리할 수 있는 분리 프로그램을 개발하였다.

2. 연마 로봇의 제어

머시닝센터에 장착되는 2축 연마 로봇의 구조는 Fig. 1과 같다.

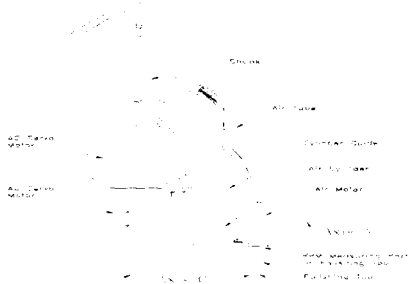


Fig. 1. Structure of 2 link polishing robot

선행연구에서 2축 연마 로봇에 대해 비례미분제어를 적용할 경우는 외란에 의한 오차가 발생하였다. 이에 본 연구에서는 외란변동에 강한

한 슬라이딩 모드 제어를 적용하였다. 비선형 미분방정식으로 표현되는 연마 로봇의 운동방정식에 대하여 슬라이딩 모드 제어의 절환파라미터를 유도하는 것은 쉽지 않으므로 비선형 성분을 모두 외란으로 간주함으로써 선형 시스템의 경우와 같이 절환파라미터를 쉽게 유도할 수 있도록 하였다.

Fig. 2에서 Fig. 3은 슬라이딩 모드 제어에 대한 A와 C축의 궤적 오차를 나타낸 것이다. 실험 결과를 보면 궤적의 변화율이 클 경우 상대적으로 오차가 크게 발생하였으나, 연마 작업에는 영향을 크게 주지 못할 정도로 성능이 우수함을 알 수 있다.

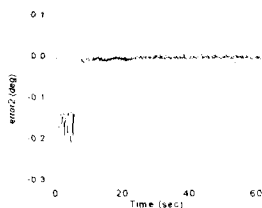


Fig. 2. Trajectory error of axis A by sliding mode

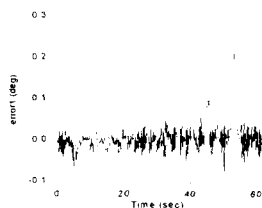


Fig. 3. Trajectory error of axis C by sliding mode

3. 5축 NC 데이터의 분리

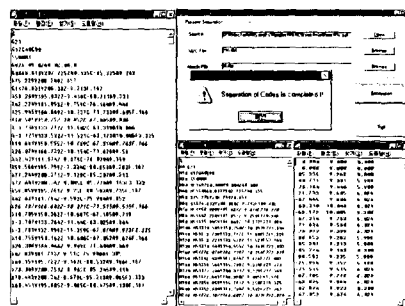


Fig. 4. Program to divide 5 axes polishing data into two types

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 있어서 반영하고, 이송속도를 시간으로 환산하는 것이다. 또한 NC 데이터의 크기가 큰 경우 DOS에서의 접근이 용이하지 않으므로 사용자의 편리함을 위해 윈도우즈 환경에서 구동이 가능한 프로그램으로 개발하였다. Fig. 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. 연마 성능 평가 실험 및 결과 고찰

숙련공의 연마 작업을 자동화하기 위해서는 일정한 수직 가공력을 규칙적이고 안정된 형태로 가공물에 반복적으로 가할 수 있는 기구의 개발이 필수적이지만 연마 작업을 효율적으로 수행하기 위해서는 연마 조건에 대한 분석도 필요하다.

본 연구에서는 연마로봇을 머시닝센터에 부착시킨 5축 자동 연마로봇 시스템으로 곡면 금형의 연마 실험을 수행하여 연마 성능을 평가한 후 효율적인 연마조건을 찾고자 한다.

4.1 실험 장치의 구성 및 연마 실험 조건

연마 실험장치는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 머시닝센터에 장착된 연마로봇과 연마로봇 위치의 실시간 동시 제어를 위한 DSP(digital signal processor)보드 그리고 일정한 수직 가공력을 유지할 수 있는 공압 장치로 구성된다. Fig. 6은 개발된 연마 로봇에 의한 연마 장면이다.

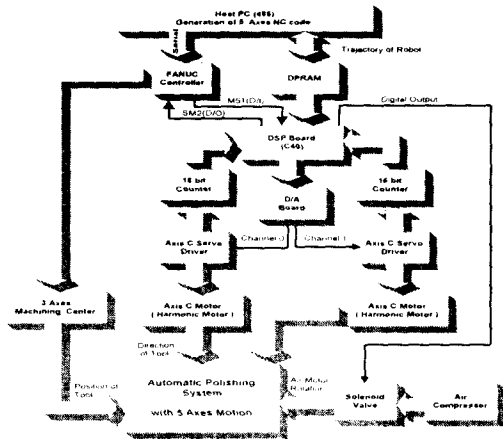


Fig. 5. Block diagram of polishing robot

사용한 연마숫돌은 엠보싱 타입의 연마시트

로서 유연한 섬유소재 위에 다이아몬드 및 CBN 입자를 강력하게 접착시킨 형태로 Fig. 7과 같다. 실험에 사용한 연마시트는 #100, #800, #1500의 3종류이며, 접착제는 레지노이드(resinoid) 본드이고, 연마유는 수용성 절연삭 가공유를 사용하였다. 또한, 가공물의 형상은 3차원 자유곡면인 웨도우 마스크(250mm×145mm)이고 재질은 금형재로 널리 쓰이는 금형강 SKD11을 사용했다[6].

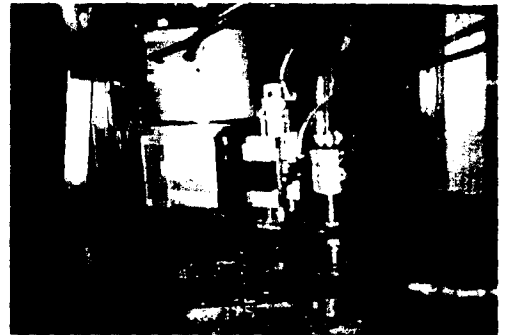


Fig. 6. Polishing process of shadow mask of robot

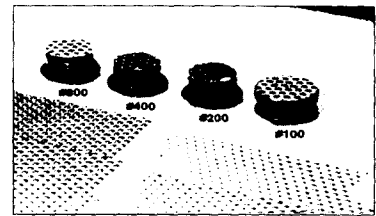


Fig. 7. Polishing sheets

연마실험에 앞서 금형을 5R의 초경볼엔드밀로 절삭하여 웨도우 마스크의 금형 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 형상으로 가공되는 절삭가공법을 도입하여 금형 연마 작업의 효율성을 높이고자 하였다. 이러한 가공법으로는 최근 대두되고 있는 고속·고정도 가공법, FF가공법, fP Concept 등 고품위, 고능률의 절삭가공법이 연구되고 있는데, 그 중에서 fP Concept[7]를 이용하여 $f=P=0.5$ mm인 절삭으로 가공면의 전체에 걸쳐 표면 거칠기가 균일하도록 하였다. 첫 번째 실험은 가공방향에 따른 연마 특성을 파악하기 위해 다른 가공조건은 일정하게 두고 이전 가공에서 가공한 방향과 같은 방향으로 가공한 결과와 이전 가공에서 가공한 방향과 직교하는 방향으로 가공한 결과를 비교하였다. 두 번째 실험은

Fig. 8과 같이 각 입도에 대하여 수직 가공력, 회전수, 이송속도를 설정하고 연마횟수를 증가시키면서 수직 가공력에 따른 중심선 평균거칠기(Ra), 최대돌깊이(Rmax)를 측정하였다.

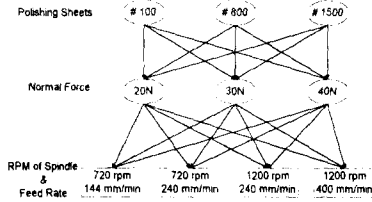


Fig. 8. Polishing condition

가공영역을 Fig. 9와 같이 회전수와 이송속도의 종류에 따라 크게 4개의 영역으로 나누고, 다시 각각의 영역에 대해 3등분하여 수직 가공력을 20N, 30N, 40N으로 설정하였다. 한 개의 셀은 30mm×20mm의 크기를 가지고, 각 셀마다 연마횟수를 증가하면서 연마한 후 표면을 측정하였다. 측정은 Taylor-Hobson사의 Form Talysurf Series2를 사용하였고, 곡면에 대하여 측침이 수직이 되도록 자동 틸팅하면서 8mm를 측정하였다.

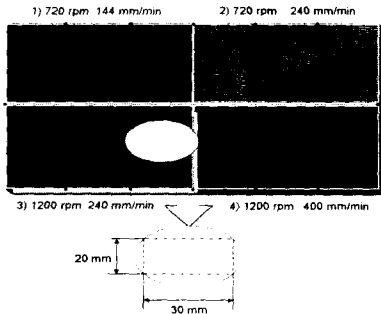


Fig. 9. Polishing area at each condition

4.2 연마 실험 및 결과 고찰

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 가공조건을 다양하게 설정하여 연마 실험을 수행하였다.

연마방향이 표면 거칠기에 미치는 영향을 평가하기 위해서 두 종류의 곡면에 대해 횡 방향으로 입도 #200을 이용하여 연마한 후 연마조건을 Table 1과 같이 설정하여 종 방향으로 입도 #800을 이용하여 연마실험을 수행하였다. 연마 후 표면 거칠기를 측정된 결과는 Fig. 10, 11과 같다.

Table 1. Polishing condition

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

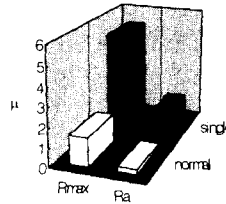


Fig. 10. Ruled surface

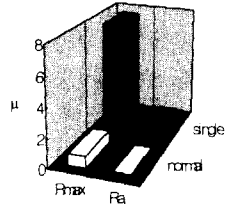


Fig. 11. Shadow mask

쉐도우 마스크 형태의 금형에 대해 이전 연마 방향과 같은 방향으로 연마한 것을 single, 연마방향을 달리하여 연마한 것을 normal이라고 할 때 Ra에 대해 각 방법을 비교하면 각각 0.55 μ m과 0.09 μ m로 후자의 경우가 양호함을 알 수 있다. 즉 이전 가공에 있어서의 공구의 진행방향과 수직인 방향으로 연마하는 것이 효율적이다. 이것은 금형을 일정한 방향으로 연마할 경우 공구의 진행방향과 동일한 방향으로 결이 발생하여 표면 거칠기가 나빠지는 것을 의미한다. 그러므로 효율적인 자동연마를 위해서 가공경로에 패턴을 도입하여 가공경로가 일정한 방향성을 가지지 않도록 하는 것이 바람직하다.

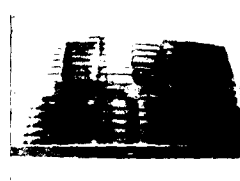


Fig. 12. Result of polishing at #800

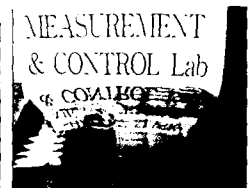


Fig. 13. Result of polishing at #1500

Fig. 12, 13은 Fig. 8의 가공조건에 의해 #800과 #1500으로 연마한 뒤의 시편을 나타내고 있다. 스피들의 회전수를 1200rpm, 이송속도를 400mm/min으로 설정하고 각각 #100, #800, #1500으로 연마한 후, 수직 가공력에 따른 연마횟수와 표면 거칠기의 관계를 나타내면 Fig. 14, 15, 16과 같다.

연마 결과를 보면 연마횟수의 증가에 따라 표면 거칠기는 지수 함수적으로 개선되고 있지만, 어느 한계에서는 제거능률의 저하로 개선정

도는 상당히 둔화되어 표면 거칠기가 최종 표면 거칠기의 90%정도까지 도달한다. 이때의 연마횟수를 임계연마횟수라 한다.

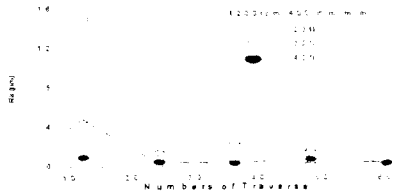


Fig. 14. Ra by normal force and numbers of polishing at #100

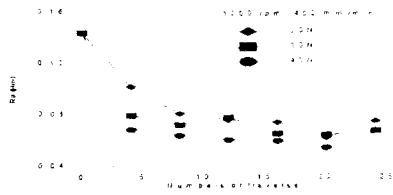


Fig. 15. Ra by normal force and numbers of polishing at #800

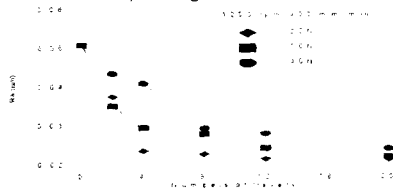


Fig. 16. Ra by normal force and numbers of polishing at #1500

각 입도별로 수직 가공력이 표면 거칠기에 미치는 영향을 평가하기 위해서 40N일 때의 표면 거칠기를 기준으로 20N과 30N으로 가공한 결과를 비교하기 위해 연마효율을 식 (7)과 같이 정의하였다.

$$\text{efficiency } F(\%) = \frac{1}{\frac{\text{roughness}_F}{\text{roughness}_{40N}}} \times 100 \quad (7)$$

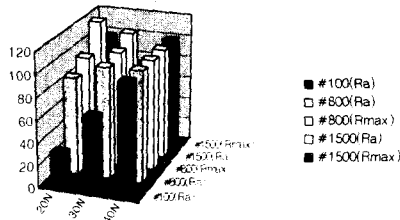


Fig. 17. Ra, Rmax by normal force and polishing sheet

40N으로 가공한 표면조도의 효율을 100%로 두었을 때, 20N과 30N인 경우의 연마 효율을 비교하면 Fig. 17과 같다. 결과를 비교해 보면 #100의 경우에는 수직 가공력을 40N으로 설정한 경우가 효율적이었으나 #800인 경우에는 효율에 큰

차이가 없었고 #1500인 경우에는 20N인 경우가 효율적이다. 즉 연마 효율을 증가시키기 위해서는 연마숫돌의 입도가 증가할 수록 수직 가공력은 작아야 함을 의미한다.

위의 실험 결과에서 보면 표면이 Ra 2μm이 상의 거친 경우는 수직 가공력을 40N으로 Ra 0.2μm인 경우는 20N으로 설정하는 것이 바람직함을 알 수 있었으며, Rmax에 대한 수직 가공력의 영향도 Ra와 유사함을 확인할 수 있었다.

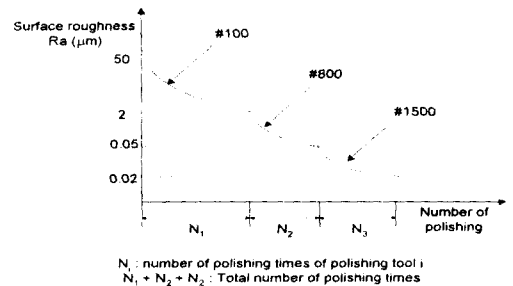


Fig. 18. Ra by numbers of polishing and polishing sheet

또한, 연마시트와 연마횟수에 따른 표면 거칠기의 실험 결과를 비교해 보면 Fig. 18과 같은 형태의 그래프를 얻을 수 있다. 즉 #100, #800, #1500의 연마숫돌에 의해 일정한 가공조건으로 연마횟수를 증가시키면서 가공하였을 때의 표면 거칠기를 근사적으로 나타낸 것으로 연마횟수의 증가에 따라 표면 거칠기는 개선되고 있으며, 초기제거능률은 컸지만, 어느 정도 연마횟수를 증가시키면 제거능률은 떨어짐을 알 수 있다. 이점을 고려한다면 #100과 #800사이에 #400을 추가함으로써 연마횟수를 줄여 능률적인 연마가 가능함을 예측할 수 있다.

Table 2. Efficency of polishing by velocity of spindle

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

스핀들의 회전속도가 연마효율에 미치는 영향을 평가하기 위해서 이송속도(240mm/min)와 수직 가공력 등의 기타 조건은 동일하게 설정하고 Table 2와 같이 스핀들의 회전속도를 720rpm과 1200rpm으로 두었을 때 Ra와 Rmax가 목표치까지 도달하는데 필요한 연마횟수를 비교하였다. 연마횟수에 따른 표면 거칠기 변화를 조사하여

임계연마횟수에서의 표면 거칠기를 목표치로 가정하였다. 각각의 스피들 회전속도에 대해 표면 거칠기가 목표치에 도달하는데 필요한 연마횟수를 비교하면 회전속도가 빠를 수록 효율적임을 알 수 있다. 그러나 #800의 슷돌로 20N의 수직 가공력을 가하면서 1200rpm으로 가공했을 때는 슷돌과 금형의 접촉면이 타면서 연마가 되지 않는 현상이 나타났다. 이것은 슷돌과 가공물의 표면사이에서 발생하는 과도한 마찰에 기인하는 것으로 연마효율을 좋게 하기 위해 스피들의 회전속도를 1200rpm이상으로 빠르게 하는 것은 바람직하지 못함을 알 수 있다.

이상의 연마실험 결과를 통해 연마스틀의 입도에 따른 적절한 연마력과 연마횟수를 선정함으로써 연마효율을 높일 수 있고, 본 연구에서 개발한 연마로봇을 이용하면 적절한 연마 조건하에서 우수한 연마성능을 가져올 수 있음이 입증되었다.

5. 결론

본 연구에서는 기존의 3축 머시닝센터에 2자유도를 부가하여 3차원 자유곡면의 연마가 가능한 연마 로봇의 성능을 평가하고자 하였다. 5축 NC 데이터틀 3축 NC 데이터와 2축 연마로봇용 케적 데이터로 분리하는데 있어서의 신뢰도를 확보하였고, 윈도우즈용 프로그램을 개발하여 사용자가 편리하게 분리된 케적을 확인할 수 있도록 하였다. 또한, 자동 연마로봇 시스템에 의해 연마성능을 실험적으로 평가하여 효율적인 연마 공정이 이뤄질 수 있도록 연마 조건에 대한 분석을 하였다. 연마 방향, 연마 입도, 수직 가공력, 이송 속도, 회전수 및 연마횟수 등의 인자들이 표면 거칠기에 미치는 영향을 정량적으로 분석하여 전체적인 시스템의 성능향상을 도모하였다.

개발된 연마로봇 시스템을 이용한 곡면 연마 실험에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 5축 자동 연마로봇 시스템을 이용하여 연마실험을 수행한 결과 3차원 곡면 연마의 경우에도 양호한 연마성능을 얻을 수 있었다. 따라서, 3축 머시닝센터에 2축의 연마로봇을 장착하여 5축 연마가공을 가능케 함으로써 간단히 5축 자동연마 시스템을 구성할 수 있게 되었다.
- (2) 연마스틀의 입도와 연마횟수에 따른 연마 특

성을 실험적으로 분석하여 능률적인 슷돌 교환시기를 제시하였고, 수직 가공력 및 연마 방향이 표면 거칠기에 미치는 영향을 고찰하였다. 특히 #100의 경우에는 수직 가공력을 40N정도, #1500의 경우에는 수직 가공력을 20N정도로 하는 것이 적절함을 알 수 있었다.

- (3) 선정된 연마 조건하에서 개발된 연마로봇을 이용하여 곡면 연마를 수행하여 성능을 평가한 결과 Ra가 0.02 μ m로 연마 성능이 양호함을 입증하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 공업 기반 기술 개발 사업의 연구비로 수행한 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] 하덕주, 이민철, 최영규, 이만형, "머시닝센터 장착형 곡면 금형 연마용 로봇 시스템 개발에 관한 연구", 한국자동제어학술회의 논문집, 제2권, pp.1312-1315, 1996
- [2] 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.
- [3] 이민철, 青島伸治, "슬라이딩 모드를 이용한 로봇트 매니플레이터의 실시간 제어에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제16권, pp.2011-2020, 1992.
- [4] 고석조, 이민철, 이만형, "DSP를 이용한 스카라 로봇의 퍼지-슬라이딩 모드 제어", 한국자동제어학술회의, pp181-184, 1995
- [5] 조영길, 이민철, 이만형, 전차수, "머시닝센터 장착형 연마 로봇의 성능 향상에 관한 연구", 한국자동제어학술회의 논문집, pp.1275-1278, 1997
- [6] 정재현, "부산·경남지역의 금형산업 현황", 정밀정형 및 금형가공 연구센터 한-일 워크샵, pp.92-111, 1994.
- [7] 이두찬, "금형자동연마의 최적조건선정 전문가시스템 개발", 부산대학교 정밀기계공학과 석사학위 논문, 1997