

## 자동 연마 시스템의 사용자 지향형 통합 프로그램 및 자동 교사 시스템 개발

### Development of An User-Friendly Integrated Program and Teaching System for Automatic Polishing Robot System

고 석 조, 이 민 철, 이 만 형, 안 중 환, 전 차 수, 이 돈 진

(Seok-Jo Go, Min-Cheol Lee, Man-Hyung Lee, Jung-Hwan Ahn, Cha-Soo Jun, and Don-Jin Lee)

**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. Some workers tend to gradually avoid the polishing work because of the poor environment caused by dust and noise. In order to reduce the polishing time and cope with the shortage of skilled workers, a user-friendly automatic polishing system was developed in this research. The polishing system with five degrees of freedom is able to keep the polishing tool normal to the die surface. The polishing system is controlled by a PC-NC controller. To easily operate the developed polishing robot system, this study developed an integrated program in the Windows environment. This program consists of four modules: the polishing module, the graphic simulator, the polishing data generation module, and the teaching module. Also, the automatic teaching system was developed to easily obtain teaching data and it consists of a three dimensional joystick and a proximity sensor. The joystick is used to simultaneously drive the polishing system to an arbitrary orientation and the proximity sensor is used to obtain teaching points precisely. Also, to evaluate the stability of the driving program and the teaching system, polishing experiments of a die of saddle shape were carried out.

**Keywords** : user-friendly automatic polishing system, PC-NC controller, integrated program, the automatic teaching system

#### I. 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 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 전체 금형 제작시간의 약 30-40%를 차지하므로 상당히 많은 시간을 요하는 작업이며, 작업 시 발생하는 먼지, 소음, 진동 등으로 인하여 작업자들이 점차 기피하기 때문에 기능인력이 점점 줄어들고 있는 실정이다[1]-[5].

한편, 3차원 자유곡면을 이루고 있는 금형의 경우는 연마작업이 매우 어렵고, 시간 또한 많이 소요되는 작업이다. 이러한 자유곡면을 가진 금형 연마 공정을 자동화하여 생산성 향상을 추구하고자 선진국에서는 이미 활발한 연구가 진행되어 왔다[1]-[3][6]-[8]. 특히, 일본의 Daikin사,

Nagase사 등에서는 5축 전용 자동연마 시스템을 이미 상품화하여 판매하고 있다. 국내의 경우에는 작업인력의 부족과 고임금화로 인하여 금형 연마의 자동화에 대한 필요성이 더욱 절실해지고 있으므로, 몇몇 회사(삼립전기, 현대자동차, 삼성전관 등)에서는 자동연마 시스템을 일본에서 수입하여 사용하고 있는 실정이다. 그러나, 이러한 5축 전용 시스템을 구성하기 위해서는 비용이 고가가 되는 문제점이 있다. 따라서, 산업현장에서 보편화된 머시닝센터(machining center)를 활용하는 방안도 고려되었지만 충분한 자유도를 가지지 못하므로 3차원 자유곡면의 연마작업에는 적합하지 못했다. 국내에서도 3차원 곡면 자동연마 시스템을 비교적 적은 비용으로 구성하기 위하여 다관절 로봇에 의한 자유도5의 연마 시스템을 개발한 연구 사례가 있었다[9]. 그러나, 이 경우에는 공작 기계와 비교해서 강성과 위치결정정도가 떨어지는 단점이 있었다.

본 연구에서는 이런 점들을 고려하여 3차원 곡면 연마에 가장 적합한 5축 연마 시스템을 구현하기 위하여 3축 직선운동부에 자유도2의 연마헤드(polishing head)를 부가하여 연마 공구가 임의의 자유곡면과 항상 법선 방향을 유지하며 일정한 연마력으로 연마할 수 있는 자유도5의 3차원 곡면 금형 자동 연마 시스템을 개발하고자 한다. 그리고 개발된 연마기의 제어기로서는 개방형 PC-NC 제어기인 PMAC을 사용하고자 한다. 개발된 5축 연마 시스템에 의해 연마 작업을 수행할 경우 충분한 자유도의 부여로 인하여 공작물의 준비대체 시간과 고정구의 제작에 소요되는 시간의 감소, 인적비용의 절감 효과, 유효가동율의 증대

접수일자 : 2000. 8. 29., 수정완료 : 2001. 1. 5.

고석조 : 동의공업대학 기계시스템계열(sigo@dit.ac.kr)

이민철, 이만형, 안중환 : 부산대학교 기계공학부(mclee@hyowon.pusan.ac.kr/mahlee@hyowon.cc.pusan.ac.kr/jhwahn@hyowon.pusan.ac.kr)

전차수 : 경상대학교 산업공학과(ccjun@nongae.ac.kr)

이돈진 : 부산대학교 지능기계공학과(dilee@hyowon.pusan.ac.kr)

※ 본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금 및 두뇌한국21사업 핵심분야에 의하여 지원되었음.

및 연속무인운전을 가능하게 하고, 가공 정밀도의 향상 및 복잡한 금형 연마가 용이할 것으로 예상된다[10].

그리고 윈도우(Windows) 환경에서 사용자가 연마 시스템을 쉽게 구동할 수 있는 통합 프로그램을 개발하고자 한다. 본 통합 프로그램에는 5축 NC 데이터 생성 기능, 연마실행 기능, 교시 기능, 좌표계 설정 기능, 시뮬레이션 기능 등을 구성하고자 한다. 여기서, 5축 NC 연마 데이터의 생성은 본 연구에서 개발한 연마 전용 CAM 소프트웨어로 [11][12]부터 생성된다. 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 자동 연마 시스템에서는 찾아 볼 수 없는 본 연마기의 특징 중 하나이다. 시뮬레이션 기능에서는 연마 작업 전에 연마 궤적을 그래픽으로 확인할 수 있는 기능이다. 그리고 개발된 통합 프로그램을 연마 시스템에 적용하여 실제 연마 작업을 수행함으로써 개발된 자동 연마 시스템에 대한 성능 평가를 하고자 한다.

II. 자동 연마 시스템의 구성

1. 연마헤드의 설계 및 제작

자유도 3의 구조를 가지는 연마기구에 의해 곡면 금형을 연마할 경우에는 곡면의 경사가 급격할수록 연마숫돌이 곡면과 접촉하는 부분이 좁아지므로 균일한 연마가 곤란하게 되는 문제점을 가지게 된다. 또한 숫돌이 접촉면에 가하는 수직가공력이 편중되고 숫돌의 회전으로 인해 원하는 곡면보다 깊게 연마하는 현상이 발생할 수 있기 때문에 양호한 연마면을 얻을 수 없게 된다[13]. 따라서, 3축 연마기구일 경우에는 연마숫돌의 연결부분을 볼 조인트(ball joint)나 유니버설 조인트(universal joint) 등의 유연한 구조를 가지도록 구성하여 절삭 현상을 방지하고, 접촉면적을 넓혀야 한다. 그러나, 이 경우도 연마숫돌의 회전에 의해 접촉면에 발생하는 마찰력의 분포가 달라지므로 이에 따라 연마력의 분포가 곡면의 곡률에 따라 변하므로 양호한 연마성능을 발휘할 수 없다는 문제점을 가지고 있다 [7][13]. 반면에, 5축 연마기구에 의한 곡면연마는 그림 1과 같이 충분한 자유도로 인하여 연마숫돌의 자세가 곡면과 법선방향을 유지할 수 있다. 따라서, 곡면의 각 연마지점에서의 연마력  $F_n$ 은 항상 일정하게 유지할 수 있으므로 보다 양호한 연마표면을 얻을 수 있다. 또한, 3축 연마기구에서 나타날 수 있는 접근 불가능한 곡면에 대해서도 5축 연마기구의 경우는 자세제어를 통해 보다 유연하게 대처할 수 있다. 그러나, 다관절 로봇에 의한 5축 연마기구의 경우에는 공작기계와 비교해서 강성과 위치결정정도가 떨어지는 단점이 있다[1][9].

본 연구에서는 이런 점들을 고려하여 3차원 곡면 연마에 가장 적합한 5축 연마 시스템을 구현하기 위하여 3축직

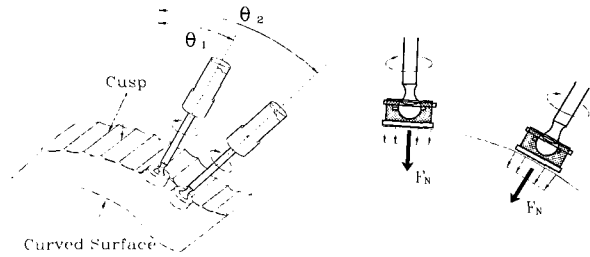


그림 1. 5축 연마기구에 의한 연마.  
Fig. 1. Mechanism with five degrees of freedom.

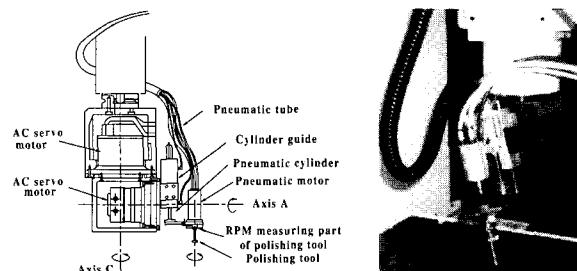


그림 2. 연마헤드의 구조.  
Fig. 2. Structure of the polishing head.

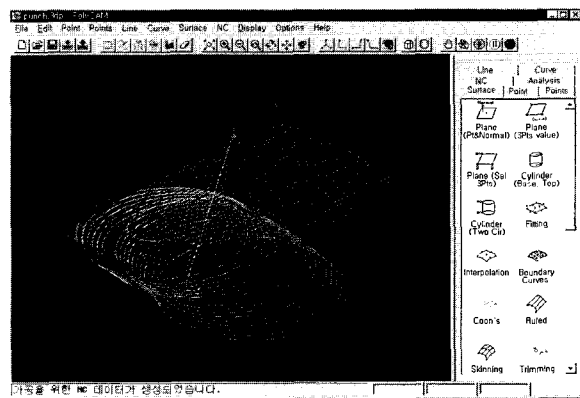


그림 3. 연마헤드의 급격한 자세 변화.  
Fig. 3. Rapid motion of a polishing head.

선운동부에 자유도2의 연마헤드(polishing head)를 부가하여 연마 공구가 임의의 자유곡면과 항상 법선 방향을 유지하며 일정한 연마력으로 연마할 수 있는 자유도5의 3차원 곡면 금형 자동 연마 시스템을 개발하고자 한다. 먼저 자유도2인 연마헤드의 구조를 결정하기 위해 두 가지의 모델이 검토되었다. 그림 2는 첫 번째로 고려된 연마헤드의 구조를 나타낸다. 그러나, 이와 같은 형태의 연마헤드에서는 연마헤드의 기구학적인 구조로 해서 곡면 금형 데이터를 추종하기 위해 연마 도중에 연마헤드의 급격한 자세 변화를 요구하게 되는 경우가 발생한다[11][12]. 즉, 웨도우 마스크 금형에 대한 곡면 연마 데이터를 생성해 보면 그림 3과 같이 금형의 중심 근방에서 연마 시스템이 금형의 표면에 법선을 유지하기 위해 연마헤드가 계속해서 급격

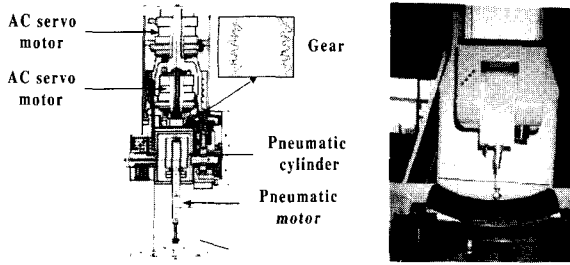


그림 4. 개선된 연마헤드의 구조 및 외관.  
Fig. 4. Structure of the improved polishing head.

한 자세변경을 하고 있음을 볼 수 있다. 이것은 연마헤드의 구조적인 특성에 의해 C축의 회전중심과 연마공구의 회전중심이 176 mm 편심되어 있고, C축의 선회 각도가  $\pm 180^\circ$  로 제한되었기 때문이다. 그림 2에서 보면 공압 모터에 공급되는 공압라인 및 A축 모터로부터 나오는 신호선들이 기계외부로 돌출되어 있으므로 해서 C축의 경우 단일 방향으로 계속 회전될 수 없음을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 연마헤드의 기구학적인 구조를 변경하였다. 그림 4는 구조적으로 개선된 연마헤드의 구조 및 외관이다. 개선된 연마헤드에서는 그림 2와 같이 기계외부로 돌출되어 있는 공압라인을 제거하기 위해 연마헤드의 몸체 내부에 구멍을 가공해서 이 구멍을 통해 공압이 공급되도록 하였다. 그리고 A축 구동을 위한 모터를 C축과 동일축 상에 위치하도록 설계하고 모터의 회전을 기어열에 의해 전달함으로써 외부에 나와 있는 신호선을 처리하였다. 이를 위해서 그림 4와 같이 A축 구동 모터에 연결되는 신호선을 중공축인 C축 모터의 내부를 통해 제어기로 연결시켰다. 개선된 연마헤드에서는 C축의 회전이 외부의 간섭에 의해 제한을 받지 않고, 연마헤드의 외관을 보면 그림 2에서 발생했던 문제가 해결되었음을 알 수 있다.

2. 자동 연마 시스템

구조적으로 개선된 연마헤드를 바탕으로 3차원 곡면 금형 자동 연마 시스템을 개발하였다. 그림 5는 개발된 전용 연마 시스템의 구성도와 연마 시스템의 외관을 나타낸다. 전용 연마 시스템은 최대 가공중량물 2500 kg을 적재할 수 있으며 테이블 작업 면적은 1250 mm × 560 mm이다. 각 축의 위치제어를 위해서는 Delta Tau사의 개방형 PC-NC 제어기인 PMAC을 사용함으로써 동시 5축 제어에 이용하였으며, 산업용 컴퓨터를 개발된 전용 연마 시스템의 호스트 컴퓨터로 사용하여 자동 연마 시스템을 쉽게 조작할 수 있도록 윈도우 환경에서의 사용자 지향형 통합 프로그램을 개발하였다. 또한 호스트 컴퓨터에는 자동 연마기 전용의 CAM 시스템이 구축되어 있어서 연마할 곡면에 대한 CATIA, AutoCAD 및 기타 여러 CAD/CAM 시스템에서 통용되는 데이터 파일만 있으면 5축의 연마 데이터를 생성할 수 있다. 표 1은 개발된 자동 연마 시스템의 사양을 나타낸다. 그리고 개발된 자동 연마 시스템과 현재 국내 금형 업체에서 사용하고 있는 연마 시스템과의 비교를 위해 각 연마 시스템의 주요 특징 및 장단점을 표 2에 정리하였다.

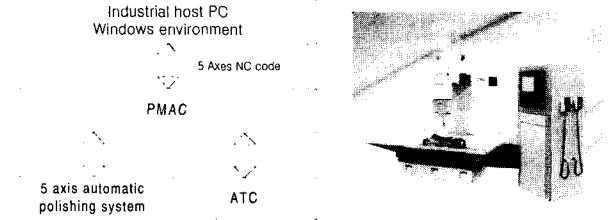


그림 5. 전용 곡면 금형 연마 시스템.  
Fig. 5. The polishing robot system.

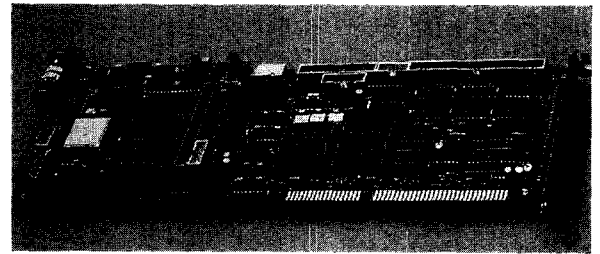


그림 6. PMAC 제어기.  
Fig. 6. PMAC controller.

표 1. 자동 연마 시스템의 사양.

Table 1. Specifications of polishing system.

능력	X축 이동량 (테이블 전후)	1250 mm
	Y축 이동량 (새들 좌우)	560 mm
	Z축 이동량 (램 상하)	500 mm
	A축 선회각도 (공구 상하)	$\pm 90^\circ$
테이블	C축 선회각도 (어테치먼트 좌우)	$\pm 200^\circ$
	테이블 작업면의 크기	1250 mm × 560 mm
	테이블 적재중량	2500 kg
제어 장치		PMAC
ATC		6 tools

본 연구에서 선정한 PMAC 제어기는 Motorola사의 DSP를 사용하여 동시 8축 제어가 가능하도록 구성한 운동 제어기이다. 그림 6은 PMAC 제어기의 외형을 나타낸다. 연마 시스템의 제어기로서 PMAC을 선택한 이유는 다음과 같다. 먼저 제어 시스템을 구축할 수 있도록 하기 위해 제어 장치에 접속하는 서보계와 주변기구에 대한 선택 자유도를 높일 수 있다. 시스템 통합을 용이하게 하기 위해 필요한 시스템 상호간의 정보교환이 자유롭게 실행된다. 끝으로 NC 장치 내부 정보로의 접근 및 기능 편성이 용이하기 때문이다. PMAC은 일반적인 CNC 제어기보다 훨씬 더 빠른 축 당 40  $\mu$ s의 서보 갱신시간을 가지기 때문에 더욱 정밀한 궤적 제어가 가능하며, 운동제어를 위하여 16비트 DAC를 사용하고 있다[14]. 그리고, 일반적인 머시닝 센터와 같은 공작기계에 바로 적용할 수 있도록 G-code를 처리할 수 있는 기능을 가지고 있다. PMAC은 운동 제어를 위하여 내부적으로 비례-미분-적분 서보루프를 사용하고 있으며 추종에러를 줄이기 위하여 속도 및 가속도 피드포워드(feed-forward) 제어를 기본적으로 사용하고 있으며,

표 2. 개발된 연마기와 기존의 전용 연마기와의 특성 비교.

Table 2. Comparison of characteristics between the developed polishing system and the conventional system.

	Developed polishing system	Five-axis polishing system	Six-axis polishing system
Structure	Three axis vertical 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 (A축은 수동 조작)	6
Working space	1250 mm × 560 mm	1580 mm × 1000 mm	1200 mm × 800 mm
Carrying capacity	2500 kg	8000 kg	5000 kg
Stiffness	Good	Good	Bad
Control performance	Good	Fair	Fair
Cost	Cheap	Expensive	Expensive
Control unit	PC-NC controller	NC controller	SEL controller
Teaching system	Manual pulse generator & Joystick	Joystick	Without
Teaching mode	Manual teaching mode & Automatic teaching mode	Manual teaching mode	Without

추가적으로 노치 필터(notch filter)와 확장된 극배치 알고리즘(extended pole placement algorithm)을 사용할 수 있다. 또한, 사용자가 PMAC 내부의 제어루프를 사용자 임의로 재구성할 수 있고, PMAC에서 제공하는 제어기 설계를 위한 비주요 툴을 이용하여 최적의 서보 제어 계인을 설정할 수 있으므로 강력한 운동 제어 기능을 가지게 된다 [14][15].

3. 자동 교시 시스템의 개발

본 연구에서 개발한 전용 연마 시스템을 이용하여 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[11][12]로부터 연마 데이터를 생성하고, 생성된 연마 데이터를 PMAC 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.

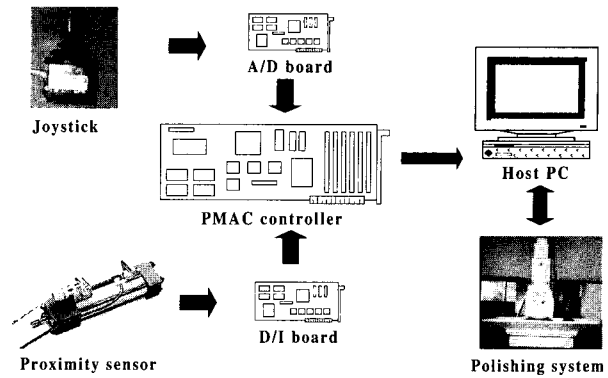


그림 7. 교시 시스템의 구성.

Fig. 7. Configuration of teaching system.

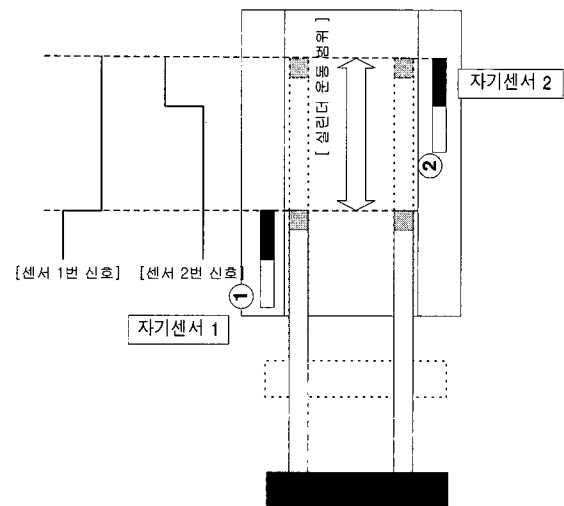


그림 8. 근접 센서를 장착한 실린더의 개략도.

Fig. 8. Schematic diagram of cylinder equipped with proximity sensor.

표 3. 교시 시스템의 사양.

Table 3. Specifications of teaching system.

Element	Specification	Maker
Joystick	30JBK-ZT-30R3	SAKAE
Pneumatic cylinder	DSNO-25-50-PPV-A	FESTO
Proximity sensor	SMEO-4-K-LED-24-B	FESTO

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 자동으로 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 그림 7과 같은 3차원 형태의 포텐셔미터(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 PMAC 제어기로 보내어 진다. 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 실린더 외부에 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 PMAC 제어기로 전달된다. 그림 8은 실제 근접 센서가 장착된 실린더의 구조를 그린 개략도이며, 표 3은 개발된 교시 시스템의 사양을 나타낸다.

그리고 개발된 교시 장치를 이용하여 작업자가 쉽게 교시 데이터를 획득할 수 있도록 하기 위해서 교시 시작 버튼, 교시 종료 버튼, 교시창 등 교시작업에 필요한 기능들을 통합 프로그램 내에 구성한다. 교시 기능에는 조이스틱을 이용한 수동 교시 기능과 조이스틱을 사용하지 않고 교시점을 자동으로 획득하는 자동 교시 기능, 두 가지 방법의 교시 기능으로 구성한다.

III. 통합 구동 프로그램 개발

본 연구에서는 윈도우즈 환경에서 사용자가 연마 시스템을 쉽게 구동할 수 있는 통합 프로그램을 개발하고자 한다. 통합 프로그램은 Visual C++ 6.0을 사용하여 개발하였으며 MFC를 사용하여 구조적이고 쉽게 제작하였다.

1. 통합 프로그램의 화면 구성

통합 프로그램의 화면 구성은 그림 9와 같다. 화면 하단에는 연마 작업에 필요한 모든 기능들을 삽입하였고 화면 우측에는 초기화면으로 갈 수 있는 HOME 기능, 프로그램 종료 기능, 시뮬레이션 기능 등으로 구성하였다. 그림 10은 본 연구에서 개발한 통합 프로그램의 주요 기능에 대한 상세 구성도를 나타낸다. 통합 프로그램에 구현된 기능들을 보면 POSITION 기능에서는 기계의 절대좌표와 상대좌표를 표시하는 기능을 가지고 있다. 그림 11은 기계 절대 원점과 공작물 좌표 원점이 설정된 모습을 나타내는 화면이다. PROGRAM에서는 연마 전용 CAM 소프트웨어에 의해 생성된 곡면 연마 데이터를 PMAC 제어기에 전송하는 기능과 연마 작업을 실행하는 기능이 구성되어 있다.

TEACH 기능에서는 연마하고자 하는 금형에 대한 정확한 데이터가 없을 경우에 작업자가 연마기 상에 금형을 두고 직접 교시점을 설정하는 수동 교시 기능과 교시점을 자동으로 생성하는 자동 교시 기능이 구성되어 있다. SYSTEM 기능에서는 모터 파라미터 설정 기능이 있으며 이 기능을 사용함으로써 모터의 비례 계인, 적분 계인, 미분 계인 및 시정수 등을 설정할 수 있다. SIMULATION은 연마 작업 전에 연마 제척을 그래픽으로 확인할 수 있는 기능이

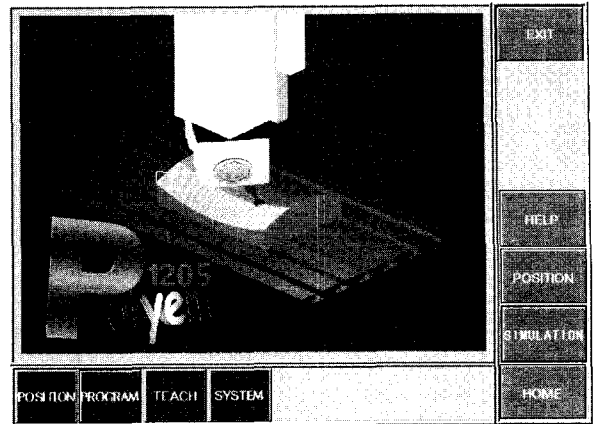


그림 9. 통합 프로그램의 화면 구성.

Fig. 9. Screen configuration of the integrated program.

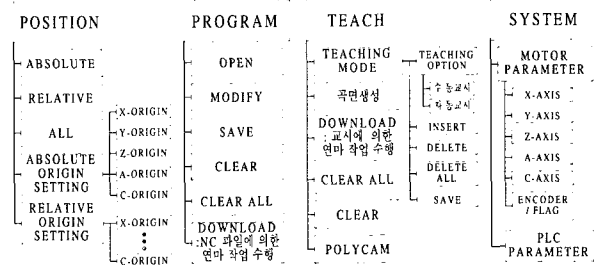


그림 10. 통합 프로그램의 메뉴 구성도.

Fig. 10. Menu configuration of the integrated program.

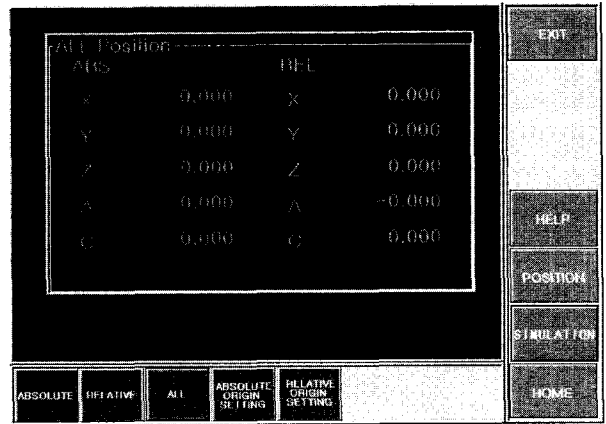


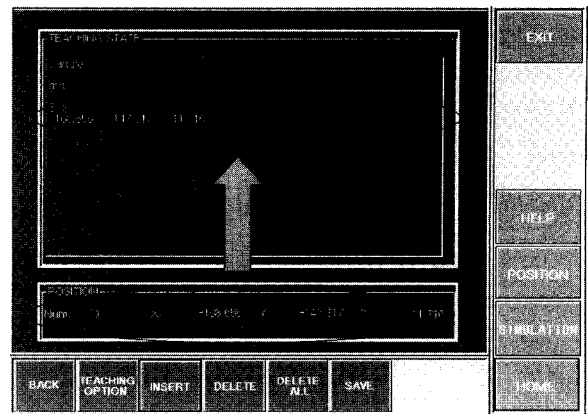
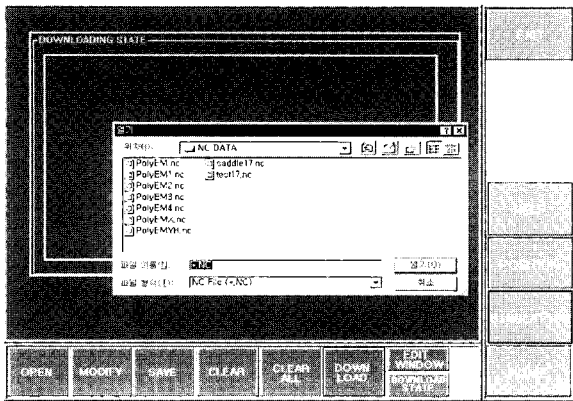
그림 11. 기계 절대 원점과 공작물 좌표 원점 설정.

Fig. 11. Setting the absolute origin and relative origin coordinate.

2. 연마 시스템에 의한 연마 작업

개발한 전용 연마 시스템에 의해 연마 작업을 수행하기 위해서는 두 가지의 구동 방법을 사용할 수 있다. 금형에 대한 CAD 데이터가 있을 경우에 사용하는 연마 데이터 전송에 의한 연마 작업 기능과 금형에 대한 정확한 데이터가 없을 경우에 사용하는 교시에 의한 연마 작업 기능이다.

먼저 CAD 데이터가 있을 경우에는 전용 CAM 소프트웨어로부터 연마 데이터를 생성할 수 있으므로 본 통합 프로그램에서는 생성된 연마 데이터를 PMAC 제어기에 전



(b) 교시점 선택

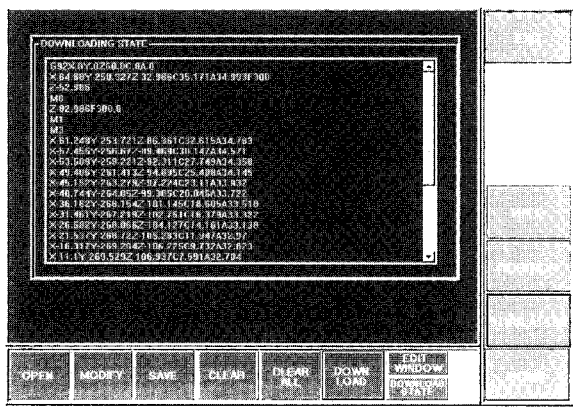
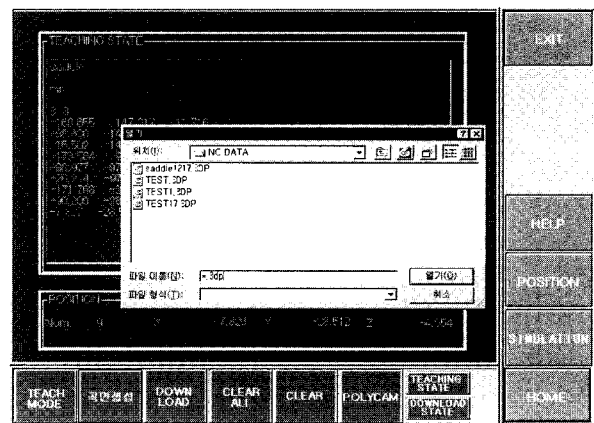


그림 12. 연마 데이터의 다운로드.

Fig. 12. Download of a polishing data.



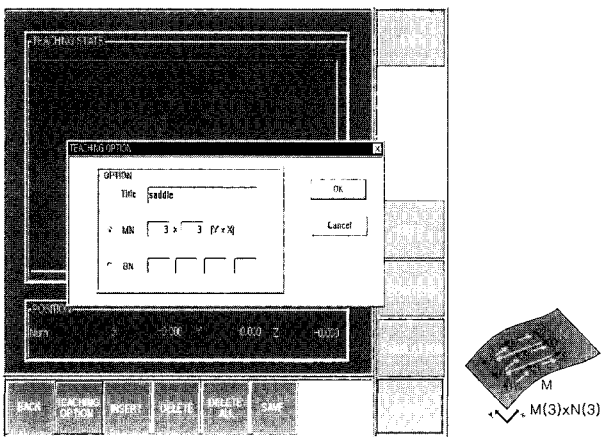
(c) 교시완료 후 저장

송하는 기능을 제공하고 있다. 그림 12는 연마할 파일을 선택하는 과정과 PMAC 제어기의 메모리에 전송된 연마 데이터를 나타낸다.

다음으로 금형에 대한 정확한 데이터가 없을 경우에는 교시 장치로부터 교시점을 설정하고 설정된 교시점으로부터 곡면 연마 데이터를 생성할 수 있다. 개발된 통합 프로그램에는 작업자의 수작업에 의해 실행되는 수동 교시 기능과 교시점을 자동으로 획득하는 자동 교시 기능 두 가지 기능이 갖추어져 있다.

그림 13. 교시장치에 의한 수동 교시.

Fig. 13. Manual teaching mode. (a) Determining a teaching type and a number of teaching points, (b) Selecting a teaching point, (c) Store a teaching data.



(a) 교시형식 및 교시점의 개수 결정

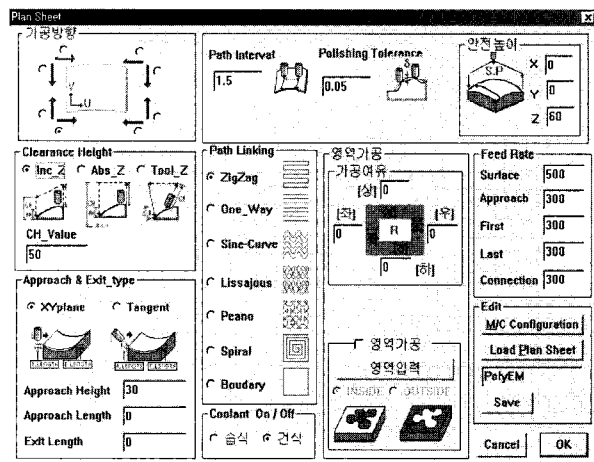


그림 14. 교시파일로부터 연마 데이터 생성과정.

Fig. 14. Generation of polishing data.

수동 교시는 작업자가 직접 조이스틱을 이용하여 금형에 대한 모든 교시점을 획득하는 방법으로써 수동 교시에

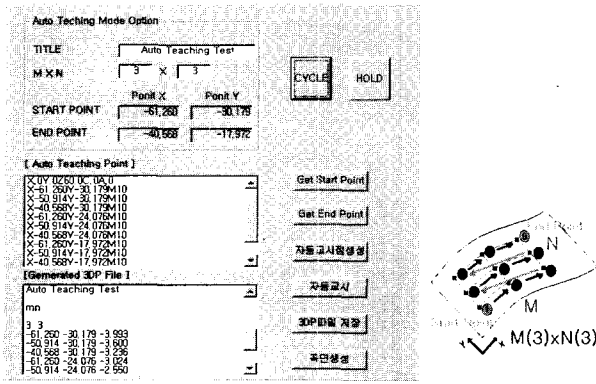


그림 15. 교시장치에 의한 자동 교시.  
Fig. 15. Automatic teaching mode.

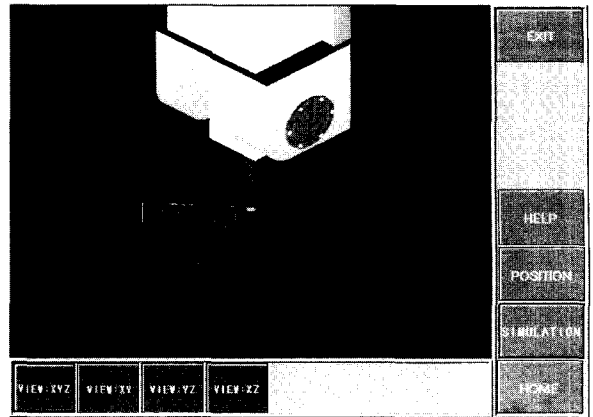


그림 17. 연마 데이터에 대한 시뮬레이션.  
Fig. 17. Graphic simulator.

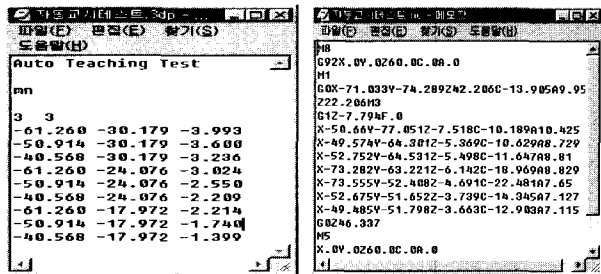


그림 16. 자동 교시에 의한 NC 데이터 생성.  
Fig. 16. Generation of NC data.

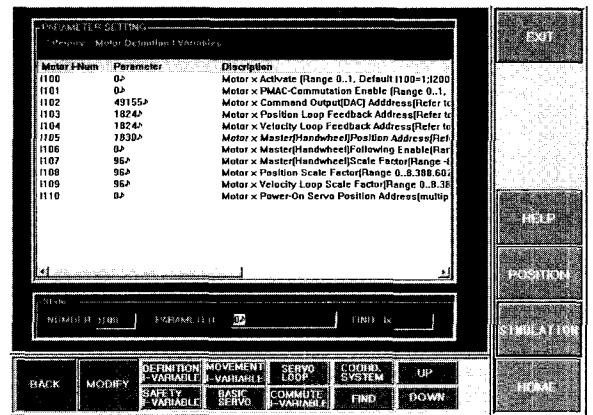


그림 18. 모터 파라미터 설정.  
Fig. 18. Setting motor parameters.

의한 교시 과정은 그림 13과 같다. 먼저 그림 13(a)와 같이 교시형식과 획득하고자 하는 교시점의 개수를 선정한다. 본 연구에서는 격자형식(MN)과 경계형식(BN) 두 가지의 교시형식을 사용하고 있으며, 그림 13(a)는 3×3의 격자형식을 선택한 경우이다. 그리고 작업자는 조이스틱을 이용하여 연마기를 교시 위치로 이동시킨 후 교시점을 획득한다. 그림 13(b)는 한 개의 교시점이 획득되는 과정이며, 교시가 완료되면 그림 13(c)와 같이 교시파일로 저장한다. 교시장치로부터 구한 교시파일은 전용 CAM 소프트웨어를 이용함으로써 필요한 연마 데이터로 변환된다. 그림 14는 연마 데이터를 생성하기 위해 작업자가 선정해야 할 연마 조건들을 나타내고 있다.

자동 교시 기능은 수동 교시 기능에서와 같이 조이스틱을 사용하여 필요한 전 교시점을 교시하는 것이 아니라 교시하고자 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. 그림 15는 자동 교시 기능에 의한 교시 절차를 나타낸다. 먼저, 작업자는 교시 영역의 시작점 ①과 끝점 ⑨를 조이스틱을 이용하여 교시한다. 그리고, 그림 15의 자동 교시점 생성 기능을 실행하면 연마기는 생성된 교시 경로를 따라가면서 교시점을 자동으로 획득하게 된다. 그리고 연마 데이터는 수동 교시에서와 동일한 방법으로 전용 CAM 소프트웨어를 이용함으로써 구할 수 있다. 그림 16은 자동 교

시에 의해 획득된 교시 데이터와 CAM 소프트웨어에 의해 생성된 NC 데이터를 나타내고 있다.

3. 그래픽 시뮬레이터(Graphic simulator)

본 연구에서는 5축 가공에서 일어날 수 있는 공구 간섭과 공구 및 연마헤드와 공작물간의 충돌 현상을 방지하기 위하여 공구경로 및 공구 축 운동을 시각적으로 확인할 수 있는 그래픽 시뮬레이터를 개발하였다. 본 시뮬레이터는 OpenGL을 이용하여 개발하였으며, 실제 기계의 움직임뿐만 아니라 모양까지 거의 흡사하게 구성되었다. 연마기 모델은 와이어 프레임(wireframe) 모델 또는 셰딩(shading) 모델로 나타낼 수 있다. 그림 17은 그림 16에서 생성된 연마 데이터의 공구 경로를 검증하는 과정을 나타낸다.

4. 모터 파라미터 설정

그림 9의 SYSTEM 기능에서는 모터 파라미터 설정을 변경할 수 있는 기능을 제공하고 있다. 즉, 이 기능을 사용함으로써 그림 18과 같이 모터의 파라미터 상태값을 알 수 있으며, 모터의 비례 게인, 적분 게인, 미분 게인 및 시정수 등의 값들을 재설정할 수 있다.

IV. 자동 연마 시스템의 성능평가

본 연구에서 개발된 자동 연마 시스템을 이용하여 실제 금형에 대한 연마 작업을 수행함으로써 개발된 통합 프

그램의 성능 및 자동 교시 시스템에 대한 신뢰성을 평가하고자 한다. 먼저 자동 교시 시스템의 신뢰성을 평가하기 위해서 동일 교시 위치에 대한 위치 반복정밀도 실험을 수행하였다. 따라서, 반복 실험을 통하여 실제 변위와 측정된 변위 사이에 얼마만큼의 오차가 발생하는지 그리고 측정된 값이 얼마만큼의 신뢰성을 가질 수 있는지를 판단할 수 있는 근거를 제시하고자 한다.

표 4. 교시 시스템에 대한 위치 반복정밀도 실험.  
Table 4. Repeatability of the teaching system.

	x	y	z1	z2	z3	z4	z5	z6	z7	z8	z9	z10	평균값
point 1	48.674	41.072	-2.089	-2.054	-2.045	-2.072	-2.072	-2.089	-2.076	-2.094	-2.058	-2.045	-2.06
point 2	72.182	41.072	3.249	-3.236	-3.245	3.262	3.240	-3.245	3.276	3.280	-3.249	3.254	3.25
point 3	95.690	41.072	-4.949	-4.949	-4.949	-4.949	4.980	-4.958	4.936	-4.957	-4.954	-4.962	-4.95
point 4	48.674	64.202	-3.112	-3.143	-3.152	-3.130	3.152	3.135	3.130	-3.152	3.174	-3.139	3.14
point 5	72.182	64.202	-4.224	-4.228	-4.228	4.228	4.268	4.259	4.228	4.237	-4.281	-4.232	-4.24
point 6	95.690	64.202	5.985	5.981	-5.981	-5.959	-5.972	5.958	5.963	-5.976	5.985	-5.976	-5.97
point 7	48.674	87.332	4.535	4.564	4.599	4.564	4.573	4.582	4.582	4.535	4.617	-4.617	4.58
point 8	72.182	87.332	5.680	-5.654	-5.702	-5.667	-5.684	5.702	-5.702	5.711	-5.671	-5.702	-5.68
point 9	95.690	87.332	7.380	7.380	-7.358	7.384	-7.383	7.353	7.366	7.380	7.406	-7.367	-7.37



그림 19. 말안장 금형.  
Fig. 19. Die of saddle shape.

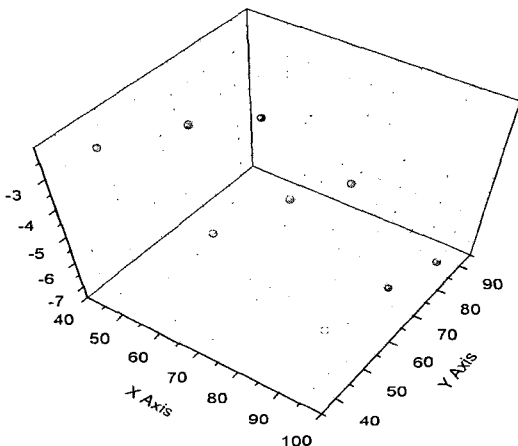


그림 20. 교시 시스템에 의해 획득된 교시 데이터.  
Fig. 20. Teaching data obtained the teaching system.

연마실험에 사용한 연마물의 형상은 그림 19와 같은 말안장 형태의 3차원 자유곡면이며, 재질은 난삭재로 알려져 있는 SKD11을 사용하였다. 자동 교시 기능에 의한 교시 시스템의 위치 반복정밀도를 측정하기 위해서 9개의 교시 위치에 대한 교시 실험을 수행하였다. 표 4는 9개의 교시 위치에 대해서 각각 10회 반복 실험한 결과를 나타낸다. 그림 20은 표 4의 결과를 그래프로 표현한 것이며, 각 위치에 대한 최대편차를 구한 것이 표 5이다. 표 5에서도 알 수 있듯이 발생한 최대 편차가 0.041 mm임을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발한 교시 시스템에 의한 자동 교시가 충분한 신뢰성을 가짐을 알 수 있다.

표 5. 각 교시점에서의 최대편차.  
Table 5. Maximum variation at each teaching point.

	최대 편차
point 1	0.034
point 2	0.030
point 3	0.030
point 4	0.034
point 5	0.041
point 6	0.015
point 7	0.037
point 8	0.022
point 9	0.036

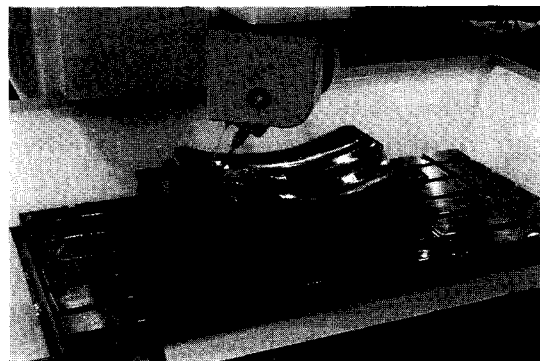


그림 21. 말안장 금형에 대한 연마.  
Fig. 21. Polishing of a saddle die.

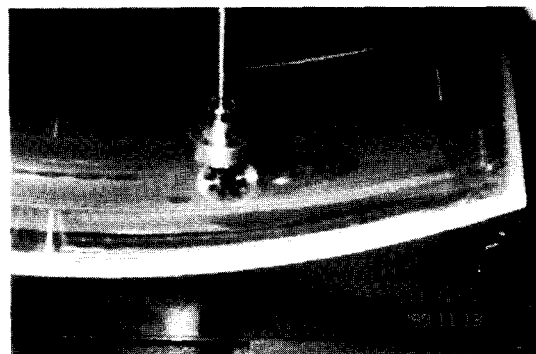


그림 22. 연마 후의 금형 표면.  
Fig. 22. Die surface after polishing work.



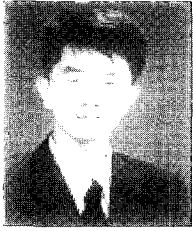
다음으로 개발된 통합 프로그램의 성능을 평가하기 위해 말안장 금형에 대한 연마작업을 수행하였다. 제어알고리즘은 PMAC에서 제공하고 있는 비례-미분-적분 제어 알고리즘이 사용되었으며, 연마 패턴은 지그재그 패턴을 이용하여 X축 및 Y축 방향으로 교대로 연마 실험을 수행하였다. 그림 21은 통합 자동 연마 시스템에 의한 연마 장면이다. 그리고 그림 22의 연마 실험 결과를 보면 표면의 상태가 연마 스톨의 형상이 비칠 정도의 경면이 됨을 알 수 있다.

### V. 결론

본 연구에서는 자유도5의 사용자 지향형 자동 연마 시스템을 구축하였다. 그리고 윈도우즈 환경에서 사용자가 연마 시스템을 쉽게 구동할 수 있는 통합 프로그램을 개발하였다. 개발된 통합 프로그램의 기능은 5축 NC 데이터 생성 기능, 연마실행 기능, 교시 기능, 좌표계 설정 기능, 시뮬레이션 기능 등이 구성되어 있다. 5축 NC 연마 데이터의 생성은 본 연구에서 개발한 전용 CAM 소프트웨어로부터 생성된다. 연마실행기능은 연마면에 대한 정확한 데이터가 있는 경우 생성된 5축 NC 데이터를 연마 시스템에 전송하고 연마를 실행하는 기능이다. 교시 기능은 연마면에 대한 정확한 데이터가 없는 경우 작업자가 작업시작 전에 연마면에 대한 정보를 획득할 수 있는 기능으로서 작업자의 수작업에 의해 실행되는 수동 교시와 연마면에 대한 교시점을 자동으로 획득하는 자동 교시 두 가지 기능으로 구성되어 있다. 개발된 교시 시스템의 성능 평가를 위한 위치 반복정밀도 실험에서는 최대 편차가 0.041 mm임을 알 수 있었다. 따라서 금형에 대한 데이터가 없어도 작업자는 개발된 교시 시스템을 이용함으로써 연마 작업을 수행할 수 있다. 그리고, 그래픽 시뮬레이터를 개발함으로써 작업 전 최적 데이터에 대한 오류를 발견할 수 있게 되어 연마 작업에 대한 안정성을 확보하였다. 또한, 개발된 통합 프로그램을 연마 시스템에 적용하여 실제 말안장 금형에 대한 연마 작업을 수행함으로써 개발된 자동 연마 시스템에 의한 연마 성능이 효과적임을 확인 할 수 있었다.

### 참고문헌

- [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] 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.
- [3] M. Kazutoyo, K. Tsukasa, I. Satoru, S. Katsumasa, and S. Tetuo, "Study on automatic polishing of injection Mold-Polishing with constant pressure under controlled tool staying time-," *Proc. of the ABTEC*, pp. 431~434, 1995. (in Japanese).
- [4] 박균명, 장진희, 한창수, "자동경면 다듬질 장치의 실험적 분석에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제12권 제9호, pp. 30-39, 1995.
- [5] 강성철, 김문상, 이교일, "금형 연마작업을 위한 로봇 오프라인 프로그래밍 시스템의 개발 및 적용," 한국정밀공학회지, 제14권 제1호, pp. 69-77, 1997.
- [6] K. Saito, "Finishing and polishing of free form surface," *Bulletin of Japan Society of Precision Engineering*, vol. 18, no. 2, pp. 104-109, 1984.
- [7] 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. (in Japanese).
- [8] K. Saito and T. Miyoshi, "Automation of polishing process for a cavity surface on dies and molds by using an expert system," *Annals of CIRP*, vol. 42, no. 1, pp. 553-556, 1993.
- [9] 박삼진 외 8명, 3차원 곡면의 설계 및 가공 통합시스템 개발, 최종보고서, 한국기계연구원, 1993.
- [10] 조현덕, 자유곡면을 위한 5-축 정밀가공에 관한 연구, 박사학위논문, 한국과학기술원, 1993.
- [11] 차경덕, 김동수, 전차수, 조규갑, 이민철, "5축 연마기를 위한 전용 CAM 시스템," 대한기계학회 '98년도 생산 및 설계공학부 학술행연회 강연집, 부산대학교, pp. 27-31, 1998.
- [12] M. C. Lee, S. J. Go, M. H. Lee, C. S. Jun, D. S. Kim, K. D. Cha, and J. H. An, "Robust trajectory tracking control of a polishing robot system based on CAM data," *The 10th Int. Conf. on FAIM(Flexible Automation and Intelligent Manufacturing)*, Maryland, USA, pp. 497-506, June, 2000.
- [13] 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 Int. Session Papers*, Pusan, Korea, pp. 346-351, Oct., 1998.
- [14] Delta Tau, *PMAC User's Manual*, Delta Tau Data Systems
- [15] 이돈진, 김선호, 박경택, 안중환, "개방형 CNC에서 절삭력 변화에 따른 이송계의 최적 서보제어," 한국정밀공학회 '98춘계학술대회 논문집, 충북대학교, pp. 211-214, 1998.

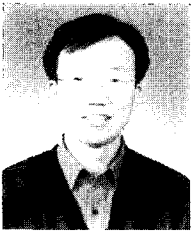


**고 석 조**

1969년 2월 20일생. 1994년 부산대학교 기계공학과 졸업. 부산대학교 기계공학과 대학원 석사(1996). 부산대학교 지능기계공학과 박사 수료(1999). 1995 ~ 1997 대우전자 디지털 미디어 사업부 연구원. 1999 ~ 현재 부산대학교 기계기술연구소 전임연구원. 2001 ~ 현재 동의공업대학 기계시스템계열 전임강사. 주관심분야는 지능제어, 비선형 제어, 로봇 제어, 시스템 규명.

**이 만 형**

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제6권, 제11호, 참조.



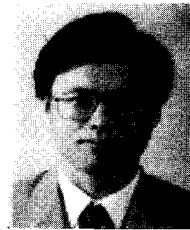
**전 차 수**

1959년 6월 14일생. 1983년 부산대학교 기계공학과 졸업. 한국과학기술원 산업공학과 석사(1985), 동대학 박사(1989). 1989년 ~ 현재 경상대학교 산업시스템 공학부 교수. 관심분야는 CAD/CAM, 다축 NC 가공, Geometric modeling.

modeling.

**이 민 철**

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제6권, 제4호, 참조.



**안 중 환**

1954년 4월 16일생. 1977년 서울대학교 기계공학과 졸업. 한국과학기술원 생산기계공학 석사(1979). 토오쿄오대학 정밀기계공학 박사(1987). 1979 ~ 현재 부산대학교 기계공학부 교수. 주관심분야는 Monitoring & Control of

Machining Process, Ultra-Precision Machining, Mechatronics & Manufacturing Automation.



**이 돈 진**

1970년 3월 19일생. 1996년 부산대 정밀기계공학과 졸업. 부산대 정밀기계공학과 석사(1998). 부산대 지능기계공학과 박사과정 수료(2000). 관심분야는 생산시스템, 메카트로닉스.