

자동공구교환장치와 PC 용 프로그램을 이용한 지능형 연마 로봇시스템의 개발

안종석(전북대 대학원 정밀기계공학과), 유범상(전북대 기계공학부),
오영섭(전북대 대학원 정밀기계공학과)

The Development of Intelligent Polishing Robot Automation System of the Metal-Mold using Personal Computer Program and Automatic Tool Change System

J. S. An, B. S. Ryuh, Y. S. Oh
Division of Mechanical Engineering, Chonbuk National University

ABSTRACT

An intelligent polishing robot automation system is developed. Automatic Tool Change System(A.T.C.), Tool Posture Angle Control, and Robot Program for Polishing Application are developed and integrated into a robotic system that consists of a robot, pneumatic grinding tool, and grinding abrasives (papers and special films). A.T.C. is specifically designed to exchange whole grinding tool set for complete unmanned operation. Tool Posture Angle Control is developed to give a certain skew angle rather than right angle to tools on the surface for best finishing results. A.T.C. and Tool Posture Angle Control is controlled by a PC and the robot controller. Also, there have been some considerations on enhancing the performance of the system. Some elastic material is inserted between the grinding pad and the holder for better grinding contact. The robot path data is generated automatically from the NC data of previous machining process.

Key Words : A.T.C.(자동공구교환장치), Polishing Robot Automation System(연마 로봇 시스템), Die(금형),

1. 서론

제품 생산을 위해서 금형 가공은 필수적이다. 금형 가공 후 금형 표면의 거칠기 및 경면 형성을 위하여 연마 작업이 이루어지게 되는데⁽¹⁾, 연마 작업을 위한 자동화 연구는 다품종 소량 생산과 짧은 제품 수명의 중요성에 비해 아직까지 만족 할 만한 수준에 도달하지 못하고 있다. 이러한 관점에서 금형의 표면 거칠기와 정밀도를 유지하면서 작업 시간을 단축 할 수 있는 연마 자동화 기기에 대한 연구가 절실하다. 또한 금형 연마 자동화는 금형 연마 가공에 대한 지식의 체계화, 작업 환경 개선, 숙련공 부족 해소 등을 위해 필요하다.

최근 연마 자동화에 대한 연구는 일본, 독일 등을 중심으로 이루어지고 있으며, 이중 금형 가공용 NC(Numerical Control)에 별도 부착된 연마 장치에 의한 연마 방식^(2,3)과 연마 전용기에 의한 연마 방식⁽⁴⁾, 로봇을 이용한 연마 방식^(5,6,7,8)이 연구 되

어지고 있다.

금형 가공용 NC에 연마 장치를 부착하는 방법은 NC 데이터를 공동으로 사용 할 수 있으며 제품의 탈락·고정 시간을 단축 시키는 장점은 있으나 3축 머시닝센터와 연마장치를 동시에 조작 할 수 있는 제어를 필요로 하는 단점이 있다. 연마 전용기에 의한 방법은 빠른 작업을 할 수 있는 장점이 있으나, 접근성이 취약하고 복합 곡면인 자유 곡면에 적용되기 힘들며, 고가이며 범용으로 사용 할 수 없고, 수작업으로 Tool을 교체하는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위하여 고가의 A.T.C. (Automatic Tool Change System)를 부착하여 자동화를 꾀하고 있지만, 이것은 생산단가에 비해 업체의 부담을 증가시키는 요인으로 작용한다.

이에 비해 로봇에 의한 방법은 충분한 자유도의 부여로 인하여 연마 공구를 임의의 자유곡면과 연속적으로 법선 방향으로 유지할 수 있어, 작업 영역이 크며 민첩성과 접근성이 좋아 복잡한 자유 곡

면 연마에 적합하고 유연성이 뛰어나 범용 작업이 용이하다. 현재까지 개발된 로봇을 이용한 연마 자동화는 수작업으로 연마 패드를 교환하고 연마면과 연마패드의 접촉 각도를 한 방향으로만 고정한 물리적인 방법^(5,6)으로 진행하여 왔다.

이에 본 연구에서는 경면 연마를 위해 구축한 로봇 연마 자동화 시스템을 기반^(5,6)으로 완전 자동화를 위해 로봇의 연마 과정에서 Tool 의 교환 시 작업자가 직접 교환하던 기존의 방법을 배제하고 A.T.C.에 의한 자동 교환 시스템을 구현하였다. 모델링 데이터에서 연마 경로 데이터 생성까지의 일괄 처리와 로봇과 A.T.C.제어용 PC 프로그램을 개발하고, 연마패드와 연마면과의 각도를 최적화하는 제어기법을 적용하여 연마면의 품질향상에 연구의 초점을 맞추었다.

2. 전체 시스템 구성

2.1 연마 로봇 시스템 구성

본 연구의 연마 로봇 시스템은 로봇과, 로봇 제어기, Main PC, 그리고 A.T.C.로 구성된다. A.T.C.는 A.B.C.(Automatic bit changer)와 B.R.D.(Bit Rotation device)로 이루어진다.

본 시스템에서 로봇과 PC 에 데이터 전송을 위한 로봇 제어기(S3)가 매개체 역할을 수행하며, A.T.C. 제어를 위한 독립된 제어기(89C51 Kit)를 설치하고, 공간상의 임의의 점에 접근하는 로봇에는 실제 연마 작업이 가능하도록 A.B.C.를 로봇의 6 축에 설치하였다. 또한 원하는 공구를 선택할 수 있도록 B.R.D.를 공작물 테이블에 부착하였다. 전체 시스템 구성도가 Fig. 1에 나타나 있다.

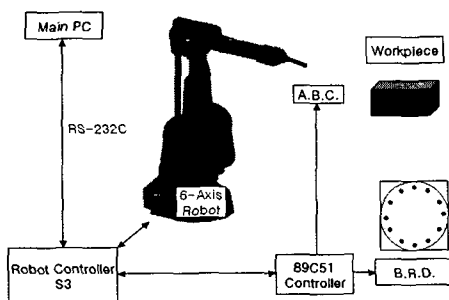


Fig. 1 A.T.C. and Robot System

연마에 사용되는 로봇은 지속적인 분력과, 분진, 손목 부위의 내구성 등이 문제가 되어, 본 연구에서는 ABB사의 IRB-2000 6축 수직다관절 로봇을 사용하였다. 본 로봇은 정밀도가 아주 높은 (DIN 1급)치차 감속기로 구성되어 있으며 오랜 동안 유사한 프로세스 가공분야에서 실적을 보이고 있는 로

봇⁽¹⁰⁾이다.

시스템 구성 중 A.T.C.는 궁극적인 무인자동화를 위한 장치이다. 이 장치는 연마를 수행하는 과정에서 작업자가 상주하여 적절한 연마패드를 수동으로 교체하기 위하여 작업을 일시 중단하는 과정을 배제하는 역할을 한다. 스펀들에 자체 개발한 A.B.C.를 부착하여 한 작업이 끝나면 원하는 연마 패드를 선택하여 다음 작업을 수행할 수 있도록 한다. 또한 공압으로 작동되어 그 제어가 용이하다. B.R.D.는 12 개의 연마패드를 장착할 수 있으며, 89C51 Kit로 제어된다.

상용화된 A.T.C.는 공구의 부피가 큰 M/C 계열에 적합하고 공구 (대개 회전 스펀들) 전체를 바꾸는 방식을 사용하고 있어 고가인 공구를 여러 개 가지고 있어야 하는 단점이 있으나 본 연구에서 개발한 방식은 공구 끝의 회전 비트만 교환하는 새로운 방식으로 개발되어 훨씬 경제적이다. 금형 연마에 사용되어지고 있는 연마기는 소형이며, 기어 방식이나 전자석 방식으로 A.T.C.를 구축하기에는 많은 비용이 들어간다. 본 연구에서는 개발된 A.T.C.는 스펀들을 감싸고 압축 공기를 사용하여 연마패드를 교체할 수 있도록 하였다.

Fig. 2는 A.B.C.의 설계도와 사진 그리고 B.R.D.를 보여준다.

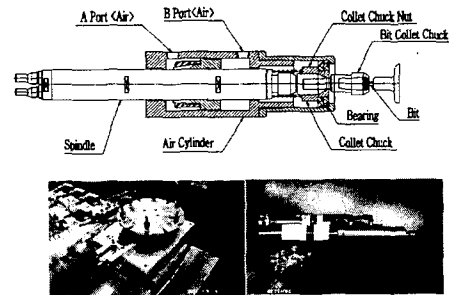


Fig. 2 Structure of A.B.C. and B.R.D

본 연구에서 사용되어지는 A.B.C.의 스펀들은 스펀들 방향의 컴플라이언스를 유지시킬 수 있도록 되어 있는데, 스펀들의 제원은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of the spindle

Maker	Type	Revolution	Max. torque	Max. watt	Length	Weight
Nakanishi	MST2302R	2000 rpm	20.6 kgf-cm	108W	160.1 mm	405g

로봇 제어기와 A.T.C.를 제어하는 주 PC는 펜티엄 II 333이며 주 PC는 CATIA에서 생성된 APT 소스 (Automatically Programmed Tool source)를 연마 데이터로 변환시키는 단계적인 프로그램과

로봇 구동을 위한 오프라인 프로그램으로 구성된 연마 프로그램을 구동한다. 이 연마 프로그램은 Visual C++ 6.0 환경에서 개발되었다. Fig. 3 은 연마 프로그램의 전체 프레임과 생성된 연마 데이터를 OpenGL 에 의해 나타내고 있으며 Fig. 4 는 연마 프로그램의 플로우 차트를 보여주고 있다.

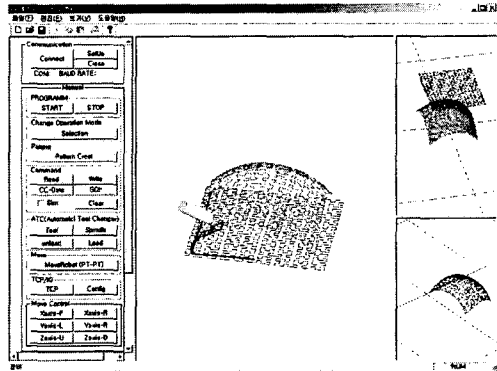


Fig.3 Screen of polishing program

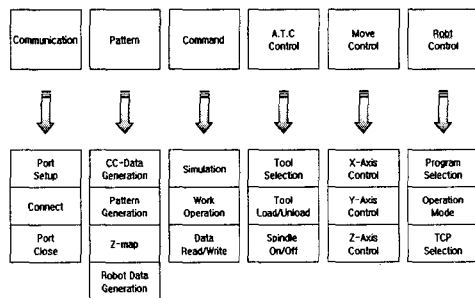


Fig. 4 Menu Configuration of operating program

다음으로 연마 로봇이 실제 연마 작업을 수행할 수 있도록 하는 모델링 데이터, 연마 패턴, 연마 경로 데이터, 로봇 제어 데이터, 연마데이터의 생성에 대해서 언급한다.

2.2 연마 데이터 생성

기하학적 모델링이 주 기능인 소프트웨어를 CAD 시스템⁽¹⁴⁾이라 하는데, 현재 활발히 사용되는 상업용 CAD 시스템은 수 십여 종 이상이며, 이러한 CAD 시스템은 수학적 이론, 특히 기하학적 이론과 알고리즘이 잘 구비되어 사용자가 간단한 도형에서부터 자동차 차체, 항공기 등의 복잡한 도형에 이르기까지 비교적 쉽게 모델을 만들 수 있는 기능을 제공하고 있다^(11,12). 모델링 데이터 획득은 다음 절에서 언급한다.

2.2.1 모델링 데이터 획득

본 연구에서 사용되어진 CAD 시스템은 CATIA V4 로 금형 연마를 위하여 CATIA 의 NC 프로그래밍에 사용되는 APT 소스를 이용하였다. APT 소스는 연마 프로그램을 통해 CC 데이터로 변환되고, 변환된 CC 데이터의 각 점은 3 개의 위치 데이터 (X,Y,Z) 와 3 개의 방위 데이터 (α, β, γ) 로 구성되어 있다⁽¹²⁾.

2.2.2 연마 경로 생성

3 차원 곡면 위에서의 연마 패턴은 평면, 측면, 경사면은 물론 구면, 원통면, 자유곡면 등 모든 면에서 패턴을 생성할 수 있는 알고리즘이어야 하고 또 새로운 연마 패턴의 개발도 필요하다. 파상도를 증가시키는 일정한 방향성을 가지는 연마 패턴보다는 임의의 방향과 불규칙한 방향의 연마 패턴 생성이 중요하다. 또한 연마면에 연마 패턴이 나타나지 않도록 일정 패턴으로 연마작업을 하여야 한다. Fig. 5 는 일반적으로 사용되는 연마 패턴이다. 본 연구에서 사용한 지그재그 패턴과, 페아노 패턴은 Fig. 6 에 나타낸다.

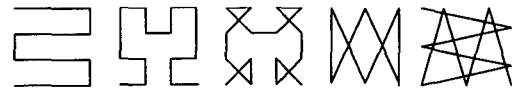


Fig. 5 Reciprocating, Peano, Zigzag paths

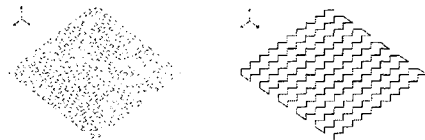


Fig. 6 Peano, Zigzag pattern for polishing work

2.2.3 연마 경로 데이터 생성

본 연구에서는 연마경로를 획득하기 위해서 CC 데이터를 패턴과 Z-map 하여 사용하였다. Z-map 은 형상의 기울기가 큰 부분(형상의 법선 벡터가 xy 평면과 거의 평행한 경우)은 형상 표현의 정확도에 문제가 있지만 간단한 데이터 구조에 의해 이해가 쉽고 조작하는 속도가 매우 빠르며, 경사가 급한 측벽을 제외하고는 그 데이터의 정도가 믿을 만하기 때문에 본 연구에 적용 시켰다. 다량의 CC 데이터를 패턴 평면에 투영시키고 패턴 데이터에 근사하는 데이터를 덧입혀 생성하였다⁽⁶⁾. Fig. 7 은 패턴에 CC 데이터를 투영하여 연마 경로 데이터를 생성한 화면이다.

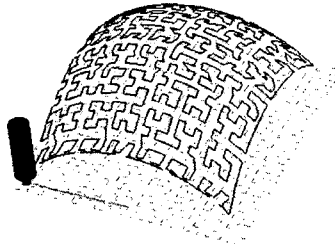


Fig. 7 Pass of polishing surface

2.2.4 이동 경로에 대한 normal vector 회전

본 연구에서 공구의 위치 값은 연마 경로의 한 점의 normal vector 와 일치한다(Fig. 8). 그러나 연마 작업에서 연마패드의 중심은 회전이 발생하지 않아 실제 연마작업이 없이 다만 미끄럼 운동만 발생하고 또한 패드의 바깥쪽 부분에서도 스펀들이 가해지는 가압력을 받지 못하여 연마가 일어나지 않는 것은 자명하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 선행 연구^(5,6)는 공구를 금형면과 일정각도 물리적으로 기울여 연마를 시도하였지만, 본 연구에서는 normal vector 를 이동 경로에 대하여 15° 기울여 제어하는 방법을 사용하였다(Fig. 9).

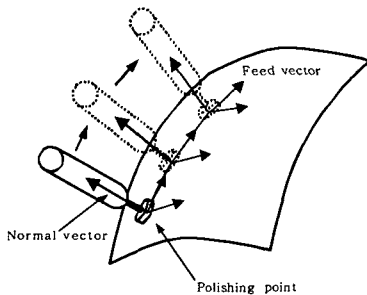


Fig. 8 Relation between normal vector and polishing tool

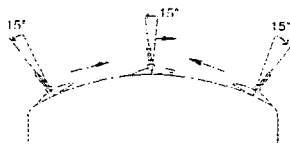


Fig. 9 Tool position for progressing direction

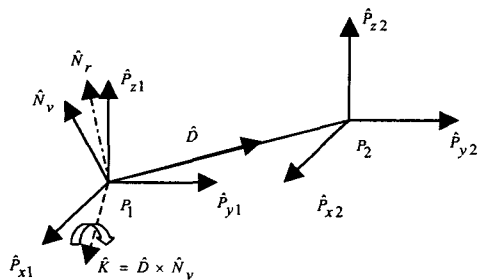


Fig. 10 Normal vector rotation

공구의 자세의 이동경로에 대한 회전은 Fig. 10에서처럼 이동 경로의 한점(P_1)에서 다음 점(P_2)으로 단위벡터(\hat{D})를 취하고, \hat{D} 와 P_1 의 normal vector(\hat{N}_v)에 의해 생성된 평면에 수직인 임의의 축(\hat{K})을 생성 시킨다. \hat{K} 을 회전축으로 설정하여 P_1 의 normal vector \hat{N}_v 를 회전값(θ)만큼 회전시켜 \hat{N}_r 을 구한다.

- \hat{N}_v : 한 점에서의 normal vector
- \hat{D} : P_1 과 P_2 사이의 unit vector
- \hat{K} : \hat{D} 과 \hat{N}_v 사이의 벡터적

임의의 축에 대한 회전 행렬은 다음과 같다⁽¹³⁾.

$$R_k = \begin{bmatrix} k_x k_x v\theta + c\theta & k_x k_y v\theta - k_z s\theta & k_x k_z v\theta + k_y s\theta \\ k_x k_y v\theta + k_z s\theta & k_y k_y v\theta + c\theta & k_y k_z v\theta - k_x s\theta \\ k_x k_z v\theta - k_y s\theta & k_y k_z v\theta - k_x s\theta & k_z k_z v\theta + c\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

이때 $c\theta = \cos \theta$, $s\theta = \sin \theta$, $v\theta = 1 - \cos \theta$, $\hat{K} = [k_x, k_y, k_z]$ 이다.

$$\hat{N}_r = R_k \times \hat{N}_v \quad (2)$$

2.2.5 로봇의 방위와 위치 데이터 생성

위에서 이동 경로에 대한 normal vector 회전으로 최종 연마 경로 데이터를 생성하였다. 이렇게 생성된 데이터에 의해 공간상의 한 점으로 로봇이 접근하기 위해서는 위치 데이터와 방위 데이터로 구성된 로봇 제어 데이터를 로봇에 전송을 해주어야만 한다. 위치 데이터는 모든 로봇 제어가 비슷한 형식을 쓰고 있지만, 방위 데이터는 로봇을 제작하는 회사마다 다른 방식을 취하고 있어 로봇이 요구하는 형태로 전송 되어져야 한다. 본 연구에 사용되어진 로봇의 방위는 쿼터니언^(14,15)으로 표현된다. 쿼터니언은 공간상의 한 점의 방향 정보를 표현하기 위하여 일반적으로 사용하는 3x3 행렬의 방위 정보 대신 4개의 요소 값으로 전환한 파라미터로 구성된다^(14,15).

PC를 통해 로봇 제어기에 전송되어지는 것은 로봇에 부착된 공구 중심 작업단(TCP : Tool Center Pointer)의 위치값과 방위를 나타내는 쿼터니언 값이다. Fig. 10은 로봇에 부착된 TCP의 좌표계와 공작물 좌표계를 도식화 하였다.

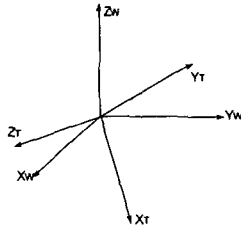


Fig. 11 Coordinate systems of robot and workpiece

Fig. 11 에서 로봇 접근점의 회전 행렬이 식(3) 과 같이 주어졌을 때

$$\begin{aligned}
 {}^W_T R &= \begin{bmatrix} W X_T & W Y_T & W Z_T \\ X_T \cdot X_W & Y_T \cdot X_W & Z_T \cdot X_W \\ X_T \cdot Y_W & Y_T \cdot Y_W & Z_T \cdot Y_W \\ X_T \cdot Z_W & Y_T \cdot Z_W & Z_T \cdot Z_W \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)의 값을 식(4)를 이용하여 쿼터니언 값으로 변환할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= \frac{1}{2} \sqrt{1+r_{11}+r_{22}+r_{33}} \\
 Q_2 &= \frac{r_{32}-r_{23}}{4Q_1} \\
 Q_3 &= \frac{r_{13}-r_{31}}{4Q_1} \\
 Q_4 &= \frac{r_{21}-r_{12}}{4Q_1} \\
 Q_1^2+Q_2^2+Q_3^2+Q_4^2 &= 1
 \end{aligned} \quad (4)$$

식(5)처럼 쿼터니언의 모든 값의 제곱의 합은 1 이어야 하며, 또한 Q_1 은 0 이어서는 안 된다.

2.2.6 연마 데이터 생성

모델링 데이터에서 연마 경로 데이터까지 모든 작업이 끝나면 연마 프로그램의 명령어 창에서 작업할 공구의 번호와 연마 경로 데이터를 지정하여 로봇을 제어할 연마 데이터를 생성한다.

3 장은 상기에서 언급한 내용을 종합하여 실제 적용 사례를 보여준다.

3 실제 적용

본 연구에서 사용되어진 금형은 범용으로 사용되는 SM45C(KS)재질을 사용하였다. Fig. 12 는 최종 금형면의 사진을 보여준다. 100mm × 100mm 단순 곡면과 200mm × 100mm 복합 곡면을 위해 직경 10mm 의 볼엔드밀에 1mm 의 feed 폭으로 금형을 제작하였다. Fig. 12 는 실제 제작한 금형의 모습이다.

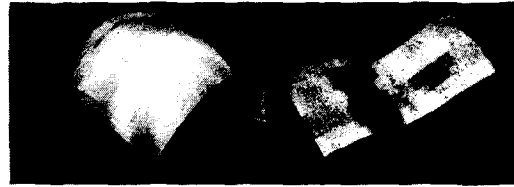


Fig. 12 Metal-mold (1), (2)

Fig. 13 은 본 연구에 사용되어진 연마 경로 데이터를 나타내고있다.



Fig. 13 Pass of polishing surface (1), (2)

Table 2, 3 은 연마에 적용된 세부 사항이다. 또한 스펀들은 3~5kg/cm² 에서 약 2000rpm 으로 정속도 운동을 한다. 연마 작업에서 스펀들에 입력되는 압력은 약 2.5~3kg/cm² 으로 설정하였고, 킵플라이언스 유지기구의 압력으로는 약 1.5~2kg/cm² 으로 세팅하여 실험 1 과 실험 2 를 수행하였다.

B.R.D. 에 6 개의 연마 공구를 장착하여 로봇이 한 작업을 수행한 후 연마 패드를 교체하여 다음 작업을 수행하도록 하였다.

Table 2 Polishing work (1)

Order	Pattern	Time(min)	Work	Mesh
1	Peano(4th)	22	Remove Cusps	120
2	Zigzag	20	Remove remaining Cusps	200
3	Peano (5th)	25	Finish Trace	800
4	Zigzag	30	1st Polishing	1000
5	Peano (6th)	40	2nd Polishing	3000

Table 3 Polishing work (2)

Order	Pattern	Time(min)	Work	Mesh
1	Zigzag	30	Remove Cusps	120
2	Peano (5th)	30	Remove remaining Cusps	200
3	Zigzag	30	Finish 1st Trace	400
4	Peano (5th)	35	Finish 2nd Trace	800
5	Zigzag	40	1st Polishing	1000
6	Peano (6th)	50	2nd Polishing	3000

실제 연마 작업에서는 공구와 금형과의 접촉면을 증가시키기 위해서 연마 사포와 연마 패드 사이에 탄성체를 부착하여 연마를 실시하였다. 이 탄성체의 역할로 인하여 공구는 금형을 감싸며 연마를 한다. Fig. 14 는 연마패드에 탄성체를 부착한 모습이다

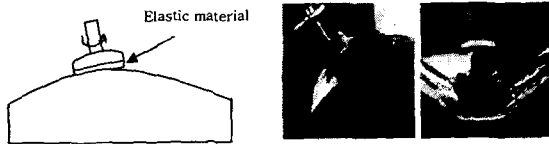


Fig. 14 Tool with elastic material(Left) and figure(right)

Fig. 15 는 최종 경면 가공을 한 후 찍은 금형의 모습이다

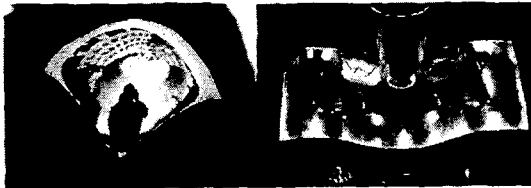


Fig. 15 The final surface

4. 결론

실제 적용사례에서 알 수 있듯이 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

첫째, 임의의 금형 모델링 데이터를 통하여 복합 곡면의 연마 작업이 충분히 가능한 연마 데이터를 생성할 수 있다.

둘째, 탄성체를 부착한 연마패드에 의하여 볼록 곡면 및 오목 곡면이 결합된 복합곡면에 연마 작업이 가능함을 보였다.

셋째, 연마패드가 연마 경로에 따른 기울기 값을 갖도록 하여 연마면에 수직 방향으로 연마를 실시할 때보다 좋은 연마특성을 보였다.

넷째, A.T.C.의 개발로 작업자가 배제된 연마 시스템을 구성하여 완전 자동화의 가능성을 보여주었다.

본 연구를 통하여 상기와 같은 연구 결과를 얻었지만 아직도 로봇을 이용한 연마면 평가에 대한 Data Base 가 부족하여 그 평가 방법에 대해서는 많은 연구가 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. 박종오, "금형연마 로봇 시스템", 대학기계학회지, 제 31 권 제 8 호, pp.728-735, 1991
2. 박균명, 장진희, 한창수, "경면 다듬질을 위한 자동화 장치 개발", 한국정밀공학회 94 년도 추계 학술대회 논문집, pp. 389-394, 1994
3. 하덕주, "머시닝센터 장착형 곡면금형 연마용 로봇 시스템 개발에 관한 연구", 한국자동제어학술회의 논문집 제 2 권 pp. 1312-131, 1996
4. 박균명, 장진희, 한창수, "자동 경면 다듬질 장치의 실험적 분석에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제 12 권 제 9 호, pp. 30-39, 1995. 9.
5. 유범상, 오영섭, "수치제어 데이터와 오프라인 프로그램을 이용한 연마 로봇 시스템 개발", 한국정밀공학회지, 제 16 권 제 3 호, pp. 9-17, 1999.3
6. 이승훈, 유범상, "모델링 데이터를 이용한 금형 연마 자동화 시스템", 한국정밀공학회, 99 년도 추계학술대회 논문집, pp. 773-776
7. Dong-Fang Ge, Yoshini Takeuchi and Naoki Asakawa, "Automation of polishing work by an industrial robot(3rd Report, 6-axis control polishing with L-type rotational tool)," Transactions of the JSME, Vol.60, No. 571, pp. 1084-1089, 1994
8. Naoki Asakawa and Yoshini Takeuchi, "Automation of polishing work by an industrial robot(4th Report, Polishing with reference to surface roughness)," Transactions of the JSME, Vol. 61, No. 584, pp. 1715-1719, 1995
9. 강성철, 김문상, 이교일, "금형 연마작업을 위한 로봇 오프라인 시스템의 개발 및 적용", 한국정밀공학회지, 제 14 권 제 1 호, pp.69-77, 1997. 1
10. Product manual IRB 2000, ABB Robotics
11. 이철수, "CAD.CAM 형상 모델링에서 NC 가공까지", pp.52-155, 1997
12. Numerical Control Fixed Axis Milling, IBM CATIA TRAINING CENTER, Version 4Release 1.6 April, 1996.
13. 강철구, 권인소, 윤중선, 정완균, "로봇 동역학과 제어", pp.48-50, 1994
14. Kotelnikov, V., "Screw Calculus and Some Applications to Geometry and Mechanics", Annals of the Imperial University of Kazan, 1895.
15. McAulay, A., Octonions a Development of Clifford's Biquaternion, Cambridge University Press Cambridge, England, Vol. 39, pp. 526-532, 1898.