

자동 연마 로봇 시스템의 개발 및 통합 구동 환경 구축

이민철*, 정진영**, 고석조***, 허창훈****

Development of Automatic Polishing Robot System and Integrated Operating Program

Min Cheol Lee*, Jin Young Jung**, Seok Jo Go*** and Chang Hoon Huh****

ABSTRACT

Polishing a die that has free-form surfaces is a time-consuming and tedious job, and requires a considerable amount of high-precision skill. In order to reduce the polishing time and cope with the shortage of skilled workers, an automatic polishing robot system was developed. The polishing robot system is composed of two subsystems, a three-axis machining center and a two-axis polishing head. The machining center is controlled by a FANUC controller, and the polishing head by DSP controller. The system has five degrees of freedom and is able to keep the polishing tool normal to the die surface during operation. To easily operate the developed polishing robot system, this study developed an integrated operating program in the Windows environment. The program consists of five modules: a polishing data generation module, a code separation module, a polishing module, a graphic simulator module, and a teaching module. And, the automatic teaching system was developed to easily obtain teaching data and it consists of a three dimensional joystick and a proximity sensor. Also, to evaluate the performance of the integrated operating program and the polishing robot system, polishing experiments of a die of shadow mask were carried out.

Key Words : Automatic polishing robot system(자동 연마 로봇 시스템), Machining center(머시닝 센터), Polishing head(연마 헤드), Integrated operating program(통합 구동 프로그램), Automatic teaching system(자동 교시 장치)

1. 서론

최근 다품종 소량생산의 추세로 인한 금형의 수요가 증가함에 따라 능률적인 금형 가공의 요구가 증가되고 있다. 금형의 가공 공정 중에서 형상 가공의 경우는 NC공작기계 및 CAD/CAM의 발전으

로 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 작업 시 발생하는 먼지, 소음, 진동 등으로 인한 작업자들의 기피현상으로 기술인력이 점

** 2002년 5월 6일 접수

* 부산대학교 기계공학부, 정밀정형 및 금형가공 연구센터

** 부산대학교 일반대학원 지능기계공학과

*** 동의공업대학 기계시스템계열

**** (주)케이디이컴

차 줄어들고 있는 실정이므로 연마 공정의 자동화가 절실히 요구되고 있다^[10]. 특히, 3차원 자유곡면을 이루고 있는 금형의 경우는 연마 작업이 매우 어렵고, 시간 또한 많이 소요되는 작업이다. 이러한 자유곡면을 가진 금형 연마 공정을 자동화하여 생산성 향상을 추구하고자 선진국에서는 5축 전용 자동 연마 시스템을 이미 상품화하여 판매하고 있다^[10,11]. 그러나, 이러한 5축 전용 시스템을 구성하기 위해서는 비용이 고가가 되는 문제점이 있다. 따라서, 산업현장에서 보편화된 머시닝 센터(machining center)를 활용하는 방안도 고려되었지만 충분한 자유도를 가지지 못하므로 3차원 자유곡면의 연마작업에는 적합하지 못했다. 국내에서도 3차원 곡면 자동 연마 시스템을 비교적 적은 비용으로 구성하기 위하여 다관절 로봇에 의한 5축 연마 시스템을 개발한 연구 사례가 있었다^[7]. 그러나, 이 경우에는 공작 기계와 비교해서 강성과 위치결정정도가 떨어지는 단점이 있었다.

본 연구에서는 이런 점들을 고려하여 3차원 곡면의 가공에 가장 적합한 것으로 알려져 있는 5축 연마 시스템을 구현하기 위하여 3축 머시닝 센터에 2자유도의 연마 헤드를 부가하여 연마 공구가 임의의 자유곡면과 항상 법선 방향을 유지하며 일정한 연마력으로 연마할 수 있는 5자유도의 3차원 곡면 금형 자동 연마 시스템을 개발하고자 한다. 개발된 5축 연마 시스템에 의해 연마 작업을 수행할 경우 충분한 자유도의 부여로 인하여 공작물의 준비대체 시간과 고정구의 제작에 소요되는 시간이 감소되고, 인적비용의 절감 효과를 기대할 수 있다. 또한 유효가동용의 증대 및 연속무인운전을 가능하게 하고, 가공 정밀도의 향상 및 복잡한 금형 연마가 용이할 것으로 예상된다^[12]. 그리고 산업현장에서 보편화된 3축 머시닝 센터를 이용하여 5축 가공효과를 얻을 수 있다는 장점이 있다.

개발된 5축 연마 시스템은 3축 머시닝 센터와 2축 연마 헤드의 다른 두 개의 시스템으로 구성되어 있으므로 사용자가 실제 연마작업을 수행하기 위해서는 두 시스템을 동시에 조작할 수 있는 통합 구동 프로그램이 필요하다. 따라서, 연마 데이터의 전송을 위해서 3축 머시닝 센터의 제어기인 화낙(FANUC) 제어기와 2축 연마 헤드의 전용 제어기인 DSP 제어기와의 통신 프로그램을 개발하고, 윈도우즈(Windows) 환경에서 사용자가 연마 시스템을 쉽게 구동할 수 있는 통합 구동 프로그램을 개발하

고자 한다. 본 통합 프로그램에는 5축 NC 데이터 생성 기능, 5축 NC 데이터의 분리 기능, 연마실행 기능, 교시 기능, 시뮬레이션 기능으로 구성되어 있다.

여기서, 5축 NC 연마 데이터의 생성은 본 연구에서 개발한 연마 전용 CAM 소프트웨어로부터 생성된다^[13]. 데이터 분리 기능은 각 제어기에 필요한 3축 NC 데이터와 2축 궤적 데이터로 분리하는 기능이다. 연마실행 기능은 연마면에 대한 CAD 데이터가 있는 경우 연마 전용 CAM 소프트웨어로부터 생성된 5축 NC 데이터를 연마 시스템에 전송하고 연마를 실행하는 기능이다. 교시 기능은 연마면에 대한 정확한 데이터가 없는 경우 작업자가 연마면에 대한 정보를 획득할 수 있는 기능으로서 작업자의 수작업에 의해 실행되는 수동 교시와 자동 교시 시스템에 의해 연마면에 대한 교시점을 자동으로 획득하는 자동 교시 두 가지 기능으로 구성하고자 한다. 특히 자동 교시 시스템은 현재 상용화된 5축 전용 연마 시스템에서는 찾아 볼 수 없는 본 연마기의 특징중 하나이다. 시뮬레이션 기능에서는 연마 작업 전에 연마 궤적을 그래픽으로 확인할 수 있는 기능이다. 그리고 개발된 통합 구동 프로그램을 연마 시스템에 적용하여 실제 연마 작업을 수행함으로써 개발된 자동 연마 시스템에 대한 성능 평가를 하고자 한다.

2. 자동 연마 로봇 시스템의 구성

2.1 자동 연마 로봇 시스템

본 연구에서 개발한 자동 연마 로봇 시스템인 POLYEM의 외관과 2축 연마 헤드의 구조는 Fig. 1, Fig. 2와 같고, 연마 시스템의 사양은 Table 1과 같다.

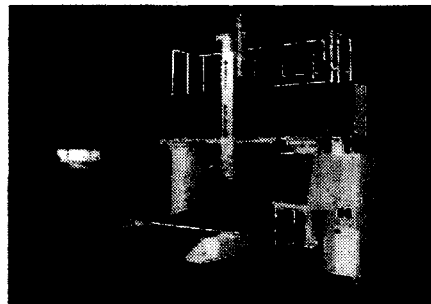


Fig. 1 Polishing robot system

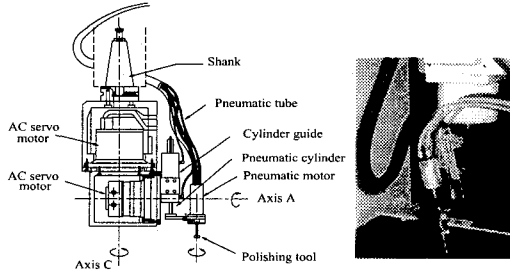


Fig. 2 Two-axis polishing head

Table 1 Specifications of the POLYEM

POLYEM	Specification
Stroke of axis X	1800 mm
Stroke of axis Y	1400 mm
Stroke of axis Z	800 mm
Rotation of axis A	$\pm 95^\circ$
Rotation of axis C	$\pm 180^\circ$
Working space	1800 mm × 1400 mm
Carrying capacity	5000 Kg
Control unit	FANUC 18M / DSP
Teaching system	Joystick / MPG

개발된 연마 시스템은 상자형으로 일체화된 컬럼 유니트(column unit) 구조를 채택함으로써 연마시 연마력에 대하여 충분한 강성을 가지도록 설계하였다. 그리고 특수 주철로 된 고강성의 테이블을 채택하여 최대 가공중량물 5톤을 적재할 수 있으며 테이블 작업 면적은 1800 mm×1400 mm로 대형 금형에 적합하도록 설계되었다. 3축 직선운동부의 이송모터로는 화낙 AC 서보모터를 사용하였으며 제어기로는 화낙 18M 제어기를 사용하였다. 2축 연마 헤드의 구동 모터로는 하모닉모터를 사용하였으며 자세 제어를 위해서는 선행연구에서 개발한 DSP 제어기를 사용하였다^[4].

선행연구에서 개발한 DSP 제어기와 전체 연마 시스템에 대한 구성도는 Fig. 3과 같다. 개발된 5축 연마 시스템은 3축 머시닝 센터와 2축 연마 헤드의 다른 두 개의 시스템으로 구성되어 있으므로 두 시스템을 동시에 연동시키기 위해 M51과 SM2의 동기신호를 두 시스템의 제어기 사이에서 주고받도록 하여 마치 하나의 제어기로 구동되는 시스템처럼 동작하도록 하였다. 윈도우즈 체계의 호스트 컴퓨터에는 자동 연마기 전용의 CAM 시스템이 구축되

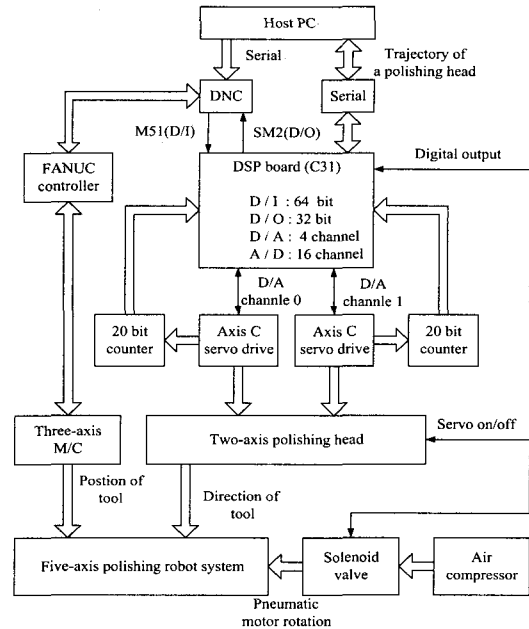


Fig. 3 Architecture of the double controller system for the POLYEM

어 있어서 연마할 면에 대한 CATIA, AutoCAD 및 기타 여러 CAD/CAM 시스템에서 통용되는 데이터 파일만 있으면 5축의 연마 데이터를 생성할 수 있도록 하였다. 또한 호스트 컴퓨터에는 본 연구에서 개발한 통합 구동 프로그램이 구축되어 있어서 CAM 시스템에서 생성된 5축의 연마 데이터를 3축의 머시닝 센터용 NC 코드와 2축 연마 헤드용 데이터로 분리할 수 있도록 하였으며 직렬통신을 수행하여 각각의 제어기와 명령 및 데이터를 주고받으며 두 제어기의 동작을 관리할 수 있도록 하였다. 이때 금형의 크기가 큰 경우는 많은 연마 궤적 데이터로 인해 화낙 제어기로 한번에 다운로드 시킬 수 없는 문제가 발생하는데 이러한 문제를 해결하는 동시에 화낙 제어기와 통신을 수행하기 위해서 DNC2를 채용하였다.

개발된 자동 연마 시스템과 현재 국내 금형 업체에서 사용하고 있는 연마 시스템과의 비교를 위해 각 연마 시스템의 주요 특징 및 장단점을 Table 2에 정리하였다.

2.2 자동 교시 시스템

본 연구에서 개발한 연마 로봇 시스템을 이용하

Table 2 Characteristics of the POLYEM and other polishing systems

	POLYEM	Five-axis polishing system	Six-axis polishing system
Structure	Three-axis machining center + two-axis polishing head	Three-axis gantry type + two-axis pneumatic tool system	Three-axis articulated robot + three-axis tool system
Degree of freedom	5	5 (Axis A is handled manually)	6
Working space (mm ²)	1800 × 1400	1550 × 1000	1200 × 800
Carrying capacity (kg)	5000	8000	5000
Stiffness	Good	Good	Bad
Cost	Cheap	Expensive	Expensive
Control unit	FANUC 18M / DSP	NC controller	SEL controller
Teaching system	MPG / joystick	Joystick	Without
Teaching mode	Manual mode / auto mode	Manual mode	Without

여 연마 작업을 수행하기 위해서는 두 가지의 구동 방법을 사용할 수 있다. 먼저, 금형에 대한 CAD 데이터가 있을 경우에 사용하는 방법으로 본 연구에서 개발한 전용 CAM 소프트웨어^[13]로부터 연마 데이터를 생성하고, 생성된 연마 데이터를 분리한 후 각각의 제어기로 전송하여 연마를 수행하는 방법이다. 그러나, 많은 경우의 산업 현장에서는 금형의 전체 형상에 대한 NC 데이터 외에도 부분 연마를 위한 NC 데이터도 필요하다. 연마 작업에 따라서는 NC 데이터를 확보하지 못하는 경우도 있다. 이와 같은 경우에는 금형 형상에 대한 정확한 곡면 정보가 없으므로 요구되는 연마면에 대한 형상 정보를 교시함으로써 부분 연마 데이터를 생성할 수 있다. 상용화된 연마기의 경우에 금형의 형상 정보를 획득하는 과정은 작업자가 축 이송기구를 직접 구동하여 금형 대상물에 접촉시킴으로써 교시점을 획득하고 있다. 그러나, 금형 대상물에 대한 교시점의 획득 과정이 작업자의 육안에 의해서 이루어짐으로 획득된 정보에 대한 신뢰성을 확보하지 못한다. 또한 교시 영역이 넓은 경우에는 교시점 획득에 많은 시간이 소요되는 등의 문제점이 있다.

본 연구에서는 보다 간단한 작업 절차에 의해 금형의 형상 정보를 자동으로 획득하고 연마 데이터를 생성할 수 있는 교시 시스템을 개발하고자 한다. 그리고 개발단계에서 필요한 교시 시스템의 유용성을 높이기 위해 작업자의 수작업에 의해 실행되는 수동 교시와 연마면에 대한 교시점을 자동으

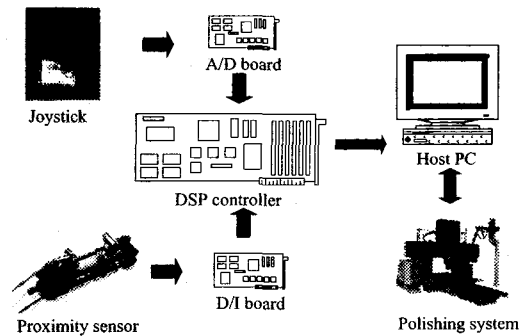


Fig. 4 Configuration of teaching system

로 획득하는 자동 교시 두 가지 기능을 모두 갖추도록 한다. 교시 시스템은 축 이송을 위한 조이스틱(joystick)과 교시점의 자동획득을 위한 근접 센서(proximity sensor)를 사용하여 구성한다. 사용한 조이스틱은 Fig. 4와 같은 3차원 형태의 포텐서미터(potentiometer) 타입을 가진 조이스틱으로서 ±5V의 전원을 각 축에 공급한 후 조이스틱 레버를 움직이면 조이스틱의 변위에 따라 -5V~+5V 범위의 전압이 각 축별로 출력되게 된다. 이렇게 출력된 전압은 A/D 보드를 통해서 DSP 제어기로 보내어진다. 근접 센서는 연마기의 공구가 금형 표면에 접촉하여 공압실린더의 피스톤 헤드가 근접 센서에 접근하는 순간 원하는 교시점에 도달하였다는 정보를 알려주는 역할을 한다. 피스톤 헤드에는 외부로 자계를 형성할 수 있는 자성체가 부착되어 있어 실린

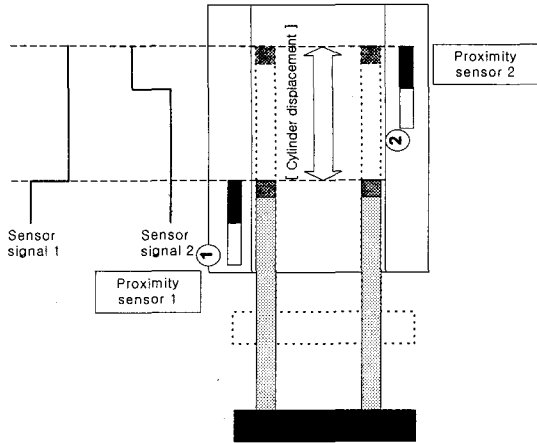


Fig. 5 Schematic diagram of cylinder equipped with proximity sensor

더 외벽에 설치되어 있는 근접 센서와 반응하여 교시점 획득 여부를 판단하게 된다.

따라서 사용자가 조이스틱을 움직여 연마기를 원하는 교시점으로 이동시킨 후 공구가 교시점에 터치되어 피스톤 헤드가 근접 센서에 접근하는 순간 근접 센서로부터 펄스 신호가 나오며, 이 신호는 DSP 제어기로 전달된다. Fig. 5는 실제 근접 센서가 장착된 실린더의 구조를 그린 개략도이다.

3. 통합 구동 프로그램 개발

자동 연마 시스템은 3축 머시닝 센터와 2축 연마 헤드의 다른 두 개의 시스템으로 구성되어 있으므로 사용자가 실제 연마작업을 쉽게 수행하기 위해서는 두 시스템을 동시에 조작할 수 있는 통합 프로그램이 필요하게 된다. 이에 본 연구에서는 사용자가 쉽게 자동 연마 시스템을 구동할 수 있도록 그래픽 사용자 인터페이스(GUI)가 뛰어난 윈도우즈 환경에서 통합 구동 프로그램을 제작하였다.

3.1 통신 모듈의 구성

자동 연마 시스템을 조작하기 위해서는 호스트 컴퓨터에서 3축의 운동을 제어하는 화낙 제어기와 2축의 자세를 제어하는 DSP 제어기에 각각 명령 및 데이터를 전달하여야 한다. 그러므로 각각의 제어기와 통신을 수행할 수 있는 통신 프로그램이 필요하다.

직선 운동 기구인 3축 시스템은 화낙 제어기에 의해서 제어되며 DNC2를 통해서 호스트 컴퓨터와 데이터를 주고받을 수 있다. 화낙 DNC2의 주요 특징은 다음과 같다. 첫째로 유럽의 여러 CNC메이커에서 채용되고 있는 통신 프로토콜인 LSV2에 기본을 두고 만들어진 프로토콜이기 때문에 컴퓨터에서도 간단하게 소프트웨어를 구축할 수 있도록 고려된 3층 구조를 갖는 통신 프로토콜이다. 둘째로 화낙 CNC 한 대와 컴퓨터 한 대 사이에서 일대일(point to point) 통신을 행하기 위한 통신 프로토콜이기 때문에 컴퓨터 한 대가 복수의 CNC와의 사이에서 통신을 행하는 일대다(multi point) 통신은 불가능하다. 셋째로 풍부한 서비스 기능을 가지고 있기 때문에 화낙 CNC와 컴퓨터사이에서 데이터를 주고받음으로써 가공의 자동화를 도모할 수 있다. 그러므로 이러한 DNC2를 이용하면 가공 프로그램을 CNC에 다운로드 및 업로드할 수 있으며, PMC의 데이터를 읽고 수정할 수 있다. 또한, 외부 시스템으로 개방되지 않았던 CNC의 여러 정보들을 읽어들이어서 이용할 수 있다^[13].

DNC2를 이용하기 위해서는 DNC2에 적합한 통신 프로그램이 필요하다. 그러나 화낙사에서 제공되는 상용화된 프로그램은 DOS나 WinNT 환경에서만 동작하는 프로그램으로 윈도우즈 환경에서는 사용할 수가 없다. 그래서 윈도우즈 환경에서 DNC2와 통신할 수 있는 통신 프로그램을 제작하였다.

Fig. 6은 DNC2와 호스트 컴퓨터간의 통신을 하기 위한 통신 프로그램의 구조를 나타낸다. DNC2는 Fig. 7과 같이 물리층, 데이터링크층, 그리고 어플리케이션층의 3층으로 구성되어 있다. 그러므로 통신 프로그램도 동일한 구조로 이루어져야 한다. 물리층에서는 RS-232-C를 통한 직렬통신을 수행하기 위한 함수들로 구성하였으며 윈도우즈 환경에서 통신을 쉽게 수행하기 위하여 MFC(microsoft foundation class)에서 제공하는 함수들을 사용하였다. 데이터링크층에서는 7가지 전송제어문자를 이용하여 데이터 전송의 흐름을 제어할 수 있는 함수들로 구성하였다. 어플리케이션층에서는 명령어와 데이터를 전달한다.

2축 연마 헤드의 DSP 제어기에 대한 통신 모듈도 동일한 방법으로 구성하였다. 2축 연마 헤드의 제어기는 TMS320C31 DSP칩을 CPU로 하고 하나의 직렬 포트를 내장하도록 설계되었다^[14]. 호스트

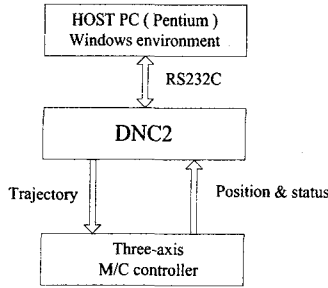


Fig. 6 Communication structure of the three-axis machining center

CNC Program		PC Program
Application Layer		Application Layer
Datalink Layer		Datalink Layer
Physical Layer	RS-232-C	Physical Layer

Fig. 7 Program structure for communication with DNC2

컴퓨터에서는 RS-232-C 직렬 통신을 수행하여 2축 연마 헤드용 궤적 데이터를 DSP 제어기에 다운로드하며, 여러 가지 명령과 정보를 주고 받는다. 이 경우에도 윈도우즈 환경에서 통신을 쉽게 수행하기 위해서 MFC에서 제공하는 함수들을 사용하여 통신 프로그램을 제작하였다.

3.2 시뮬레이션 모듈의 구성

본 연구에서는 5축 가공에서 일어날 수 있는 공구 간섭과 공구와 공작물의 충돌현상을 방지하기 위하여 공구 축 운동을 시각적으로 확인할 수 있는 그래픽 시뮬레이션 모듈을 구성하였다. 먼저 그래픽 시뮬레이터의 바탕이 되는 연마 로봇의 기구학적 정보를 얻기 위해 Fig. 8과 같이 관절좌표계를 설정하고 공구말단까지의 좌표 변환을 위해서는 D-H(Denavit-Hartenberg) 표시법을 이용하였다^[16].

절대 좌표계 (X, Y, Z)에 대한 공구 끝의 위치 (P_x, P_y, P_z)는 식(1)과 같이 구해진다^[9,16].

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

단, C_i = cos θ_i, S_i = sin θ_i

공구의 진행방향벡터(approach vector) *a*는 식(2)와 같고, 연마 곡면의 법선 벡터(normal vector)의 역방향과 같다.

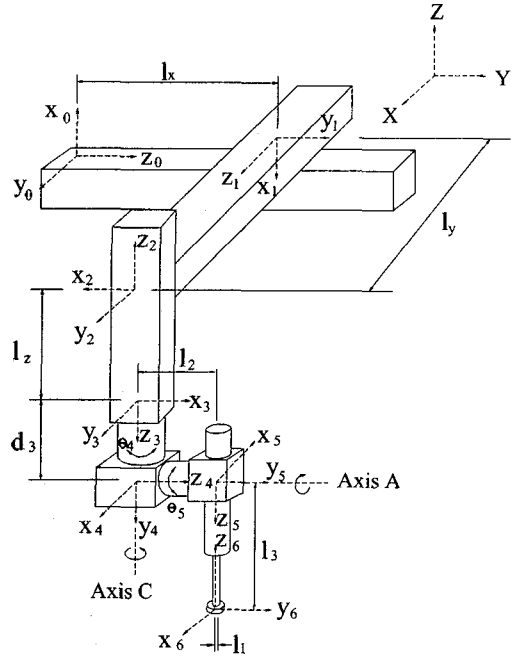


Fig. 8 Kinematic modeling of the POLYEM

$$\begin{aligned} a &= (a_x, a_y, a_z)^T \\ &= (S_4 S_5, -C_4 S_5, C_5)^T \end{aligned} \quad (2)$$

그리고 각 축이 운동해야 할 이동량, 즉 역기구학 해 (l_x, l_y, l_z, θ₄, θ₅)를 구하면 식(3)과 같다.

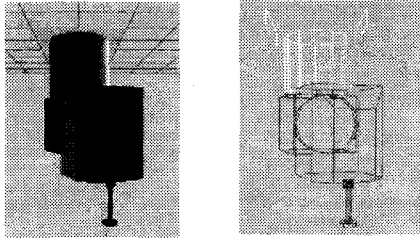
$$\begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x - l_1 C_4 C_5 - l_2 S_4 - l_3 C_4 S_5 \\ P_y + l_1 S_4 C_5 - l_2 C_4 + l_3 S_4 S_5 \\ P_z + l_1 S_5 - l_3 C_5 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\theta_4 = \text{atan2}(-a_y, a_x) \quad (4)$$

$$\theta_5 = \text{atan2}(a_x / C_4, a_z) \quad (5)$$

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

따라서, 임의의 연마 지점 좌표값과 법선 방향과 역방향인 좌표 공구 끝점의 자세만 주어진다면 식(3), (4), (5)에 의해서 머시닝센터의 X, Y, Z축 방향으로의 이동거리와 연마 헤드의 C, A축의 회전각도가 구해진다^[16].



Shading model Wireframe model

Fig. 9 Graphic simulator

Fig. 9는 기구학적 모델링을 통해 일정 비율로 축소해서 제작한 그래픽 시뮬레이터의 모습을 나타내며, Microsoft Visual C++과 Silicon Graphics Inc.의 OpenGL을 사용하여 제작하였다.

3.3 통합 구동 프로그램

2축의 연마 헤드는 3축의 머시닝 센터에 장착되어서 5축의 연마 시스템으로 갖추어지기 때문에 이 두 시스템을 함께 조작할 수 있는 통합 프로그램이 필요하다. 본 연구에서 개발한 통합 구동 프로그램은 Visual C++을 사용하였으며 MFC와 CG (component gallery)를 사용하여 구조적이고 쉽게 제작하였다^[17].

3.3.1 화면 구성 및 메뉴 구성

통합 구동 프로그램인 P-PROS(Pusan National University-polishing robot operating system)의 화면 구성은 Fig. 10과 같다. 화면 상단에는 폴다운 메뉴를 구성하여 프로그램에서 사용 가능한 모든 기능들을 삽입하였다. 화면 우측에는 대화상자를 두어 연마 로봇을 구동하는데 필요한 기능들을 폴다운 메뉴에서 분리시켜 삽입하였다. 또한 화면 중앙에는 그래픽 시뮬레이터를 위치시켜 연마로봇 구동 중에도 화면상으로 연마 로봇의 움직임을 감시할 수 있도록 하였으며, 화면 하단에는 전송되는 모든 데이터들의 이력이 기록되는 리스트상자가 마련되어 있어서 전송되는 데이터의 내용을 사용자가 확인할 수 있도록 하였다. 그리고 알람램프가 구성되어 있어서 연마도중에 프로그램이나 통신에 오류가 발생하면 사용자가 인식할 수 있도록 하였다.

통합 구동 프로그램의 메뉴 구성은 Fig. 11과 같다. PolyCAM 기능에서는 연마 시스템용 CAM 프로그램인 PolyCAM을 불러들여 연마 궤적을 생성

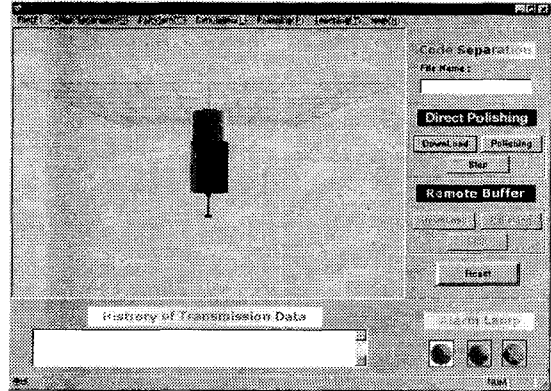


Fig. 10 Screen configuration of the P-PROS

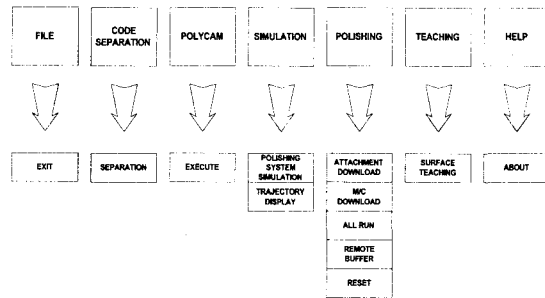


Fig. 11 Menu configuration of the P-PROS

할 수 있다. Code separation 기능에서는 CAM 프로그램에서 생성된 연마 시스템용 5축의 NC 코드를 불러들여서 3축용 NC 코드와 2축용 궤적 데이터로 분리할 수 있다. Simulation 기능에서는 그래픽 시뮬레이터를 통해서 연마 작업 전에 연마로봇의 운동과 연마 궤적을 확인할 수 있다. Polishing 기능에서는 분리된 데이터를 머시닝 센터와 연마 헤드에 다운로드하며 구동시키고 정지시킬 수 있으며 연마 데이터가 많을 경우에는 리모트 버퍼 기능을 사용하여 연마작업을 수행할 수 있다. Teaching 기능에서는 연마하고자 하는 금형에 대한 곡면 데이터가 없을 경우에 작업자가 연마기 상에 금형을 두고 직접 데이터를 획득할 수 있다.

3.3.2 구동 및 시뮬레이션

CAM 시스템으로부터 제공되는 데이터는 5축 NC 코드이다. 그러나 본 연구에서 개발된 연마 시스템의 경우 2개의 제어기가 독립적으로 존재하므로 5축 NC 코드를 직접 이용할 수 없다. 따라서 3

축 머시닝 센터용 NC 코드와 2축 연마 헤드용 캐직 데이터로 분리하여 각각의 시스템에 사용하게 된다. Fig. 10의 통합 구동 프로그램에서 오른쪽 대화상자의 Code Separation 버튼을 누르면 분리하고자 하는 NC 파일을 선택할 수 있으며, 선택된 파일에 대하여 분리작업을 수행할 수 있다. Fig. 12는 Code Separation 기능을 이용한 NC 데이터 분리 과정을 나타낸다.

분리된 연마 데이터에 의해 연마 시스템을 구동하기 위해서 두 가지 방법으로 구동 모드를 구성하였다. 하나는 연마할 데이터의 양이 적을 때 사용하는 Direct Polishing 이며, 또 다른 하나는 연마할 데이터가 많은 경우 사용하는 Remote Buffer 이다. Remote Buffer는 머시닝 센터의 메모리가 한정되어 있으므로 한번에 연마데이터를 다운로드할 수 없을 때 사용한다. 통합 구동 프로그램에는 오른쪽 대화상자에 Direct Polishing과 Remote Buffer가 갖추어져 있다. Remote Buffer를 사용할 때는 먼저 연마 헤드에 데이터를 다운로드 시킨 후에 머시닝 센터에 데이터를 버퍼링해 가면서 연마 작업을 수행하게 된다.

연마 작업을 시작하면 그래픽 시뮬레이터도 동시에 작동되므로 연마 작업 전에 그래픽 시뮬레이터를 이용하여 연마 로봇의 운동을 테스트할 수도 있지만 작업자가 연마 작업을 수행하는 중간에도 작업의 진행상황을 그래픽 시뮬레이터를 통해 확인할 수 있도록 하였다. Fig. 13은 연마 작업 중에 시뮬레이터의 모션과 연마 작업 중인 연마 로봇의 모습을 보여준다.

3.3.3 교시 기능

작업자가 교시작업을 수행하기 위해서 풀다운 메뉴인 Teaching 메뉴에서 Surface Teaching을 선택하면 Fig. 14와 같은 교시 상자가 나타난다. 교시 기능에는 조이스틱을 이용한 수동 교시 모드와 조이스틱을 사용하지 않고 교시점을 자동으로 획득하는 자동 교시 모드, 두 가지 방법의 교시 기능으로 구성하였다. 각각의 모드에는 교시 시작 버튼이 있어서 교시 작업의 시작을 지시할 수 있다. 또한 각각의 교시 모드에는 격자형 교시와 경계형 교시 두 가지의 형태로 다시 나뉘어져 있어서 작업자는 금형의 형태에 따라 두 가지 중에서 하나의 모드를 선택할 수 있다. Fig. 15는 격자형 교시 모드와 경계형 교시 모드의 형태를 나타낸다. 격자형 교시

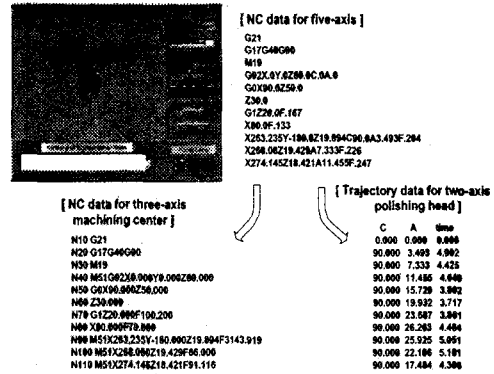


Fig. 12 Code separation

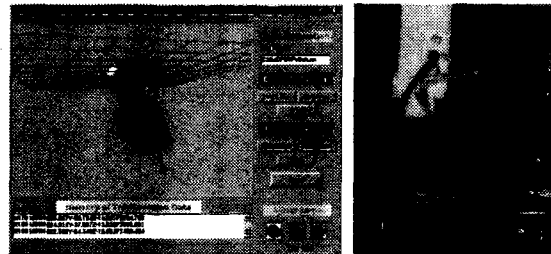


Fig. 13 Polishing module and graphic simulator

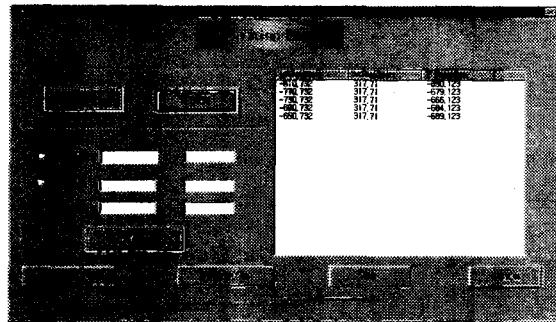


Fig. 14 Teaching box

모드는 교시 영역 전체에 걸쳐 교시점을 얻어서 교시를 하는 형식으로 교시 영역의 X, Y축을 따라 교시할 점들의 간격을 조정할 수 있다. 다음으로 경계형 교시 작업은 교시 영역에서 4개의 경계선을 교시하는 방법으로 X축 방향으로 2개의 경계선과 Y축 방향으로 2개의 경계선으로 교시 작업을 수행한다. 각 경계선의 교시에 있어서 형상 교시 모드와 동일한 방법으로 간격을 조정할 수 있다. 교시 상자의 우측에는 리스트창을 구성하여 교시점이 획득될 때마다 교시점의 X, Y, Z 좌표를 화면상

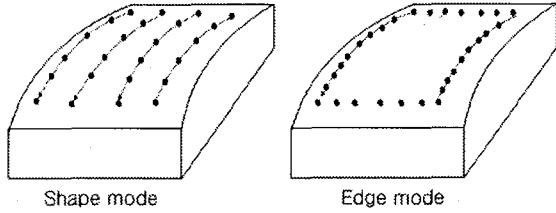
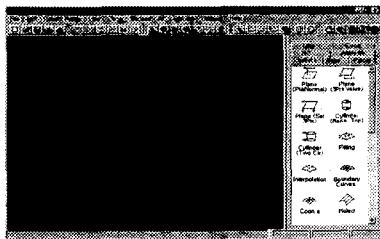
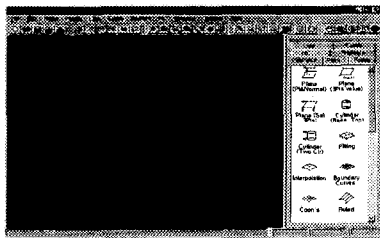


Fig. 15 Shape teaching mode and edge teaching mode



(a) Teaching points

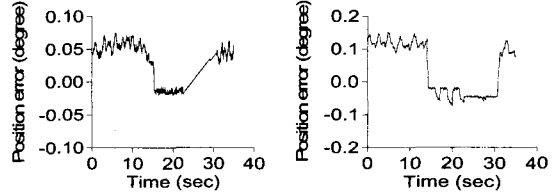


(b) Polishing surface

Fig. 16 Teaching data and PolyCAM generating surface

에 나타냄으로써 작업자가 직접 확인 할 수 있도록 하였다. Fig. 16는 윈도우 마스크 형상의 금형을 4×5의 격자형 형태로 수동 교시한 데이터를 PolyCAM에서 불러 들여 연마데이터를 생성하는 화면이다.

자동 교시 기능은 수동 교시 기능에서와 같이 조이스틱을 사용하여 필요한 전 교시점을 교시하는 것이 아니라 교시 하고자 하는 영역에 대해서 교시 시작점과 교시 끝점만을 교시해 주면 연마기가 자동으로 이동하면서 교시점들을 획득하는 방식이다. 자동 교시 기능은 교시 영역을 정확하게 교시하면서 작업을 수행하기 때문에 수동 교시 모드에 비해서 더욱 더 정확한 교시 데이터를 획득할 수 있다. 그리고 연마 데이터는 수동 교시에서와 동일한 방법으로 전용 CAM 소프트웨어를 이용함으로써 구할 수 있다.



(a) Axis A

(b) Axis C

Fig. 17 Control results along lissajous pattern

4. 자동 연마 시스템의 성능 평가

개발한 자동 연마 시스템을 이용하여 실제 윈도우 마스크 금형을 연마해 봄으로써 연마 시스템의 성능과 통합 구동 프로그램의 안정성을 평가하고자 한다.

연마실험에 사용한 연마숫돌은 엠보싱 타입의 연마시트로서 유연한 섬유소재 위에 다이아몬드 및 CBN입자를 강력하게 접착시킨 형태이다^[8,9]. 피연마물의 형상은 3차원 자유곡면인 윈도우 마스크이며 재질은 난삭재로 알려져 있는 SKD11을 사용하였다. 연마실험에 사용된 연마 패턴으로는 리사쥬 패턴(lissajous pattern)을 사용하였다.

연마 실험에 사용된 2축 연마 헤드에 대한 제어 알고리즘으로는 선행연구에서 개발된 속도보상 슬라이딩모드 제어 알고리즘이 사용되었다^[8,13]. 제어 알고리즘은 연마 헤드 제어기의 ROM에 저장시켰으며, 통합 구동 프로그램의 Remote Buffer 기능을 사용하여 연마실험을 수행하였다.

Fig. 17은 리사쥬 패턴에 대한 제어실험 결과로 기준 궤적에 대해서 최대 각도 오차가 A축은 0.07도, C축은 0.15도이다. 그러나 본 연구에서 제작된 연마공구가 유연한 구조이고 공압 실린더에 의해 연마공구가 항상 일정한 압력으로 연마면에 접촉한 상태로 연마궤적을 이동하므로 이 정도의 각도 오차는 충분히 보상될 수 있다.

Fig. 18은 개발된 자동 연마 시스템으로 윈도우 마스크를 연마하는 모습을 나타낸다. 실험에 사용된 연마조건은 선행연구에서 제안한 방법으로 수행되었다^[8]. 전 가공면은 피이크피드(pick feed)가 0.5 mm인 거친 면이었으나 연마 작업이 끝난 후 Fig. 19와 같은 경면이 되었으며 최대골깊이(R_{max} , maximum profile valley depth)가 0.3 μ m이고 중심선 평균 거칠기(R_a , center line mean roughness)가 0.02 μ m

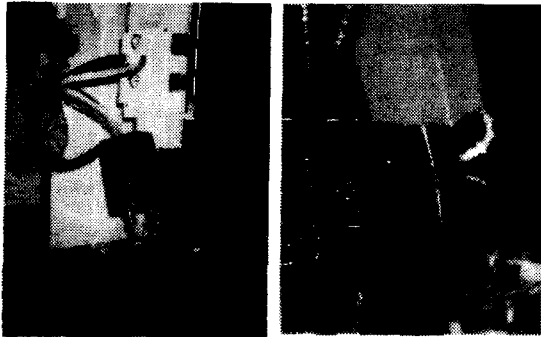


Fig. 18 Polishing of a shadow mask die



Fig. 19 Polished surface of a shadow mask die

로 측정되었다. 일반적으로 금형에서 요구하는 경면의 정도는 최대골깊이가 $0.2 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 이므로^[18] 본 연구에서 개발한 연마 시스템의 성능과 통합 구동 프로그램에 대한 안정성을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 3차원 곡면 연마에 가장 적합한 것으로 알려져 있는 5축 자동 연마 로봇 시스템을 구축하였다. 그리고 개발된 연마 시스템은 3축 머시닝 센터와 2축 연마 헤드의 다른 두 개의 시스템으로 구성되어 있으므로 사용자가 연마 시스템을 쉽게 구동할 수 있도록 하기 위해 윈도우 환경에서 통합 구동 프로그램을 개발하였다. 개발된 통합 구동 프로그램의 주요 기능은 5축 NC 데이터 생성 기능, 5축 NC 데이터의 분리 기능, 연마실행 기능, 교시 기능, 시뮬레이션 기능으로 구성되어 있다. 5축 NC 연마 데이터의 생성은 본 연구에서 개발한 전용 CAM 소프트웨어로부터 생성된다. CAM 시스템으로부터 제공되는 5축 NC 데이터는 NC 데이터 분리 기능을 이용함으로써 3축 머시닝 센터용 데이터와 2축 연마 헤드용 데이터로 분리된다. 연마실행기능은 연마면에 대한 정확한 데이터가 있는 경

우 생성된 연마 데이터를 연마 시스템에 전송하고 연마를 실행하는 기능이다. 교시 기능은 연마면에 대한 정확한 데이터가 없는 경우 작업자가 작업시작 전에 연마면에 대한 정보를 획득할 수 있는 기능이다. 그리고 그래픽 시뮬레이터를 개발함으로써 작업 전 제적 데이터에 대한 오류를 발견할 수 있게 되어 연마 작업에 대한 안정성을 확보하였다. 또한 개발된 통합 프로그램을 연마 시스템에 적용하여 실제 웨도우 마스크 금형에 대한 연마 작업을 수행함으로써 개발된 자동 연마 시스템에 대한 연마 성능과 통합 구동 프로그램의 안정성을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금과 부산대학교 기성회 재원 연구비 및 두뇌한국21 사업 핵심분야에 의하여 지원되었음.

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. K. Saito, "Finishing and Polishing of Free Form Surface," Bulletin of Japan Society of Precision Engineering, Vol. 18, No. 2, pp. 104-109, 1984.
3. K. Shunichi, A. Tojiro, and I. Ichiro, "Development of a Robot-Polishing System (Polishing Force Control by Means of Fuzzy Set Theory)," JSME J. Series C, Vol. 57, No. 543, pp. 3714-3719, 1991.
4. M. Suzuki, S. Ichiyasu, K. Kirii, S. Sunahara, T. Sakuta, and A. Asai, "Development of Die-finishing Robotic System Controlled by CAD/CAM System," JSPE-58-08, pp. 1309-1314, 1992.
5. 강성철, 김문상, 이교일, "금형 연마작업을 위한 로봇 오프라인 프로그래밍 시스템의 개발 및 적용," 한국정밀공학회지, Vol. 14, No. 1, pp 69-77, 1997.
6. 박균명, 장진희, 한창수, "자동 경면 다듬질 장치의 실험적 분석에 관한 연구," 한국정밀공학회지, Vol. 12, No. 9, pp. 30-39, 1995.

7. 박삼진 외 8명, 3차원 곡면의 설계 및 가공 통합 시스템 개발, 최종보고서, 한국기계연구원, 1993.
8. 이민철, 조영길, 이만형, "머시닝센터 장착형 연마로봇의 성능 향상 및 연마 성능 평가," 한국정밀공학회지, Vol. 16, No. 9, pp. 179-190, 1999.
9. 이민철, 하덕주, "곡면 금형 연마를 위한 머시닝센터 장착형 연마로봇 시스템 개발에 관한 연구," 한국정밀공학회지, Vol. 16, No. 4, pp. 163-177, 1999.
10. Polishing System FP-a Series, Nagasei, 1994.
11. Sawada, Y., Intelligent Polishing System KM Series, Daikin, 1994.
12. 조현덕, 자유곡면을 위한 5-축 정밀가공에 관한 연구, 박사학위논문, 한국과학기술원, 1993.
13. M. C. Lee, S. J. Go, M. H. Lee, C. S. Jun, D. S. Kim, K. D. Cha, and J. H. An, "A Robust Trajectory Tracking Control of a Polishing Robot System Based on CAM Data," Int. J. of RCIM, Vol. 17:1-2, pp. 177-183, 2001.
14. S. J. Go, and M. C. Lee, "Development of a Controller for Polishing Robot Attached to Machining Center and Its Performance Evaluation," Proc. of '98 KACC, pp. 346-352, 1998.
15. DNC2 Manual, FANUC, 1996.
16. K. S. Fu, R. C. Gonzalez and C. S. G. Lee, ROBOTICS: Control, Sensing, Vision and Intelligence, McGraw-Hill, 1987.
17. 광준기, 백정렬, Inside Secrets Visual C++5.0, 삼각형, 1997.
18. 정재현, 곡면금형의 연마가공 시스템, 연구결과 보고서, 부산대학교 ERC/NSDM, 1995.