

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

금형의 자동연마 시스템 개발

안중환*, 정해도*, 이민철*, 전자수**, 이만형*, 조규갑***

Development of Automatic System for Die Polishing

Jung-Hwan Ahn*, Hae-Do Jeong*, Min-Cheol Lee*, Cha-Su Jun**, Man-Hyung Lee*, Kyu-Kab Cho***

ABSTRACT

Generally, die polishing is a time consuming process, resulting in 30~50% of the whole die manufacturing time. However, die polishing has not been automated yet, since it needs a great deal of experience and skill.

This paper describes a new development of automated system for die polishing and focuses on the successful achievements of the element techniques to realize from hand skill to automation, as followings: (1) The 5 axes polishing system by the aid of robot with 2 degrees of freedom, is developed for the application of curved surface die. (2) The CAM system realizes a 5 axes tool path control for polishing and measuring. (3) The conductive elastic tool is able to meet curved surfaces of die and gives a high efficient and quality polishing characteristics. (4) The surface roughness measurement device with noncontact laser is developed and has a high reliability without surface damage.

Key Words : curved surface die(곡면 금형), elastic tool(전도성 탄성공구), surface roughness(표면거칠기), measurement device(측정 장치)

1. 서론

최근 소비자의 미적 요구가 높아짐에 따라, 각종 제품의 외관상태를 결정하는 금형의 표면은 경면에 가까운 가공정도를 필요로 하고 있고 그 결과 연마가공은 필수 불가결한 공정으로 인식되고 있다. 최근 CAD/CAM시스템, CNC공작기계 등의 도입으로 자동화가 상당히 발개되어 왔으나, 그 제조공정의 약 30~50%를 점유하고 있는 연마가공은 아직까지도 체계화되어 있지 않고, 숙련공의 경험과 기술에 의존한 수작업으로 이루어지고 있는 실정이다. 이러한 금형제조작업은 대표적인 3D업종

이면서도 숙련을 요하는 작업이므로 작업자의 부족과 인건비 상승, 제품수명 사이클의 단축에 의한 납기단축등의 요인에 의해 자동화를 통한 생산성향상에 대한 인식이 높아지고 있다. 이러한 자동화의 요구는 제품의 다양화, 복잡화, 고정밀화, 제조가격의 저렴화 등 수요자의 요구를 충족시키기 위해서 종래의 가공방식과 숙련공의 경험에 의존한 생산방식에서 탈피하여 금형 생산 자동화를 유도하고 있다.

본 연구에서는 금형 제조 공정에 있어서의 마지막 공정인 연마작업의 자동화를 위하여 금형의 자동연마 시스템을 개발하였다.

* 부산대학교 기계공학부
** 경상대학교 산업공학과
*** 부산대학교 산업공학과

2. 연마용 CAM

본 연구에서는 자동연마시스템을 위한 전용 CAM 시스템인 PolyCAM을 개발하였으며 주요기능으로는 곡면 모델링, CAD 데이터 인터페이스, 연마용 공구경로 생성, 그래픽 시뮬레이션 등이 구현되었다. PolyCAM은 Windows (95/98/NT) 환경에서 Visual C++의 MFC와 OpenGL을 사용하였다.

2.1 곡면 모델링 및 CAD 데이터 인터페이스

다양한 종류의 CAD/CAM 응용 분야에서 기하학적 형상을 표현·처리하기 위해 공통적으로 사용될 수 있도록 만들어진 개방형 형상 모델러를 곡면 모델링 커널(geometric modeling kernel)이라 하는데, Fig. 1은 본 연구에서 개발한 곡면 모델링 커널의 구조를 보여주고 있다¹¹⁾. 본 커널의 곡면 모델로는 비균일 유리 다항식(Non_Uniform Rational Power-Basis Polynomial: NURP)을 사용하고 있다.

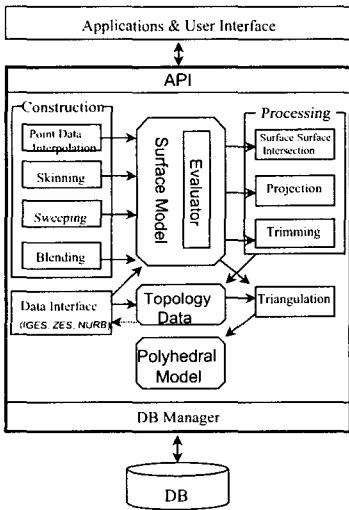


Fig. 1 Structure of kernel

PolyCAM에서 표현 가능한 곡면의 종류로는 점군 보간 곡면, Coons 곡면, 스킨링(skinning) 곡면, 이동곡면, 블렌딩(blending) 곡면 등이 있다. 또한 곡면 처리기능으로는 곡면간의 교선, 곡선 투영(curve projection), 곡면과 페이스(face)의 트리밍, 복합 곡면의 다면체 근사 등이 있다. 점군 보간 곡면 기능과 Coons 곡면 보간 기능은 연마기의

teaching 데이터로부터 곡면을 형성하여 NC 데이터를 생성하는데 쓰이고 있다.

본 시스템은 CAD 시스템으로부터 곡면 모델을 입력받기 위하여 DXF, ZES, IGES 등의 형식을 지원한다. Fig. 2는 Pro/E로부터 받은 IGES 파일을 입력한 예이다.

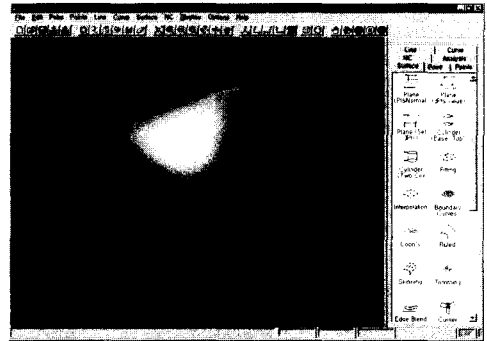


Fig. 2 Example of IGES interface

2.2 다양한 연마 경로 패턴의 생성

연마가공의 효율과 금형 면의 품질을 향상시키기 위해 One-way, Zigzag, Lissajous (Fig. 3), Sine-Curve, Peano 패턴 등과 같은 다양한 종류의 경로 패턴(pattern)을 개발하였다¹²⁾. 또한 곡면의 특정 부분만을 연마하고자 할 경우 사용자에 의해 입력된 정보를 이용하여 공구경로를 생성하는 영역가공 기능을 추가하였다. (Fig. 4).



Fig. 3 Example of Lissajous pattern

2.3 기구학적 모델링 및 기계축값 계산

5축 연마용 공구경로를 생성하기 위해서는 먼저 앞 절에서 언급한 경로 패턴에 따라 곡면 모델로부터 CC 데이터(공구접촉점과 곡면의 법선 벡터)를 구하고 각 공구접촉점에서 공구의 축벡터를 결

정하여 CL 데이터(공구 중심점, 공구 축벡터)로 바꾸어 준다. 이때 연마가공의 특성상 공구가 곡면에 수직해야 하므로 공구 축벡터는 공구접촉점에서 곡면의 법선 벡터와 일치시킨다. 다음 단계는 CL 데이터를 특정한 공작기계의 기계축값(joint values: X, Y, Z, C(θ_4), A(θ_5))으로 변환시키는데 이를 위하여 연마기의 구조를 Fig. 5와 같이 기구학적으로 모델링하고 역기구해를 구한다. 본 연구에서 이용된 5축 연마기의 역기구해는 아래의 식 (1)~(3)과 같다. 끝으로 이 기계축값을 NC 컨트롤러에 맞도록 post-processing하여 최종적인 NC 데이터를 생성한다.

$$\begin{cases} \theta_5 = \text{atan}_2(u_x/S_4, u_z) \text{ or } \theta_5 = \text{atan}_2(-u_y/C_4, u_z) \\ X = x_{CL} + l_2(1 - C_4) + l_3S_4S_5 \\ Y = y_{CL} + l_2S_4 - l_3C_4S_5 \\ Z = z_{CL} - l_3(1 - C_5) \end{cases} \quad (3)$$

여기서,

(xCL, yCL, zCL): 공구 중심점

(ux, uy, uz): 공구축 벡터

l2: C축 피벗점에서 A축 피벗점까지의 거리

l3: A축 피벗점에서 공구끝점까지의 거리

$$C_4 = \cos(\theta_4), S_4 = \sin(\theta_4), C_5 = \cos(\theta_5), S_5 = \sin(\theta_5)$$

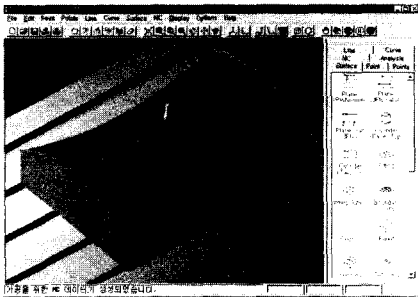


Fig. 4 Example of regional machining

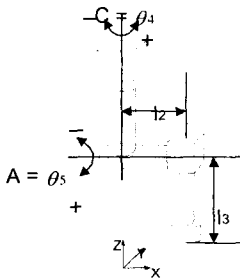


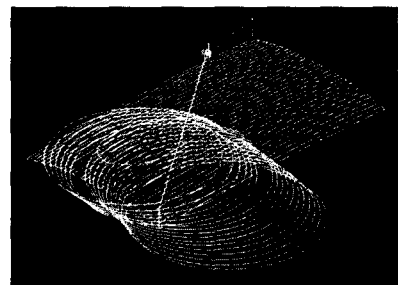
Fig. 5 kinematic modeling

$$\theta_4 = \text{atan}_2(u_x, -u_y) \quad (1)$$

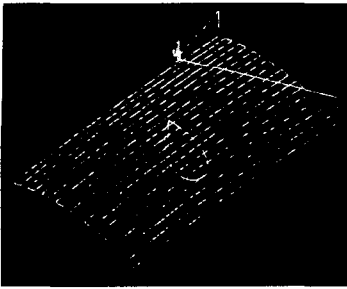
또는,

$$\theta_4 = \text{atan}_2(-u_x, u_y) \quad (2)$$

역 기구해로부터 구한 기계축값은 각각 해당축의 작동범위 내에 들어야 하는데 특히 회전축의 작동범위가 제한됨으로써 심각한 문제를 야기할 수 있다. Fig. 6(a)는 C축과 A축의 작동범위가 각각 $\pm 180, \pm 90$ 인 연마기로 Shadowmask를 연마가공할 때 C축의 작동범위제한으로 인하여 발생한 공구이동궤적을 보이고 있다. 이러한 현상은 예를 들어 C축이 179° 인 공구자세에서 182° 로 바뀌는 경우, C축은 179° 에서 180° 를 거쳐 182° 로 가지 못하고, 0° 구간을 거쳐 357° ($179^\circ - (-178^\circ)$) 만큼 이동하게 된다. 이 문제를 해결하기 위해 역기구해의 축값 계산식을 바꾸는 방법을 이용하였다. 즉 C축은 식 (1)과 (2)의 두 가지 식에 의해 계산이 가능하므로 만약 식 (1)에 의해 계산된 C축 값이 작동범위를 초과한다면 C축의 계산식을 식 (2)로 바꾸어 준다. 이와 같은 축값 계산식 전환 시에는 공구충돌을 피하기 위해 점프 기능을 추가하였다(Fig. 6(b)).



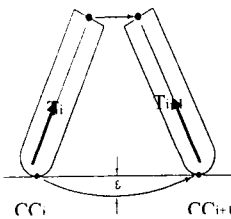
(a) Error between two cutter-contact points



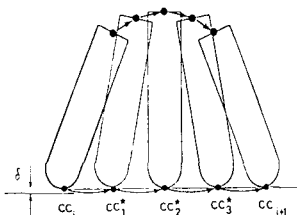
(b) Insertion of the new cutter-contact point

Fig. 6 The check of machine work-range and applying the alternative solution

대부분의 5축 NC기계 경우 joint space 상에서의 선형 보간 기능은 가지지만 cartesian space 상에서의 공구 끝점의 선형 보간 기능은 없으므로 두 공구접촉점 사이를 이동할 때 회전축의 변화로 인하여 공구는 Fig. 7(a)와 같이 곡선 궤적으로 이동하게 된다. 이러한 공구이동궤적상의 오차는 연마면의 품질을 떨어뜨리므로 Fig. 7(b)와 같이 주어진 허용오차를 만족하도록 기존의 CL 데이터 사이에 새로운 공구접촉점을 추가해야 하는데 이를 선형 궤적계획이라 한다. Fig. 7(a)는 하나의 회전축만이 고려되고 있으나 실제 5축 연마기의 두 회전축의 변화에 의한 공구이동궤적은 Fig. 8(a)와 같이 아주 복잡한 곡선의 형태를 보이고 있다. Fig. 8(b)는 선형궤적계획 이후의 공구이동궤적을 보여주고 있다.

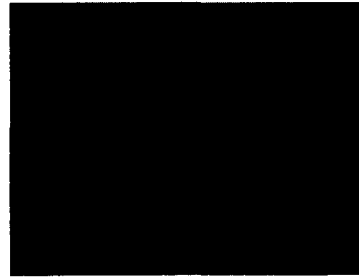


(a) Before the linear trajectory planning

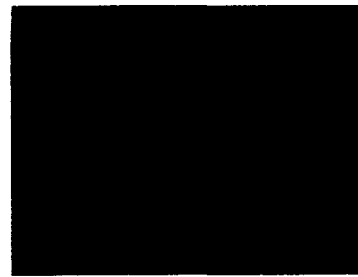


(b) After the linear trajectory planning

Fig. 7 The linear trajectory planning



(a) Before linear trajectory planning



(b) After linear trajectory planning

Fig. 8 Example of the linear trajectory planning

2.4 5축 연마기 그래픽 시뮬레이터 개발

5축 가공의 공구경로 및 공구축 이동을 시각적으로 확인하여 공구간섭 및 공구와 공작물간의 충돌 현상을 방지할 수 있도록 Fig. 9와 같은 그래픽 시뮬레이터(graphic simulator) 모듈을 개발하였다. 이 모듈은 NC 컨트롤러의 직선 보간기를 시뮬레이션하여 실제로 공구 끝의 이동경로 보여주는 kinematic 시뮬레이션 기능을 지원하고 있다. Fig. 6과 8에서 보여주는 kinematic 시뮬레이션은 두 회전축의 변화로 인해 발생된 문제점을 해결하는데 유용하게 이용되었다.

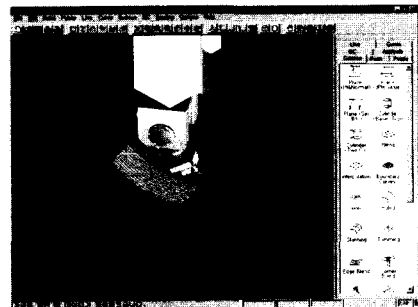


Fig. 9 Graphics simulator

3. 5축 연마 시스템

본 연구에서는 3차원 곡면의 가공에 가장 적합한 것으로 알려져 있는 5축 연마 시스템을 구현하기 위하여 3축 직선운동부에 2자유도의 연마헤드(polishing head)를 부가하여 연마 공구가 임의의 자유곡면과 항상 법선 방향을 유지하며 일정한 연마력으로 연마할 수 있는 5자유도의 3차원 곡면 금형 자동 연마 시스템을 개발하였다.

개발된 5축 연마 시스템에 의해 연마 작업을 수행하여 충분한 자유도로 인한 공작물의 준비대체 시간과 고정구의 제작에 소요되는 시간의 감소, 인력비용의 절감 효과, 유효가동율의 증대 및 연속무단운전이 가능해 졌고 가공 정밀도의 향상 및 복잡한 금형 연마가 용이해졌다.

그리고 윈도우즈 95 환경에서 사용자가 연마 로봇을 쉽게 구동할 수 있는 통합 구동 프로그램도 개발되었다. 개발된 통합 구동 프로그램에는 5축 NC 데이터를 전용연마기에 다운로드하는 기능과 피(被)연마면에 대한 정확한 데이터가 없을 경우 작업자가 작업시작 전에 피연마면에 대한 정보를 획득할 수 있는 교시기능 등이 구축되어 있다. 그 외에도 연마 레적을 확인할 수 있는 좌표 표시기능과 연마 데이터의 편집 기능 등을 추가하여 사용자가 연마 작업을 쉽게 수행할 수 있도록 하였다.

3.1 자동 연마 기구

3자유도의 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. 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 마찰력 F_f 의 분포가 달라지므로 이에 따라 연마력 F_N 의 분포가 곡면의 곡률에 따라 변하므로 양호한 연마성능을 발휘할 수 없다는 문제점을 가지고 있다

반면에, 5축 연마기구에 의한 곡면연마는 Fig. 10과 같이 충분한 자유도로 인하여 연마숫돌의 자세가 곡면과 법선 방향을 유지할 수 있다. 따라서, 곡면의 각 연마지점에서 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 경우에는 자세제어를 통해 보다 유연하게 대처할 수 있다. 그러나, 다관절 로봇에 의한 5축 연마기구의 경우에는 동작기계와 비교해서 강성과 위치결정 정도가 떨어지는 단점이 있다.

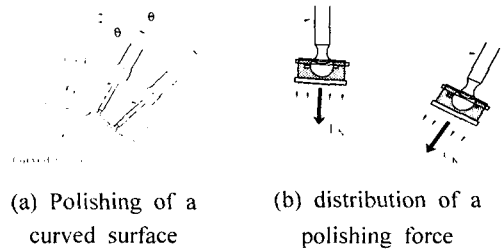


Fig. 10 Mechanism with five degrees of freedom

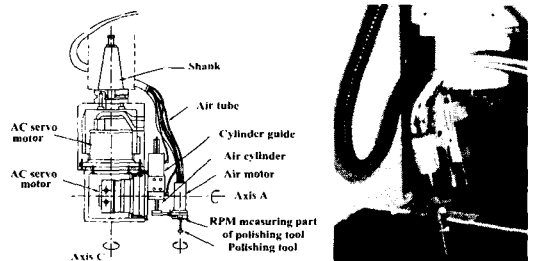


Fig. 11 Structure of the polishing head I

이러한 점을 고려하여 산업현장에 많이 보급되어 있는 3축 머시닝센터를 직선운동기구의 3축으로 사용하고, 보다 정밀한 자세결정정도(accuracy)를 위하여 머시닝센터에 2자유도를 부가하여 곡면 연마를 수행할 수 있는 공구의 개념으로 Fig. 11과 같은 구조의 2자유도 연마헤드를 개발하였다^{14,5)}.

그러나 Fig. 11과 같은 형태의 연마헤드에서는 연마헤드의 기구학적인 구조로 해서 연마 도중에 곡면 금형 데이터를 추종하기 위해서는 연마헤드의 급격한 자세 변화를 요구하는 경우가 발생하였

다. 즉, 웨도우 마스크 금형에 대한 곡면 연마 데이터 생성해 보면 Fig. 12 (a)와 같이 금형의 중심 근방에서 로봇이 금형의 표면에 법선을 유지하기 위해 로봇이 회전하는 것을 볼 수 있다. 이러한 문제는 CAM 프로그램을 수정하여 Fig. 12 (b)와 같이 연마로봇의 급격한 자세 변경 부분은 수정하였지만, 금형의 정점에서만은 자세를 한번 변경해야 하는 문제가 남아 있었다. 이것은 로봇의 구조적인 특성에 의해 C축의 선회 각도가 $\pm 180^\circ$ 로 제한되었기 때문이다. Fig. 11과 같은 연마헤드의 구조에서 보면 공압 모터에 공급되는 공압라인 및 A축 모터로부터 나오는 신호선 등으로 해서 C축의 경우 단일 방향으로 계속 회전시킬 수 없음을 알 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 로봇의 기구학적인 구조를 변경하였다. Fig. 13은 구조적으로 조정된 연마로봇의 구조 및 외관이다. 개선된 로봇에서는 C축의 선회각도를 $\pm 200^\circ$ 로 하였으며, 로봇의 외관을 보면 Fig. 11에서 발생했던 문제가 해결되었음을 알 수 있다.

그리고 수직가공력과 연마공구의 회전력은 공압을 이용하여 얻는다. 공압을 이용할 경우, 공압정밀 레귤레이터의 밸브를 조절함으로써 용이하게 압력을 쉽게 변경할 수 있고, 항상 일정한 압력을 부가하기가 쉽다는 장점이 있다. 수직가공력을 일정하게 유지하기 위해 공압 실린더의 입력단에 공압 정밀 레귤레이터를 사용하였다^[4,5].

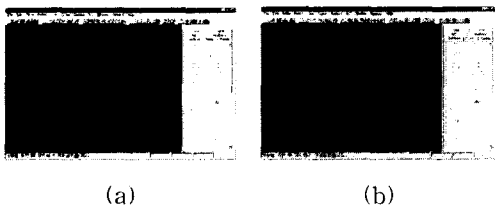


Fig. 12 The check of machine work-range and applying the alternative solution

3.2 자동 연마 시스템

구조적으로 개선된 연마헤드를 바탕으로 3차원 곡면 금형 자동 연마 시스템을 개발하였다. 개발된 전용 연마 시스템은 최대 가공중량물 2.5톤을 적재할 수 있으며 테이블 작업 면적은 1250 mm × 560 mm이다. 그리고 5축 제어기로는 Delta tau 사의 PC-NC 제어기인 PMAC을 이용하여 동시 5축 제어에 이용하였다. 개발된 3차원 곡면 금형

연마 시스템의 외관은 Fig. 14와 같다.

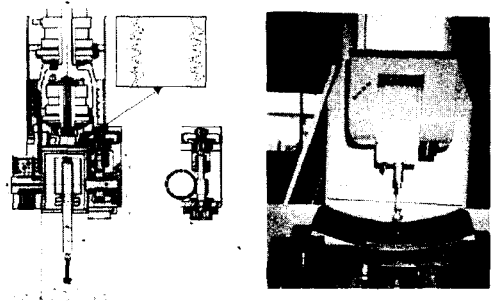


Fig. 13 Structure of the polishing head II

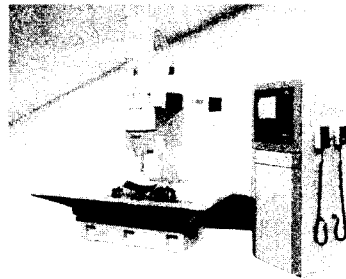


Fig. 14 The developed polishing robot system

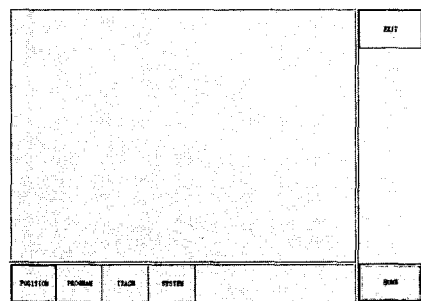


Fig. 15 Screen configuration of monitoring program

개발된 전용연마시스템의 호스트 컴퓨터에는 윈도우즈 95 환경의 산업용 컴퓨터를 사용하였으며, 자동 연마 시스템을 사용자가 쉽게 조작할 수 있도록 사용자 지향형 통합 프로그램을 개발하였다. 또한 자동 연마기 전용의 CAM 시스템이 구

축되어 있어서 연마할 면에 대한 CATIA, AutoCAD 및 기타 여러 CAD/CAM 시스템에서 통용되는 데이터 파일만 있으면 5축의 연마데이터를 생성할 수 있도록 하였다.

3.3 연마 시스템의 통합 프로그램 개발

개발된 연마시스템의 경우 사용자 지향형 통합 구동 환경을 구축하여 윈도우즈 환경에서 사용자가 연마 시스템을 쉽게 구동할 수 있는 통합 구동 프로그램을 개발하였다. 통합 구동 프로그램에는 5축 NC 데이터를 전용연마기에 다운로드하는 기능과 피(被)연마면에 대한 정확한 데이터가 없을 경우 작업자가 작업시작 전에 피연마면에 대한 정보를 획득할 수 있는 교시기능 등이 구축되어 있다. 그 외에도 연마 궤적을 확인할 수 있는 좌표 표시 기능과 연마 데이터의 편집 기능 등을 추가하여 사용자가 연마 작업을 쉽게 수행할 수 있다.

통합 프로그램은 Visual C++ 6.0을 사용하여 개발하였으며 MFC를 사용하여 구조적이고 쉽게 제작하였다. 통합 프로그램의 화면 구성은 Fig. 15와 같다. 화면 하단에는 버튼들을 구성하여 프로그램에서 사용 가능한 모든 기능들을 삽입하였다. 화면 우측에는 초기화면으로 갈 수 있는 HOME 버튼과 프로그램 종료 버튼이 구성되어 있다.

통합 프로그램의 기능을 보면 POSITION 기능에서는 기계의 절대좌표와 상대좌표를 표시하는 기능을 가지고 있다. PROGRAM에서는 CAM 소프트웨어인 PolyCAM에 의해 생성된 곡면 연마데이터를 PMAC 제어기에 다운로드(download)하는 기능과 연마 작업을 실행하는 기능으로 구성되어 있다. TEACH 기능에서는 연마하고자 하는 금형에 대한 정확한 데이터가 없을 경우에 작업자가 연마기 상에 금형을 두고 직접 교시점을 설정하는 기능과 설정된 교시점으로부터 곡면 연마 데이터를 생성하는 기능 그리고 생성된 연마 데이터에 의한 연마 실행 기능으로 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.

4. 연마 틀링

4.1 전도성 탄성공구 개발

일반적으로 금형의 다듬질가공은 일정한 압력을 공작물에 전사하는 가공 방법이다⁶⁾. 따라서 다듬질공구는 일정한 가공압력을 받으면서 다듬질가공을 수행하며 곡면 금형의 다듬질의 경우 유연히 금형의 곡면에 대응할 수 있는 구조를 가져야 한다. 그러나 다듬질 패드나 다듬질 펠렛의 경우는 가공 중에 공구의 형상이 일정하므로 Fig. 16과 같이 곡면 대응성이 떨어진다. 따라서 이러한 공구를 금형 자동연마기용의 공구로 사용할 경우 금형의 형상 정밀도 저하가 생길 수 있다. 따라서 새로운 개념의 공구 개발이 필요하다.

본 연구에서는 공구를 Fig. 17과 같이 곡면 형상에 따라 각각의 pellet이 독립적으로 움직일 수 있는 segment 형식으로 제작하고, pellet에 탄성적인 움직임을 주어 곡면 금형에 적절히 대응하며 전해 연삭(electro-chemical grinding)가공법을 응용하여 고능률 다듬질가공을 실현할 수 있는 공구를 개발하였다.

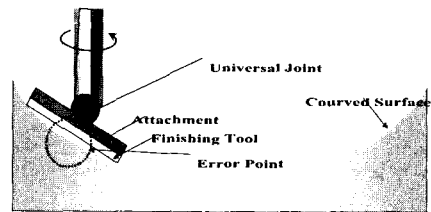


Fig. 16 Finishing of curved surface by conventional finishing tool

Fig. 18은 다듬질 공구의 개략도를 나타낸다. 본 연구에서 사용된 다듬질 공구는 연구의 목적에 맞게 제작된 다듬질 pellet이 holder에 개별적으로 장착되어 있고 다듬질 pellet과 holder 사이에 탄성체를 두어 다듬질 pellet이 탄성체의 변형 범위 내에서 수직 방향으로 자유롭게 움직일 수 있는 구조로 곡면 금형에 적절히 대응할 수 있게 되어 있다 (2). 그리고 고능률 가공을 위하여 전해 연삭법을 응용할 수 있도록, 공구는 holder를 전극으로 사용하여 holder 부분을 (-), 공작물 부분을 (+)로 하여 A 영역에서 전해작용을 일으킬 수 있는 구조로 되어 있다.

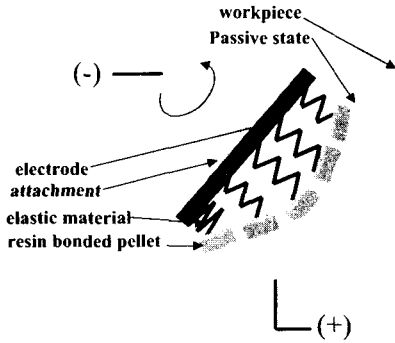


Fig. 17 Concept of die finishing using conductive elastic finishing tool

Fig. 19는 실제로 제작된 전도성 탄성공구의 외관을 나타낸다. 전도성 탄성공구는 마모되어 수명이 다한 다듬질 pellet을 교체할 수 있는 구조로 되어있다.

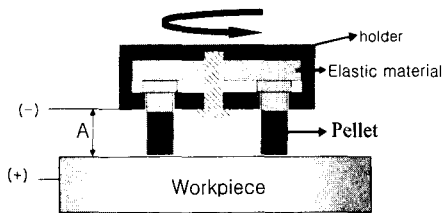


Fig. 18 Schematic of conductive elastic finishing tool

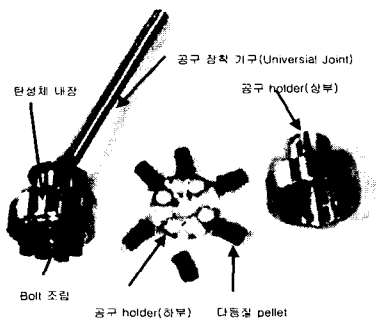


Fig. 19 Photographs of conductive elastic finishing tool

전도성 탄성공구의 성능을 평가하기 위해 수직형 머시닝 센터를 사용하였으며 일정한 가공압력을 줄 수 있는 attachment는 Fig. 20과 같은 구조를 하고 있다^[7].

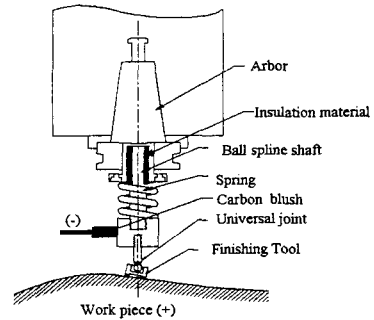


Fig. 20 Construction of die finishing attachment



Fig. 21 Modified profile before machining($R_{max} 5.752\mu m$)

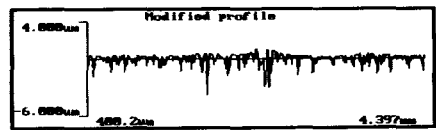


Fig. 22 Modified profile of mechanical grinding ($R_{max} 4.852\mu m$)



Fig. 23 Modified profile of electrochemical grinding($R_{max} 2.145\mu m$)

4.2 탄성공구의 연마 성능 평가

전도성 탄성공구를 이용하여 실제 전해연삭법을

실시하였다. 평면형상의 시편을 이용하여 동일한 조건으로 전해연삭법과 일반적인 가공을 비교하여 그 특성을 비교하였다. 가공결과 전해연삭법은 일반적인 연삭에 비하여 가공량이 월등하였으며 공구마모도 매우 적음을 확인할 수 있었다⁸⁾. Fig. 21, Fig. 22, Fig. 23은 그 가공 결과이다.

전도성 탄성공구의 곡면 대응성을 확인하기 위하여 Fig. 24와 같은 원형형상의 시편을 기계적 다듬질(mechanical finishing)을 하였다. 가공 결과 다듬질 횟수가 증가함에 따라 표면거칠기는 점차 떨어졌으며 입도가 미세해질수록 가공품위는 향상되었다. 또 종래의 공구에서 곡면가공시 발생하는 공구탈락이나 스크래치(scratch)등의 문제점도 전혀 발생하지 않았다. 최종 표면 거칠기는 Ra 0.11 μm , Rmax 0.298 μm 이고 가공 결과는 Fig. 25와 같다.

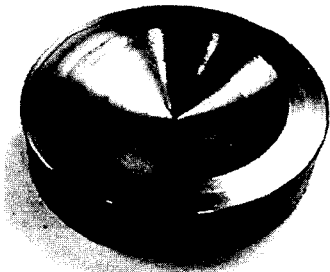


Fig. 24 Photograph of curved surface specimen

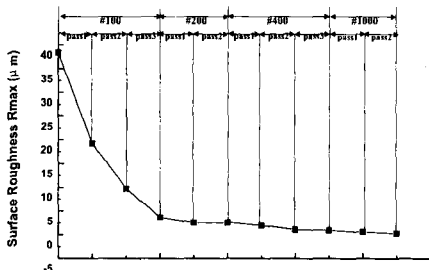


Fig. 25 Relation between grain size of finishing pellet and surface roughness

그리고 불룩한 곡률(R274)을 가지는 곡면 형상

의 시편에 대하여 공구의 입도를 #4000까지 사용하여 다듬질 가공을 수행하였다. 그 결과는 Fig. 26과 같고 가공 후 표면 거칠기는 Ra 0.017 μm , Rmax 0.1 μm 이다.

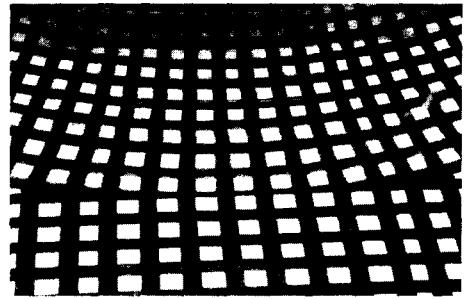


Fig. 26 Photograph of finished die surface by conductive elastic finishing tool (Rmax 0.1 μm)

따라서 금형의 다듬질 가공을 위하여 고안된 전도성 탄성공구는 곡면 금형의 가공시 우수한 곡면 대응성을 지니며 고품위 가공능력을 가짐을 확인하였고, 전해 연삭법을 적용할 수 있으므로 일반적인 가공보다 고능률 가공을 실현할 수 있다.

5. 연마면 측정

연마가공후 측정에는 형상 측정과 거칠기 측정이 있는데, 이 중 표면 상태의 품위를 평가하는 표면 거칠기의 측정은 보편적으로 촉침식을 사용해 왔다. 본 연구에서는 가공 자동화와 생산성 향상을 위해 비접촉식으로 표면거칠기를 기상에서 측정하였다.

5.1 측정원리

Fig. 27은 본 연구에서 제안한 산란광의 스크린 투영패턴을 이용한 표면 거칠기 측정법의 원리를 설명하고 있다. 레이저 다이오드에서 출력된 평행광은 일정한 경사각(θ)으로 측정 표면에 입사된다. 입사된 레이저광은 피측정물의 표면에서 산란하게 되는데, 산란된 빛은 CCD 카메라의 전방에 설치된 스크린에 거칠기 정보를 가지는 특성의 패턴을 형성하게 된다. 이 패턴 정보를 CCD 카메라로 읽어 들여 거칠기 측정 정보로 사용한다. 표면 거칠기가

작을수록 분포곡선은 C→A로 바뀐다. 광량분포곡선에 대한 평균(m_x), 분산(V_x), 표준편차(σ_x)는 다음 식과 같다.

$$m_x = \frac{\sum(x_i \times g_i)}{\sum g_i} \quad (1)$$

$$V_x = \frac{(\sum(x_i - m_x)^2 \times g_i)}{\sum g_i}, \sigma_x = \sqrt{V_x} \quad (2)$$

여기서 x_i 는 화소(pixel) i 의 위치이고, g_i 는 해당 화소의 밝기를 나타내는 그레이 레벨(gray level)이다.

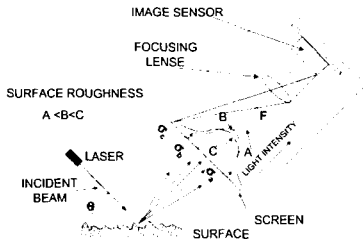


Fig. 27 Principle of surface roughness measurement using scattered laser beam pattern

5.2 측정장치의 구성

측정 디바이스의 구성은 Fig. 28과 같다. 그리고 전체 실험장치의 구성은 Fig. 29와 같이 PC, 측정부, 5축 자동연마기, 화상입력장치(image grabber), 반도체레이저 발광장치 등으로 구성되었다. CCD 카메라에 맺힌 화상은 화상입력장치를 통하여 PC에서 읽어들이어 데이터 처리를 행한다. 화상의 각 화소는 화상입력장치에서 8 bit로 A/D변환되어 0~255사이의 그레이레벨(gray level)로 입력되게 된다.

측정 디바이스는 5축 자동연마기의 헤드에 부착되어 항상 측정면에 수직을 유지하고 또한 측정면과의 일정한 거리를 유지한다.

실험에 사용된 CCD카메라의 사양은 Table 1과 같다. 레이저 발생기로 파장 $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$, 출력 4mW의 레이저 다이오드를 사용하였다. 또한 레이저 다이오드의 광출구쪽에 직경 0.8mm 구멍의 차단판을 설치하여 측정영역을 직경 0.8mm로 제한하였다¹⁾.

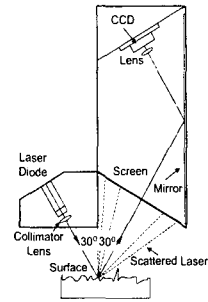


Fig. 28 Measuring device with pattern projected screen and mirror

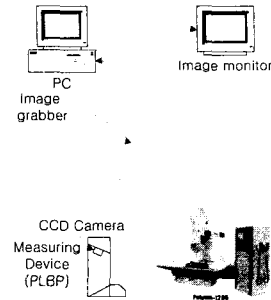


Fig. 29 Schematic diagram of experimental setup

Table 1 Specification of CCD camera(made by SAMSUNG ELECTRIC CO.,LTD)

Model	BCS-724A
Area(μm)	6.4(L)× 7.5(H)
Pixels	811(L)× 507(H)
Resolution	Horizontal:580TV LINES Vertical :350TV LINES

외부광원의 영향을 차단하고 레이저광의 반사에 의해서만 맺힌 화상데이터를 분석하기 위해 레이저 다이오드를 ON/OFF하여 ON상태의 그레이 레벨에서 OFF상태의 그레이 레벨을 뺀 것을 화상 입력데이터로 하였다.

5.3 측정 실험결과 및 고찰

5.3.1 거칠기 표준시편을 이용한 시스템 평가

표준시편의 측정화상과 현미경 사진은 Fig. 30과 같다. Fig. 30에서 Rmax 0.2~0.8인 시편은 래핑면이기에 표면에 뚜렷한 스크래치(scratch) 방향이 없고 표면이 랜덤한 특성을 가지고 있다. Rmax 1.6~3.2인 시편은 연마면 이기에 뚜렷한 스크래치 방향이 있고 면의 특성이 일정한 방향성(directionality)을 가지고 있음을 알 수 있다. 반사광의 분포패턴은 스크래치의 영향을 많이 받으며 스크래치 방향에 수직되는 방향으로 많이 퍼진다. 이러한 특성은 측정화상에서 산란광 패턴의 전반적인 형태를 통해서도 알 수 있다.

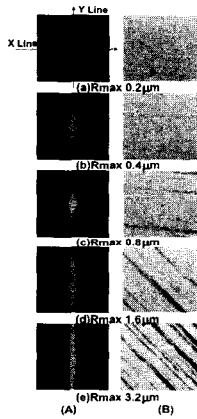


Fig. 30 Measured Laser Beam Pattern(A) and Microscopic Surface of Specimen(B)

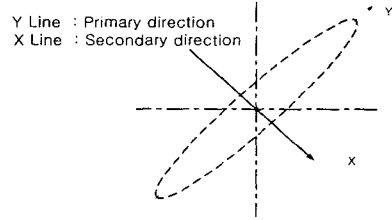
Fig. 30의 측정화상 패턴은 시편 방향을 잘 맞추었을 경우이고 패턴을 일반화하면 Fig. 31(a)과 같이 표현된다. 그림에서 Y(primary direction)는 패턴의 장축에 해당되는 선이고 X(secondary direction)는 패턴의 단축에 해당되는 선이다. 표면거칠기의 영향을 가장 많이 받는 주방향의 시편 거칠기에 따른 표준편차를 그리면 Fig. 31(b)와 같다. 본 연구에서는 주방향의 광량분포 표준편차를 연마면 거칠기 측정을 위한 파라미터로 사용한다.

Fig. 31(b)로부터 래핑면과 연마면에 대해 표면 거칠기와 표준편차는 일정한 비례관계를 가지며 같은 연마면 이라도 자유 입자와 고정 입자에 의해 가공된 면의 특성이 다를 수 있다. Fig. 31(b)로부터 거칠기와 표준편차의 상관관계식을 구하기 위해 최소자승법을 이용하여 직선 근사한 식이 (4), (5)식이다.

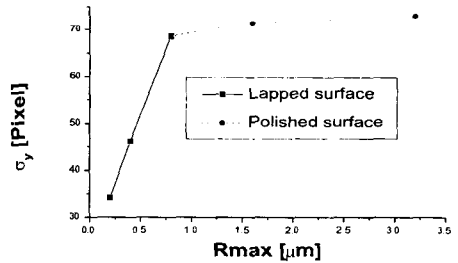
$$\text{래핑면일 때 } \sigma_y = \frac{R_{\max} - 22.95}{57.28} \quad (4)$$

$$\text{연마면일 때 } \sigma_y = \frac{R_{\max} - 67.32}{1.81} \quad (5)$$

따라서 CCD카메라에 잡힌 산란광의 광량 분포로부터 표준편차를 구한 뒤 식(4), (5)를 이용하여 연마면의 표면 거칠기를 간접적으로 측정할 수 있다.



(a) Two principal directions of reflected laser beam pattern



(b) Primary direction

Fig. 31 Standard deviation of light intensity distribution according to primary(b)

5.3.2 연마면 거칠기 측정 실험

곡면연마면 거칠기 측정실험에 사용된 시편은 Fig. 32와 같은 웨도우 마스크(250mm× 145mm)급형이며 금형의 재질은 SKD11이다. 한 개의 곡면 연마시편에서 다양한 표면거칠기를 얻기 위해 각 입도에 대하여 수직가공력, 회전수, 이송속도를 설정하고 연마 횟수를 증가시켰다.

연마 실험을 거쳐 얻어진 다양한 표면거칠기에 대해 촉침식 표면거칠기(SV-400)와 본 연구에서 개발한 측정기를 사용하여 측정실험을 진행하였다.

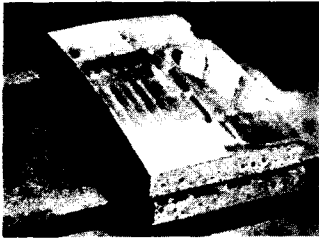


Fig. 32 Photograph of shadowmask die

측정결과는 Fig. 33에서 알 수 있는바와 같이 곡면 적용시 표면 거칠기 측정치와 기준치의 상대 오차는 20% 범위 내였다.

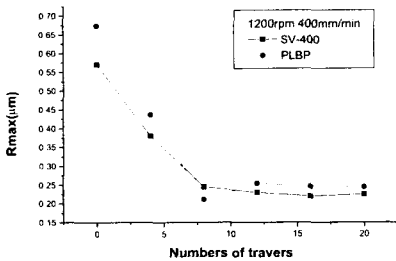


Fig. 33 Experimental results

6. 결론

본 연구에서는 금형의 자동연마 시스템을 개발 하였으며 구체적인 결과는 아래와 같다.

- 1) 연마용 5축 공구경로 및 측정경로가 생성가능한 CAM 시스템을 개발하였다.
- 2) 2자유도의 연마로봇이 부착된 5축 연마시스템을 구축하였고, Visual C++6.0을 이용하여 통합프로그램을 개발하였다.
- 3) 곡면의 고능률·경면 연마가공을 위해 전도성 탄성공구를 이용한 연마 툴링 시스템을 개발하였다.
- 4) 가공후 표면거칠기의 기상계측이 가능한 비접촉식 표면거칠기 측정 시스템을 개발하였다.

참고문헌

1. 전차수, 구미정, 박세형, "곡면 모델링 커널 개발," 한국정밀공학회 '96 추계학술대회논문집, pp. 774-778, 1996.11.23

2. 윤민호, 전차수, 조규갑, 이민철, "5축 연마기를 위한 전용 NC 프로그래밍 개발," 한국 CAD/CAM 학회 학술발표회 논문집, 1998. 2.
3. Shunichi, K., Tojiro, A., and Ichiro, I., "Development of a Robot-Polishing System (Polishing Force Control by Means of Fuzzy Set Theory)," JSME Journal Series C, Vol. 57, No. 543, pp. 3714~3719, 1991.
4. S. J. Go, M. C. Lee, "Development of a Controller for Polishing Robot Attached to Machining Center and Its Performance Evaluation," Proc. of '98 KACC International Session Papers, pp. 346-351, 1998.
5. Min Cheol Lee, Seok Jo Go, Jin Young Jung, and Man Hyung Lee, "Development of a User-friendly Polishing Robot System," Proc. of IROS(international conference on intelligent robots and systems) 99, pp. 1914 - 1919, 1999.
6. H.D. Jeong "A Study on The Planarization of Device Wafer Using Abrasive Machining," Doctor Thesis of Univ of Tokyo, pp. 50~54, 1994.
7. 이두찬, 정해도, 안중환, Takashi Miyoshi, "자동금형다듬질의 최적조건설정 전문가시스템 개발," 한국정밀공학회지, 제14권, 제10호, pp. 58~67, 1997.
8. 황찬해, 정해도, "전해연삭을 이용한 금형의 다듬질 가공 특성," 한국정밀공학회지, 제17권, 제2호, pp. 89~96, 2000.
9. T. MIYOSHI and K.SAITO "Non-Contact Measurement of Ultra-Precision Diamond Turned Surface Roughness," Bull. of JSPE, Vol. 23, pp. 182~188, 1989.