

이 논문은 전북대학교 자동차 신기술 연구소의 지원(연구과제 9606B)에 의하여 연구되었음.

수치제어 데이터와 오프라인 프로그램을 이용한 연마 로봇 시스템 개발

오영섭*, 유범상**

The Development of Grinding Robot System Using NC data and Off-line Programming

Young Sup Oh*, Beom Sahng Ryuh**

ABSTRACT

This paper presents a method of grinding and polishing automation of precision die after CNC machining. The method employs a robot system equipped with a pneumatic spindle and a special abrasive film pad. The robot program is automatically generated off-line program from a PC and downloaded to robot controller. Position and orientation data for the program is supplied from cutter contact (CC) data of NC machining process. This eliminates separate robot teaching process. This paper aims at practical automation of die finishing process which is very time consuming and suffering from shortage of workpeople. Time loss due to changeover from one product to another is eliminated by PC off-line programming exploiting appropriate NC machining data. Dextrous 6-axis robot with rigid wrist and simple tooling enables the process applicable to larger, rather complex 3 dimensional free surfaces.

Key Words : Die (금형), Polishing (광택), Grinding (연마), Robot Automation (로봇 자동화), NC Data (NC 데이터), Off-line Programming (오프라인 프로그래밍)

1. 서론

금형 연마는 절삭가공 후의 공정으로 정밀도를 유지하며 품질의 척도인 조도(Roughness)와 파상도(Waviness)를 줄이는 작업인데 연마 패턴의 생성과 제어기술이 핵심이 된다⁽¹⁾. 연마 작업에는 수작업이나 여러 방법에 의한 자동화가 사용된다. 수작업은 단순 반복 작업으로 인력이 줄어 문제가 되고 있

는데, 객관적 작업 기준이 모호하고 연속성에도 한계가 있다. 또한 전 공정 시간의 30-40%가 소요된다 는 문제를 안고 있다⁽²⁾.

금형 연마의 자동화에는 연마용 NC 전용기에 의한 방법, 금형 절삭 가공기에 특별 장치를 부착하여 연마까지 해결하는 방법, 또는 수직 다관절형 로봇

* 전북대학교 대학원 정밀기계공학과

** 전북대학교 기계공학부, 전북대학교 자동차신기술연구소

에 의한 방법 등이 보고되고 있다. NC 전용기에 의한 방법은 고능률이나 특정한 범위 내의 제품에 한정이 되고 고가이며 유연성이 적다는 특징을 가지고 있다. 금형 절삭 가공기로 겸용하는 방법은 NC 데이터를 공동 사용할 수 있고 가공물 탈착, 고정 시간을 단축시키는 등 여러 장점이 있으나⁽³⁾ 장시간의 연마 작업에 기계가 묶여 다른 절삭 작업을 할 수 없는 문제가 있다. 수직 다관절형 로봇에 의한 방법은 큰 작업 영역과 민첩성을 이용할 수 있어 복잡한 자유 곡면 연마에 적합하고 가격 경쟁력이 있으며 유연성이 높다. 그러나 기구적으로 약한 경우(특히 손목 부위)가 있으므로 내구성이 충분한 사양의 로봇을 선택하여야 하고 필요하면 반력을 적절하게 처리하는 컴플라이언스(Compliance) 기능을 위한 공구 시스템 설계가 필요하다. 또, 대부분의 경우 교시반(Teach Pendant)에 의한 별도의 로봇 프로그래밍 작업을 필요로 한다. 금형 연마 작업은 3차원적으로 복잡하고 위치 반복의 정밀도를 필요로 하는데 교시반에 의한 프로그래밍은 이를 만족시키기가 힘들고 장시간이 소요된다는 단점이 있다.

현재까지 이루어진 연구를 보면, 경면 다듬질 장치를 개발하여 CNC에 부착하고 NC 경로를 사용하여 연마한 방법이 발표되었는데⁽³⁾⁽⁴⁾ NC 전용기의 기구적 제약과 연마 작업 동안 다른 절삭 작업을 수행할 수 없는 일이 생길 수 있다. 선행 공정에서의 CAD 데이터를 사용하여 오프라인 프로그램을 생성시키는 방법이 발표되었는데⁽⁵⁾⁽⁶⁾ 자체 모델러의 작업이 NC 데이터 생성 과정의 모델링 작업과 중복되어 시간과 노력이 낭비될 수 있을 것으로 생각되고 또 두 모델러가 다른 방식을 취하고 있다면 형상의 차이가 발생할 수 있을 것으로 보인다. 선행 절삭 공정에서의 CL(Cutter Location) 데이터를 이용한 오프라인 로봇 프로그래밍 기법도 보고되었는데⁽⁷⁾ CL 데이터는 공구 중심점 길이만큼 금형면과 오프셋(Offset)되어 있고 5축 가공인 경우 리미트 앵글(Limit Angle) 등의 기계적 제한 조건을 고려한 방향 데이터가 만들어져 연마면의 위치를 정확하게 찾을 수 없다. 그러므로 연마 위치와 방위에서 오차 발생의 소지가 있는 것으로 보인다. 로봇의 6축 끝에 별도의 다관절 연마 기구를 개발 부착한 시스템을 제안한 논문도 발표되었는데⁽¹⁾ 6축 로봇은 민첩성과 접근성면에서 자유 곡면 위에서의 복잡한 패턴의 연

마 작업을 충분히 수행할 수 있어 다관절 연마 기구가 필요 없다고 생각된다.

본 논문에서는 새로이 다음과 같은 로봇 금형 연마 자동화 시스템을 개발하였다. 절삭 작업 이후의 금형 연마 작업을 위하여 일일이 로봇 프로그래밍 작업을 한다면 상당한 시간이 소요되어 다품종 소량생산이나 단품 생산의 특성을 가진 금형 제작에서 자동화의 타당성을 떨어뜨린다는 점에 착안, 절삭 작업의 데이터로 로봇 연마 데이터를 자동으로 생성시키는 PC용 저가형 오프라인 프로그래밍 시스템을 개발하여 교시반 등에 의한 로봇 프로그래밍 단계를 제거하였다. 이를 위하여 첫째, NC 코드 생성의 중간 단계에서 언어지는 CC(Cutter Contact) 데이터를 이용한다. 이는 금형 모델링 데이터나 CL 데이터에서 로봇 데이터를 구하는데 소요되는 시간과 노력을 최소화할 수 있다. 둘째, 오프라인 프로그램은 CC 데이터를 이용하여 PC에서 연마 경로를 생성하고 로봇을 제어하기 위한 위치와 방위 데이터를 만들어 로봇에 전송하여 로봇의 가동률을 최대로 보장한다. 또한, 본 시스템은 하드웨어적으로 최소의 기구만을 장착하고 로봇 자체의 기능을 최대한 살릴 수 있도록 하며, 실용화를 위하여 비교적 저가이고 경량이며 신뢰성이 높은 저회전 공압 스펀들을 중심으로 공구 시스템을 구성하였다. 전술한 바와 같이 로봇은 자체가 6축으로 구성되어 충분한 민첩성과 접근성을 가짐으로 공구 시스템은 복잡한 관절기구가 불필요하다. 본 연구에서 개발한 공구 시스템은 금형면과 법선 한 방향의 컴플라이언스를 가지며 일정한 접촉력을 가지도록 공압 시스템으로 작동된다.

2. 금형 연마를 위한 로봇 제어 데이터의 생성

금형의 연마 공정은 절삭 가공이 완료된 후의 마무리 공정으로, 본 연구에서는 PC와 로봇 제어기 사이의 오프라인 프로그램 시스템을 구축하고, 절삭 가공 데이터를 로봇 데이터로 변환하여 로봇에서의 별도 프로그래밍 과정 없이 변환된 로봇 데이터를 전송하여 금형 연마를 수행하도록 하는 데에 연구의 초점을 맞추었다. 본 절에서는 절삭 가공 과정에서 데이터가 생성되는 과정과 이를 변환시켜 로봇 제어에 사용하도록 하는 과정을 알아본다.

2-1 절삭 가공 데이터의 흐름

금형 제작은 제품의 형상 모델링에서 시작된다. 형상 모델링 데이터를 기본으로 가공 방향과 특성, 경로 간격을 고려한 가공 평면을 설정하여 CC점을 구한다. CC점에서 공구의 종류와 크기, 공구와 공구 홀더의 간섭과 충돌 등을 고려하여 실제 가공 경로인 CL점을 구한다. 공작물 재질, 절삭속도를 고려하여 CL점에서 NC 코드를 작성하고 시뮬레이션 검증을 거쳐 NC 코드를 보완한다. 모든 선행 작업이 완료된 후 실질적인 절삭 가공이 이루어진다.

CC 데이터는 실제 금형의 형상을 정확하게 나타내고 있는데 Table 3에서 보여주는 것처럼 가공 표면에서의 공구의 접촉 위치와 표면의 법선 방향 벡터를 포함한다. 그러므로 CC 데이터에서 로봇 데이터를 구하는 방법은 CL 데이터나 CAD 데이터에서 로봇 데이터를 구하는 것보다 시간과 노력면에서 유리하다. 본 논문에서는 절삭가공(금형 가공의 경우, NC 밀링) 단계에서 직접 뽑아낸 CC 데이터를 이용하여 로봇 데이터를 생성하는 방법을 사용하였다. 그러나 절삭 가공이 별도의 장소에서 행하여지는 등으로 인하여 CC 데이터를 직접 구할 수 없는 경우에는 모델링 데이터로부터 CC 데이터를 만들어야 한다. 이러한 과정이 다음절에서 설명된다.

2-2 CATIA를 이용한 CC 데이터 도출

CATIA는 많이 쓰이는 3차원 모델러의 하나로 형상 모델링을 수행한 후에 NC 데이터를 만들 수 있도록 되어 있다. CC 데이터는 그 중간 과정에서 과도적으로 만들어지는 내부 데이터로 명확하게 나타나지는 않으나 다음과 같은 조작을 통하여 얻을 수 있다.

CATIA에서 IGES (Initial Graphics Exchange Specifications) 형식의 모델링 데이터를 읽어들이 정해진 절차를 수행하면 텍스트 파일인 APT 소스를 구할 수 있다. APT 소스의 머리부는 모델이름, NC SET 이름, OPERATION의 번호로 구성되어 있다. 각 OPERATION은 NC 가공기(3·5축)의 정의, 사용할 공구의 정의, 공구 초기 위치, 가공 종류에 의한 가공 여유와 가공 방법을 정의한다. 가공 방법은 커스프(Cusp)의 높이, 픽피드 간격, 총 경로수 중 한 방법을 이용하여 지정한다. APT 소스로부터 CC 데이터를 구하려면 다음과 같은 조작이 필요하다.

공구방향이 곡면에 항상 법선적으로 거동하도록 5축 가공기의 경우 리미트 앵글값을 제한하지 않는다. 그리고 아래의 두 가지 방법중 하나를 사용한다. 첫 번째는 공구 직경에 의한 옵셋량을 로봇의 위치 정밀도나 반복 정밀도보다 충분히 작게 입력한다. 본 연구에서는 0.001 mm를 이용하였다. 두 번째는 정상적인 공구 사양을 입력하여 APT 소스를 만들고 법선 방향으로 공구 반경 크기만큼을 이송시켜 CC 데이터를 구하는 것이다. 이런 절차를 거쳐 얻은 APT 소스는 CC 데이터로 활용이 가능하다. 더 자세한 내용은 CATIA 매뉴얼⁽⁸⁾을 참고하면 된다.

2-3 연마 경로 생성

내용CC 데이터는 연마면 위의 각 점의 위치와 방위 데이터를 가지고 있고 로봇은 절삭 경로와 다른 적정한 패턴을 따라 연마 작업을 수행한다. 3차원 곡면의 연마 패턴은 평면, 측면, 경사면 위에서의 구면, 원통면, 자유곡면 등에서 자유로 패턴을 생성할 수 있는 알고리즘이어야 한다⁽⁵⁾. 연마 패턴이 일정한 방향성만 가지면 파상도가 증가하므로 다방향의 연마 패턴이 필요하다⁽⁹⁾. 또한 연마면에 패턴에 의한 자국이 나타나지 않도록 잘 조합된 연마 패턴이 필요하다.

Fig. 1은 일반적으로 사용되는 연마 패턴이다. Fig. 2의 리사쥬 패턴은 직각 2방향의 조화 운동을 합성하여 만들어지고 에피트로코이드는 연마면 내부에서 연속 연마 패턴을 생성할 경우에 고려할 수 있으며 텔봇은 각진 부분이 있어 모서리 부위의 연마에 적합하다.

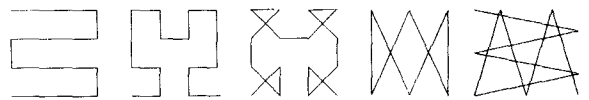


Fig. 1 Reciprocating, Peano, Zigzag paths

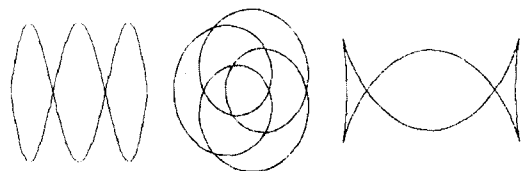


Fig. 2 Lissajous, epitrochoid, talbot

리사주, 에피트로코이드, 텔롯의 곡면식은 각각 다음과 같다.

$$x = A \sin nt, \quad y = B \sin(mt - \varphi) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} x &= (a + b) \cos(t) - c \cos((a/b + 1)t) \\ y &= (a + b) \sin(t) - c \sin((a/b + 1)t) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} x &= (a^2 + f^2 \sin^2(t)) \cos(t) / a \\ y &= (a^2 - 2f^2 + f^2 \sin^2(t)) \sin(t) / b \end{aligned} \quad (3)$$

각 식에서 상수 $n, m, \varphi, a, b, c, f$ 를 조절하여 다양한 모양의 패턴을 생성할 수 있다. Fig. 2의 에피트로코이드 패턴의 모양은 $a=3, b=1, c=7$ 일 때이고 텔롯의 패턴 모양은 $a=1.1, b=0.566, f=1$ 일 때이다. 연마 패턴에 대한 연구는 계속해서 이루어져야 하고 지속적인 발전이 있을 것으로 예상된다⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾.

다음에는 CC 데이터를 연마 패턴에 따라 배열하여 실제 로봇의 연마 경로 데이터를 만들어 주고 이를 로봇의 제어기가 요구하는 형식으로 바꾸어 주는 작업이 필요하다.

2-4 로봇의 위치와 방위 데이터 생성

로봇에 전송할 데이터는 위치와 방위로 구성된다. 위치 데이터는 로봇 제어기의 기중에 따라 비슷하거나 동일하여 문제되지 않으나 방위 데이터는 로봇 제조사마다 다른 형태를 취할 수 있어 요구하는 형태로 공급되어야 한다. 본 연구에서는 로봇의 방위를 표현하는 방법으로 쿼터니언(Quaternion)을 사용한다. 쿼터니언은 공간 기구학의 한 방법론으로 대두되었는데 Kotelnikov⁽¹²⁾나 McAulay⁽¹³⁾등에 의하여 연구되었다. 쿼터니언은 일반적으로 3×3 행렬로 표시되는 공간 상의 방위 정보를 4개의 요소값으로 간단히 표현한다. 즉, 다음과 같은 회전 행렬이 주어졌을 때

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

쿼터니언은 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} Q_1 &= \frac{1}{2} \sqrt{1 + r_{11} + r_{22} + r_{33}} \\ Q_2 &= \frac{r_{32} - r_{23}}{4Q_1} \end{aligned} \quad (5)$$

$$Q_3 = \frac{r_{13} - r_{31}}{4Q_1} \quad (5)$$

$$Q_4 = \frac{r_{21} - r_{12}}{4Q_1}$$

이제, 공작물 좌표계와 로봇의 공구 좌표계의 상대 위치를 3×3 의 회전 행렬로 구한 후 로봇의 방위 쿼터니언을 구해본다.

2-4-1 공작물 좌표계와 공구 좌표계사이의 관계

로봇 방위 쿼터니언은 회전 행렬로 나타난 공작물 좌표계와 공구 좌표계의 관계로부터 구할 수 있다. 회전 행렬을 구하기 위하여 로봇과 공작물 사이의 상대적 위치를 나타내면 Fig. 3과 같다. 공작물 좌표계는 W 첨자로 공구 좌표계는 T 첨자로 나타낸다. Fig. 4는 Fig. 3에서 공구의 좌표계와 공작물의 좌표계만을 떼어 다시 그린 것이다. 공작물 좌표계는 금형에 붙어 연마 위치를 지정하는 기준이 되고 공구 좌표계는 연마를 담당하는 공구의

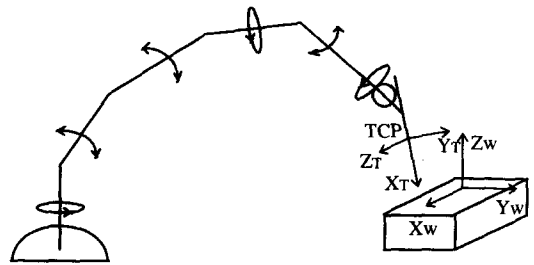


Fig. 3 Relation between coordinate systems of robot and workpiece

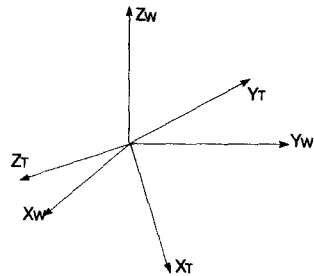


Fig. 4 Coordinate systems of robot and workpiece

작업단에 원점을 붙이고 공구 실린더 방향을 X_T 축으로 설정한 좌표계이다. 주어진 각각의 연마 경로에서 공작물 좌표계 값으로 표현된 법선벡터를 로봇의 공구 좌표축 X_T 로 놓는다. Y_T 는 Z_W 방향에서 볼 때 Y_W 축과 일치하도록 놓으면 X_W 성분이 0이 된다.

$$\begin{aligned} X_T &= -a\hat{i} - b\hat{j} - c\hat{k} \\ Y_T &= \hat{l}j + m\hat{k} \end{aligned} \quad (6)$$

여기에서 $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$ 는 공작물 좌표계 X_W, Y_W, Z_W 축 방향의 단위벡터이다. a, b, c 는 CC 데이터의 법선벡터 요소이다. Y_T 축의 양(+)방향이 언제나 Y_W 축의 양(+)방향을 향하도록 하여 공구 움직임이 항상 곡면의 위쪽에서 작업하도록 $l \geq 0$ 라는 제한조건을 주면 아래의 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} c \leq 0 \text{이면} & & c > 0 \text{이면} \\ l &= -\frac{c}{\sqrt{b^2 + c^2}} & l &= \frac{c}{\sqrt{b^2 + c^2}} \\ m &= \frac{b}{\sqrt{b^2 + c^2}} & m &= -\frac{b}{\sqrt{b^2 + c^2}} \end{aligned} \quad (7)$$

c 는 \hat{k} 성분 값인데, $c > 0$ 인 경우는 공구 끝이 아래쪽을 향한다는 의미이고, $c \leq 0$ 는 공구 끝이 위쪽을 향하여 오버행(Overhang : 3축 NC 절삭에서 안쪽으로 오목한 가공할 수 없는 부분)부분을 연마한다는 의미이다.

이제 공구 좌표계의 두 축을 알고 있으므로 다른 축 Z_T 는 다른 두 축의 외적으로부터 구해진다.

$$Z_T = (cl - bm)\hat{i} + am\hat{j} - al\hat{k} \quad (8)$$

이상의 결과를 이용하여 다음과 같이 로봇 방위 쿼터니안을 구할 수 있다.

2-4-2 로봇 방위 쿼터니안의 생성

두 좌표계의 회전 행렬은 공작물 좌표계를 기준으로 한 공구 좌표계의 행렬을 나타낸다. 회전 행렬의 각각의 원소는 각 좌표축의 방향 교차인값을 나타낸다⁽¹⁴⁾. 공작물 좌표값은 CC 데이터를 사용하고 각 CC 데이터점에 대한 공작물 좌표값은 앞절에

서 구한 식(6), (7), (8)을 사용하여 구할 수 있다. 회전행렬은 다음과 같다.

$${}^W R = \begin{bmatrix} X_T \cdot X_W & Y_T \cdot X_W & Z_T \cdot X_W \\ X_T \cdot Y_W & Y_T \cdot Y_W & Z_T \cdot Y_W \\ X_T \cdot Z_W & Y_T \cdot Z_W & Z_T \cdot Z_W \end{bmatrix} \quad (9)$$

식(9)의 회전 행렬 ${}^W R$ 는 식(4)과 같은 형태이므로 식(5)를 통해 쿼터니안을 구하면 다음과 같다.

단 모든 데이터의 공구끝이 아래를 향하고 있으므로 $c > 0$ 의 제한조건을 둔다.

$$\begin{aligned} Q_1 &= 0.5 \sqrt{1 - a + \frac{c}{\sqrt{b^2 + c^2}} - \frac{ac}{\sqrt{b^2 + c^2}}} \\ Q_2 &= \frac{\frac{ab}{\sqrt{b^2 + c^2}} - \frac{b}{\sqrt{b^2 + c^2}}}{4Q_1} \\ Q_3 &= \frac{\frac{b^2}{\sqrt{b^2 + c^2}} + \frac{c^2}{\sqrt{b^2 + c^2}} + c}{4Q_1} \\ Q_4 &= -\frac{b}{4Q_1} \end{aligned} \quad (10)$$

식(10)의 쿼터니안 중에서 특히 Q_1 이 0이 되는 등각도 (180도)가 되는 점을 사전에 검사하여야 한다. 쿼터니안의 모든 값의 제곱의 합은 항상 1이다.

3. 전체 시스템의 구성

로봇은 특히 손목 부위를 중심으로 내구성에 문제가 있을 수가 있고 연마 등과 같이 지속적으로 반력을 받는 작업에 사용되면 반복정밀도, 분진 문제, 파손 등의 문제가 야기되며 수명이 단축된다. 연구에 사용한 ABB사의 IRB 2000은 모든 구동부가 강하고 정밀도가 아주 높은 (DIN 1급) 치차감속기로 구성되어 있으며 오랜 동안 유사한 프로세스 가공분야에서 실적을 보이고 있는 로봇이다. 로봇의 제어기는 외부의 상위 컴퓨터와 초당 9600 비트의 직렬 비동기식 RS-232를 이용하여 통신을 하며 오프라인 프로그램이 가능하다. 통신은 8비트의 워드, 짝수 패리티 그리고 1비트의 스톱 비트를 사용한다. S/W는 메시지 전송을 위한 통신 규약으로 ADLP-10 (ABB Data Link Protocol)과 메시지의 형식과 메시지 교환을 위한 규약으로 ARAP (ABB Robot Application

Protocol)을 사용한다.

상위 컴퓨터는 로봇을 작동시키고 프로그램 블록이나 개개의 프로그램을 저장하거나 로드한다. 또한 로봇 시스템의 작동 모드를 변경시킬 수 있으며 프로그램을 시작하거나 멈추게 할 수 있다. 그리고 각 프로그램을 제거하고 로봇 시스템에 대한 상태 정보를 저장하거나 전달하는 등의 기능을 수행할 수 있다⁽¹⁰⁾⁽¹⁵⁾. 이상을 종합하면 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다.

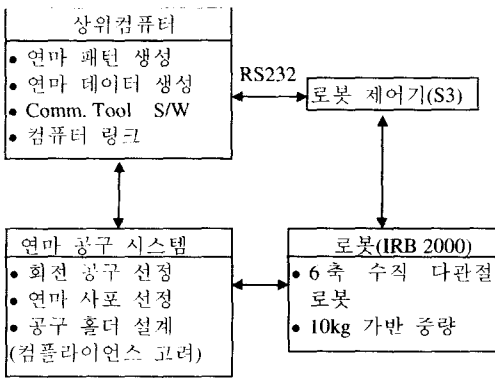


Fig. 5 Diagram of a grinding robot system

3-1 연마 공구 시스템

작업을 담당하는 공구 시스템은 회전을 담당하는 스피들과 공구(사포) 그리고 공구 홀더로 구성된다. 공구 시스템은 공작물과 충돌의 가능성이 발생하지 않도록 작으면서도 견고하게 만들어져야 한다. 공구의 자세와 힘의 방향을 고려한 공구 컴플라이언스가 필요한데⁽¹⁶⁾ 본 연구에서 공구는 항상 가공 표면에 법선 방향으로 접근하도록 제어되므로 그 방향으로 공압 실린더를 적절히 이용토록 한다.

3-1-1 스피들의 선정

일반적으로 가공에 사용되는 스피들에는 전기 모터식과 공압식이 있다. 연마 작업에는 공압식이 많이 사용된다. 무부하일때 최대 30,000 rpm의 정도인 고속 스피들은 디버링 등의 저 토크 응용 분야에 사용되며 2,000 rpm의 저속형은 구멍 내부 디버링이나 금형 표면 연마 등에 사용된다⁽¹⁶⁾. 연구에 선정된 스피들 규격은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of the spindle

제조사	형식	회전수	최대출력	최대토크	길이	무게
Nakanishi	MST2302R	2000RPM	108W	20.6 kgf·cm	160.1 mm	405g

3-1-2 연마용 공구의 선정

내용연마에 사용되는 공구의 주요 종류로는 벨트 그라인더, 브리쉬, 펠트, 버프를 비롯하여 다양한 형상 및 재질의 회전 버 공구 등이 있으나 3차원 급형의 연마, 특히 경면 연마에는 입도가 고운 공구가 이용된다. 수작업의 경우에는 절삭에 의한 컷터 마크가 큰 상태에서 줄이나 디스크 그라인더, 샌드 페이퍼, 오일 스톤, 샌드 페이퍼 등의 순서로 대개 이루어진다.

자동화의 경우에는 입도가 각기 다른 다이아몬드 사포, 부직포로 된 소프트 랩, 3M의 특수 필름 등이 사용된다. 이러한 사포나 특수 필름의 선정은 전 공정에서의 금형면 거칠기와 커스프의 높이 그리고 급형의 재질·형상에 따라 선정되어야 한다. 선정된 필름은 원판형의 고무 패드에 부착하여 사용한다. Table 2는 본 연구에서 사용한 다이아몬드 사포와 특수필름을 보여준다.

Table 2 Specification of the grinding tool

다이아몬드 사포	#60, 120, 200, 400, 800, 1800.
3M 특수필름	#2000, 3000
고무 패드 직경	φ 30mm

3-1-3 공구의 접촉력 유지 기구

공구는 연마 작업 중 표면에 일정한 각도와 접촉력을 유지하여야 한다. 그러므로 스피들은 접촉면에 대하여 항상 일정한 자세를 유지하고 스피들에 붙어 있는 공구(사포)와 금형 접촉면은 정압을 유지하도록 구성되어야 한다.

공구와 홀더의 시스템은 로봇의 가반중량을 초과하지 않고 로봇 6축의 회전 모멘트를 최소화하는 설계로 작업의 힘, 작용점이 로봇 6축의 중심선의 연장선 상을 벗어나지 않도록 설계한다. 공구를 잡고 있는 실린더는 공압으로 작동되며 레귤레이터로 정압이 유지되어 일정 범위내의 충격은 흡수되므로 다른 방향의 컴플라이언스 기능을 부가하지 않았다. 스피들과 가공 급형의 표면이 일정한 각도를 유지할

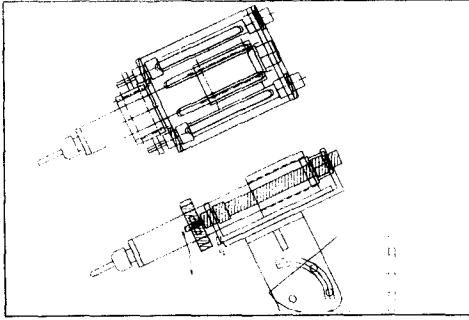


Fig. 6 The tool system attached to robot wrist

수 있도록 하며 이때 간섭이 없도록 하고 예상외의 충격에서 로봇과 스피들이 홀더나 공압 부품들로 보호되도록 하였다. Fig. 6은 공구 홀더의 개념을 보여준다.

4. 실제 문제에서의 적용

본 연구에서 사용된 금형의 재료는 일반적으로 많이 사용되는 인성이 강한 SM45C(KS)이다. 크기는 200mm×100mm로 반경 225mm의 구의 상단 부분의 형상을 직경 20mm인 볼앤드밀로 피치 1mm를 주고 가공하였다. 다양한 연마 패턴 중 일차적으로 비교적 단순한 왕복 경로를 선정하여 적용하였다. 피드 방향과 동일한 연마 패턴과 피드방향과 직각을 이루는 연마패턴의 두 개의 패턴을 교차하여 사용하였다. 예가 Fig. 7에 나타나 있다.

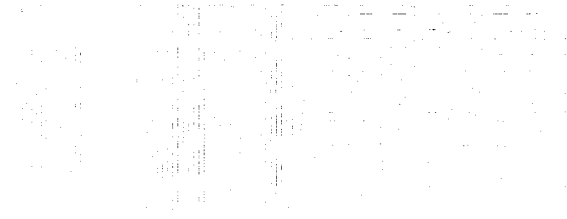


Fig. 7 Feed and feed perpendicular directional paths

4-1 연마 데이터의 생성

CC 데이터로부터 왕복 경로를 따르도록 연마 경로를 설정한다. Table 3과 4는 연마 경로점을 따른 위치와 법선 벡터 그리고 동일점의 위치와 로봇 방위 쿼터니안의 일부를 보이고 있다.

Table 3 Part of Grinding paths

x축	y축	z축	x축 단위벡터	y축	z축
-102.652000	-60.000000	-27.721010	-0.386736	-0.219324	0.895730
102.652000	55.510420	-26.663030	-0.390002	-0.203376	0.898074
-102.652000	-51.169800	-25.718560	-0.392936	-0.187888	0.900166

Table 4 Part of grinding path positions and quaternions

x축	y축	z축	Q1	Q2	Q3	Q4
897.348000	-46.794730	975.155590	0.831654	0.078665	0.547251	0.051764
897.348000	-42.310880	975.970520	0.833084	0.071372	0.546520	0.046822
897.348000	-37.939010	976.686200	0.834351	0.064190	0.545870	0.041996

이렇게 구해진 쿼터니안 값은 극히 작은 값이 되어 로봇이 인식하지 못하므로 로봇이 인식할 수 있도록 ADLP-10, ARAP의 규약에 의하여 크기 인자 (2^{14})를 곱하여 사용한다 (14)(15).

4-2 연마 작업

실린더에 가압하는 압축공기는 0.8~1.0 Kgf/cm²로 설정한다. 스피들의 압축공기는 2.5~3.0 Kgf/cm²이 되도록 설정한다. 고무 패드의 중심부는 회전이 발생하지 않으므로 중심부로부터 일정하게 떨어진 곳에서 연마 작업이 발생하도록 공구 패드가 중심에서 반경 방향으로 1/3~2/3 정도의 면적이 접하도록 공구 스피들을 법선 방향과 일정각도를 기울여 작업하였다. CC 데이터나 로봇 방위 데이터는 금형의 표면에 법선 방향의 벡터를 이용하였으므로 실제로는 홀더를 직정 각도 기울이거나 관절기구의 경사각을 조절하며 연마 작업을 수행하였다. Fig. 8은 처음, 중간과 마지막에서 스피들의 경사 정도와 금형과 고무 패드의 접촉 상태를 보여준다. 오프라인 프로그래밍에서 금형 면의 법선 방향과 일정 각도를 기울인 로봇 데이터를 구하여 작업을 할 수도 있다.

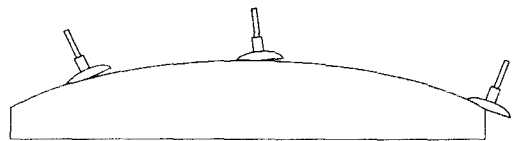


Fig. 8 Declining angle between dies and a spindle

실제 연마 작업에서 #60번 사포는 피드방향의 연마 패턴으로 작업하고 #120번 사포로는 피드 직각 방향으로 연마하여 #60번 사포로 작업한 과상도가 보이지 않을 때까지 연마 작업을 계속한다. 이러한 순서로 #3000번 까지 작업을 수행한다. Fig. 9는 실



Fig. 9 Grinding robot at work

제 구면상의 연마를 하고 있는 사진이다.

Fig. 10은 최종 금형면의 사진을 보여 준다. 비교를 위하여 연마하지 않은 일부 평면과 표면의 차이가 확연히 나타나고 있다. 파상도의 효과적인 제거는 새로운 연마 패턴의 개발과 금형면에서의 패턴 생성 기술 그리고 금형면의 형상과 공구의 접촉부분을 고려한 로봇 제어 기술의 개선에 해당이 있다고 보인다.

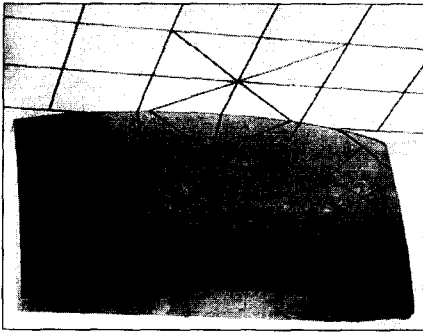


Fig. 10 The final surface

5. 결론

현재까지의 금형 연마 자동화 방향은 NC 기계를 활용한 방법과 연마 전용기를 이용한 방법 그리고 수직 다관절 로봇을 활용한 방법의 방향으로 진행되고 있다. 본 논문에서는 비교적 경제적이고 접근성과 민첩성이 양호하면서 3차원 곡면의 연마가 가능한 로봇을 이용하여 다음과 같은 금형 연마 자동화 연구를 수행하였다.

첫째, 절삭 가공시의 수치제어 데이터인 CC 데이터에서 로봇 데이터를 생성하였다. 이는 금형 모델링 데이터나 CL 데이터에서 로봇 데이터를 구하는 방법보다 시간과 노력을 최소화하고 가능한 오차의 여지를 제거하였다. 둘째, 오프라인 프로그래밍 시스템의 기반을 구축하였다. PC에서 연마 경로를 생성하고 로봇 데이터를 만들어 로봇에 전송하여 프로그래밍에 소요되는 시간을 최소화하고 로봇의 가동률을 최대로 보장하였다. 셋째, 로봇 자체의 기능을 최대한 활용할 수 있도록 최소의 기능만을 담당하는 공구 시스템을 개발하였다. 적절한 공구 컴플라이언스의 기능을 고려하였다.

위와 같은 성과에도 불구하고 로봇 금형 연마 시스템이 실용화되려면 많은 과제들이 해결되어야 한다. 또한 현재는 표면의 조도 등의 결과를 육안 검사에만 의존하였으나 이후로 섬세한 개선을 위하여는 정량적으로 측정하여 개선에 활용하여야 한다. 앞으로 해결할 연구 과제들은 다음과 같다.

- 1) 금형의 재질을 통한 공구 선정 연구
- 2) 다양한 연마 패턴의 생성과 적용
- 3) 각 패턴의 최적화 방법의 연구
- 4) 연마면에 대한 평가 방법의 연구
- 5) 로봇의 충돌 검사 수행
- 6) 위 사항들을 통합하는 데이터 베이스의 구축

참고문헌

1. 박종오, "금형연마 로봇시스템," 대한기계학회지, 제31권 제 8호, pp. 728-735, 1991.
2. 국금환, 최기봉, 정성종, "자유 곡면의 연마공정을 위한 오프라인 로봇작업 프로그래밍 시스템의 개발," 한국정밀공학회지, 제8권 제4호, 1991. 12.
3. 박균명, 장진희, 한창수, "자동 경면 다듬질 장치의 실험적 분석에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 12권 제9호, pp. 30-39, 1995. 9.
4. 박균명, 장진희, 한창수, "경면 다듬질을 위한 자동화 장치 개발," 한국정밀공학회 94년도 추계학술대회 논문집, pp. 389-394, 1994.
5. 조소형, 박강, 강성철, 김문상, "금형의 연마작업을 위한 로봇 오프라인 프로그래밍 시스템의 개발," 기계학회논문집, 제15권 제4호, pp. 1387-13

- 97, 1991.
6. 강성철, 김문상, 이교일, “금형 연마작업을 위한 로봇 오프라인 프로그래밍 시스템의 개발 및 적용,” 한국정밀공학회지, 제14권 제1호, pp. 69-77, 1997. 1.
 7. 정성중, 국금환, 최기봉, “자유곡면의 연마공정을 위한 오프라인 로봇작업 프로그래밍 시스템의 개발,” 한국정밀공학회지, 제8권 제4호, pp. 84-94, 1991. 12.
 8. Numerical Control Fixed Axis Milling, IBM CATIA TRAINING CENTER, Version 4 Release 1.6 April, 1996.
 9. 월간 형기술 p. 9, 1996. 7.
 10. Mizugaki, Y., Sakamoto, M., “Fractal Path Generation for a Metal-Mold Polishing Robot System and Its Evaluation by the Operability,” Annals of the CIRP, Vol. 41, pp. 531-534, 1992.1.
 11. 월간 형기술 p. 66, 1995. 11.
 12. Kotelnikov, A., "Screw Calculus and Some Applications to Geometry and Mechanics," Annals of the Imperial University of Kazan, 1895.
 13. McAulay, A., Octonions a Development of Clifford's Biquaternions, Cambridge University Press, Cambridge, England, Vol. 39, pp. 532-526, 1898.
 14. Product manual IRB 2000, ABB Robotics.
 15. ABB Robot Application Protocol for Computer Link (M91), ABB Robotics.
 16. 유범상, 오영섭, “로봇에 의한 디버링 작업의 자동화(I),” 한국정밀공학회지, 제14권 제12호, pp. 30-47, 1997. 12.
 17. Computer Link / ADLP10 / ARAP S3 (M92), ABB Robotics.
 18. Mizugaki, Y., Sakamoto, M., “Development of a Metal-Mold Polishing Robot System with Contact Pressure Control Using CAD/CAM,” Annals of the CIRP, Vol. 39, 1990. 1.
 19. 이철수, CAD/CAM, 터보테크 출판부.
 20. Adams, R., *Mathematical Elements for Computer Graphics*, McGraw Hill. 2nd Edition.
 21. Craig, J., *Introduction to ROBOTICS Mechanics and Control*, Addison Wesley. 2nd edition.