

# 3축 가공기를 이용한 곡면 금형의 연마 정밀도 향상에 관한 연구

임동재\*, 이상직\*, 정해도\*\*

## A Study on Improvement of Finishing Accuracy Using 3-Axis Machine for Curved Surface Dies

Dong Jae Lim\*, Sang Jik Lee\*, Hae Do Jeong\*\*

### ABSTRACT

The finishing process for die is an important process because it has influence on final quality of products. Recently a study on development of 5-axis die automated finishing machine has been progressed. But die must be moved from the cutting machine to the die automated finishing machine. So manufacturing cost and time increase and machining error occurs by transfer. So, in this study, a 3-axis machining center was applied to die finishing. Because cutting tool can be changed to finishing tool by ATC, both of cutting and finishing process are possible on the machine. However, this application results in the decrease of finishing form accuracy. So this study focused on the generation of finishing tool path suitable to 3-axis die finishing for the improvement of form accuracy. The form accuracy evaluation is performed by the measurement of removal depth using a stylus profilometer. From the result, it is confirmed that form accuracy was improved less than  $2\mu\text{m}$  of removal depth error.

**Key Words** : finishing process (연마 공정), 5-axis die automated finishing machine (5축 금형자동연마기), machine center (머시닝센터), 3-axis die finishing (3축 금형연마)

### 1. 서론

금형은 제품 생산을 위한 필수적인 도구로 금형의 최종 연마 공정은 제품의 최종 품질에 영향을 주는 매우 중요한 공정이므로 고능률, 고정밀 가공 기술을 필요로 한다. 그러나 금형 제조 공정의 약 30~40%를 차지하는 금형의 다듬질 공정은 아직 체계화되어 있지 않고, 숙련공의 경험이나 기술에 의존하여 대부분이 수 작업으로 이루어지고 있는 실

정이다<sup>(1)</sup>. 따라서 수작업으로 발생하는 문제점을 해결하여 가공 시간 단축과 비용 절감을 위하여 5축 금형 자동연마기를 개발하고 있다. 그러나 금형 자동 연마기는 고가의 장비이고, 그다지 보급율이 높지 않다. 그리고 가장 큰 단점은 연마를 위해서 절삭 가공 마친 금형을 연마기로 옮겨야 하는 것이다. 즉 절삭 공정과 연마 공정이 분리되어 있다. 따라서 절삭 공정에서 연마공정으로 금형을 옮기기 위한 추가적인 시간이 필요하고, 그에 따른 가공비용이 상승하게 된다. 또 금형을 새로 고정하는 과

\* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\* 부산대학교 기계공학부

정에서 오차가 발생하여 금형의 형상 정밀도를 저하시킬 수 있다<sup>(2)</sup>. 따라서 본 연구에서는 현장에 널리 보급되어 있는 3축 머시닝 센터를 금형 연마에 적용하였다. 3축 머시닝 센터를 금형 연마에 적용할 경우 자동 공구 교환 장치(ATC)를 이용하여, 절삭 공구를 연마 공구로 교체함으로써 절삭 가공을 마친 금형을 어떠한 이동 없이 바로 연마 작업을 수행할 수 있기 때문에 금형의 이동에 따른 가공 시간 및 비용을 절감할 수 있고, 금형의 이동에 따른 가공 오차를 줄일 수 있다. 하지만 3축 머시닝 센터는 연마를 위한 장비가 아니기 때문에 바로 금형 연마에 적용하기에는 몇 가지 문제가 있다. 먼저 연마 공구의 형상과 연마 Attachment의 특성을 고려하여 3축 연마에 적당한 연마 경로를 생성하여야 한다. 그리고 금형 연마는 일정한 압력을 금형에 전사하는 방법이므로 일정한 가공력 유지가 중요하다. 그러나 3축 머시닝 센터를 사용할 경우 금형 형상과 공구 위치에 따라 회전축의 방향과 가공력의 방향이 달라지기 때문에 가공력이 변하게 되어 금형의 형상 정밀도가 저하된다. 따라서 본 연구에서 가공력을 일정하게 유지하여 균일한 가공량을 유지하도록 3축 연마에 적합한 연마 경로를 생성하여 금형의 형상 정밀도를 향상시켰다.

여기서 형상 정밀도 향상이란, 치수 정밀도를 향상 시키는 것이 아니라, 절삭 가공된 금형 표면을 균일하게 연마한다는 의미에서의 형상 정밀도 향상을 의미한다.

## 2. 연마 경로 생성

### 2.1 연마 Attachment

금형 연마용 연마 공구 유닛에는 여러 가지가 개발되어 있다<sup>(4),(5)</sup>. 본 연구에서는 3축 머시닝 센터에 장착이 가능한 Fig. 1과 같은 구조의 attachment를 사용하였다. 유니버설 조인트는 연마 공구를 연마 attachment에 장착하는 부분으로 연마 공구가 자유롭게 움직일 수 있어서 회전축은 항상 수직을 유지하지만 연마 공구가 곡면에 대해 법선방향을 유지하도록 곡면 대응성을 부여한다. 그리고 연마 공구에 가압력을 부여하고 조절할 수 있도록 적당한 강성을 가지는 스프링을 사용하였다. 그리고 전체적으로 머시닝 센터에 장착이 가능한 구조로 되어 있다<sup>(2)</sup>.

### 2.2 연마 경로 생성 과정

Fig. 2는 3축에 적합한 연마 경로 생성과정을 나타내고 있다. 먼저 연마 공구가 곡면에 대응하기 위해 유니버설 조인트를 중심으로 회전함에 따라 발생하는 수직 가압력 변화를 일정하게 유지하기 위한 연마 경로를 생성한다. 하지만 수직 가압력이 일정하여도 가압력 방향과 공작물에 작용하는 가공력의 방향이 달라지기 때문에 발생하는 가공력 변화를 보정할 수 있도록 앞서 생성한 연마 경로를 수정하였다. 가공력은 수직 가압력의 조절에 의해 일정하게 유지하였으며 모든 과정은 외부의 부가적인 장치에 의한 것이 아니라, 단순히 머시닝 센터의 NC data의 수정에 의해 이루어질 수 있는 방법으로 고안하였다

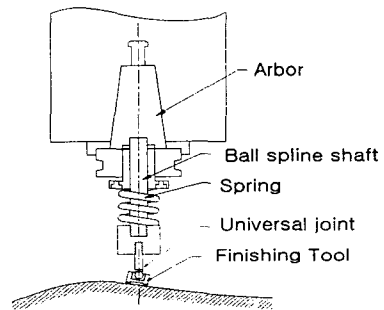


Fig. 1 Construction of attachment

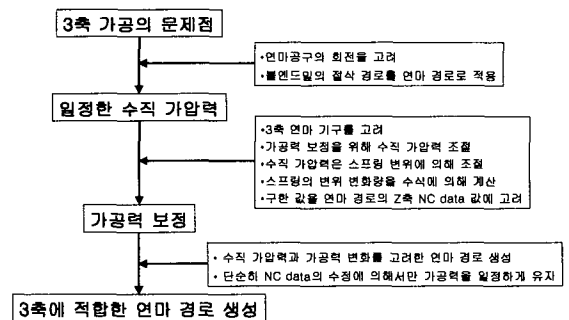


Fig. 2 Flow of finishing path generation

### 2.3 가압력을 일정하게 유지하기 위한 방법

Fig. 1의 attachment를 이용하여 3축 연마를 위한 연마 경로를 생성할 때, Fig. 3과 같이 연마 공구 중심을 기준으로 하여 연마 공구가 유니버설 조인트를 중심으로 회전하지 않는다는 가정 하에서 공구 중심의 이동이 곡면 윤곽과 일치하도록 연마 경로를 생성할 경우 실제로는 연마 공구가 유니버설 조인트를 중심으로 회전을 하게 되고 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 금형과 간섭을 일으키게 된다. 즉, Fig. 4에서 처럼 가공기의 수직축의 위치는 일정하게 유지된 상태에서 연마 공구가 곡면에 대응하기 위해 회전을 하면 연마 공구의 중심과 attachment의 수직 거리가 변하게 된다. 그림에서 수직 거리가 변하는 것은 가공기의 수직축의 위치가 변하는 것이 아니고, 연마 attachment의 스프링이 변화하는 것이다. 즉, 연마 공구가 곡면에 대응하기 위해 수직 거리의 차이만큼 스프링이 압축되는 것이다. 그리고 본 연구에 사용된 attachment는 스프링 변위에 의해 가압력을 조절하므로 이러한 스프링 변위의 변화로 가압력이 변하게 된다. 따라서 이러한 연마 경로를 사용할 경우 가압력 변화로 곡면 전체에 대해 균일한 가공량을 얻기 어렵다. Fig. 4에서는 연마 공구의 회전에 의해 수직 거리가 짧아지므로 스프링이 더 압축되어 가압력이 증가하게 된다. 그리고 이러한 현상은 연마 공구의 두께가 두꺼워질수록 회전 반경이 커져서 가압력 변화는 거진다. 따라서 3축 머시닝 센터를 이용하여 금형을 고정도로 가공하기 위해서는 3축 연마 기구와 연마 공구의 형상을 고려한 연마 경로의 생성이 필요하다.

Fig. 5와 같이 연마 공구가 곡면을 따라 이동함에 따라 유니버설 조인트를 중심으로 회전하기 때문에 연마 공구와 금형의 접촉점은 곡선을 그리며 변하게 된다. 이러한 현상은 볼 엔드밀에 의한 곡면의 절삭시 절삭점의 변화와 유사하다. 그러므로 연마 공구를 연마 공구의 회전반경과 일치하는 직경을 가지는 볼 엔드밀로 근사화 시킬 수 있다. 따라서 볼 엔드밀의 절삭 경로를 생성하는 CAD/CAM 프로그램은 볼 엔드밀의 절삭점 이동을 고려하여 경로를 생성하므로 3축 연마를 위한 연마 경로 생성에 볼 엔드밀의 절삭 경로를 생성하는 CAD/CAM 프로그램을 이용할 수 있다.

본 연구에 사용된 연마 공구는 유니버설 조인트를 중심으로 한 회전 반경이 10mm이므로,  $\phi$  20mm 볼 엔드밀의 절삭 경로와 일치하도록 연마

경로를 생성하여 항상 수직 가압력을 일정하게 유지할 수 있는 연마 경로를 생성하였다. 즉, 연마 공구 중심의 접촉점이 공작물의 윤곽과 일치하도록 연마 경로를 생성하면 Fig. 3과 같은 간섭이 발생하므로 이 간섭을 보정하기 위해 연마 공구 중심의 접촉 위치를 Fig. 6과 같이 수정하여 연마 경로를 생성하였다. Fig. 6에서 새로운 연마 곡선은  $\phi$  20mm 볼 엔드 밀에 의해 곡면을 절삭 가공할 경우 볼 엔드 밀의 이동 경로와 유사하다. 시편의 중심에서 멀어질수록 경로 차이가 증가함을 확인할 수 있다.

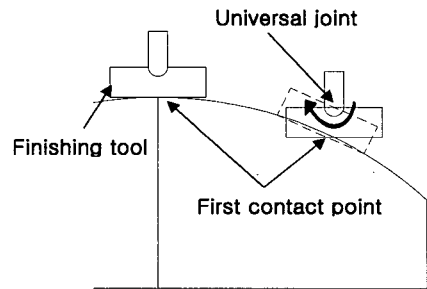


Fig. 3 Problem of normal toolpath

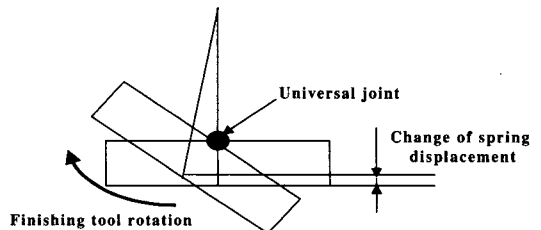


Fig. 4 Change of finishing pressure

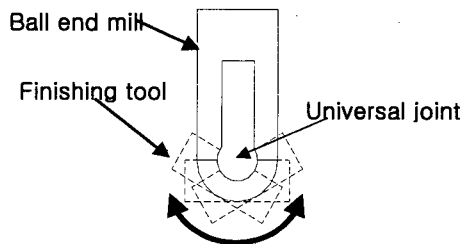


Fig. 5 Relation between finishing tool and ball endmill

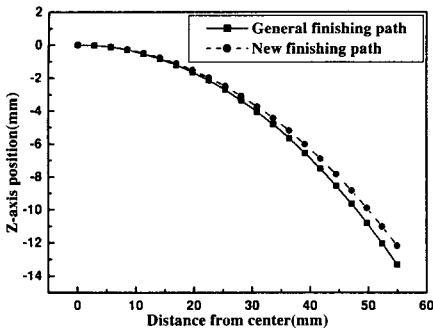


Fig. 6 Change of finishing path for constant pressure

**2.4 가압력 보정**

5축 금형 자동 연마기는 회전축이 항상 금형의 곡면에 대해 수직 방향이 되도록 연마 경로가 생성된다. 따라서 회전축과 가공력의 방향이 항상 일치하기 때문에 가공면 전체에 균일한 가공력을 전달할 수 있다. 그러나 연마 공구를 볼 엔드밀로 근사화시켜 3축 연마에 적합한 연마 경로를 생성하여 수직 가압력은 일정하게 유지하여도 Fig. 4와 같이 수직 가압력의 방향과 가공력의 방향이 곡면 형상과 공구위치에 따라 달라지기 때문에 실제 가공과 관련된 가공력이 달라지게 되고 형상 오차가 발생하게 된다. 따라서 균일한 연마를 위해 이 가공력 변화를 보정해야 한다. 본 연구에서는 가공력의 변화를 고려하여 수직 가압력을 변화시켰다. 수직 가압력은 스프링 변위에 의해 결정되므로 가공력을 일정하게 유지하기 위한 추가적인 스프링 변위를 구하였다.

스프링의 추가적인 변위는 식 (1), (2)에 의해 유도된다. 식(1)은 가공력이 초기 가압력( $P_x=0$ )과 일치하기 위한 보정 가압력( $P_{com}$ )과의 관계를 나타내고, 식(2)는 식(1)로부터 유도된 공구 위치에 따른 스프링의 추가 변위를 나타낸다. 식 (2)에서 결정된 스프링 변위량 만큼 앞서 연마 공구의 회전 반경을 고려하여 생성된 연마 경로의 Z축 NC data를 수정함으로써 새로운 연마 경로를 생성하였다.

$$F = \frac{P_{com}}{\cos \theta} = \frac{K(\Delta Z_1 - \Delta Z_2)}{\cos \theta} = P = K\Delta Z_1 \quad (1)$$

$$\Delta Z_2 = \Delta Z_1(1 - \cos \theta) \quad (2)$$

$P$  : 설정 가압력     $K$  : 스프링 상수

$\Delta Z_1$  : 설정 스프링 변위

$P_{com}$  : 일정한 가공력을 유지하기 위한 보정 가압력

$\Delta Z_2$  : 보정 스프링 변위

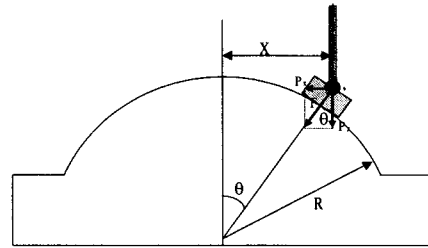


Fig. 7 Schematic of Finishing mechanism

**2.5 3축 연마를 위한 연마 경로 생성**

3축 연마를 위한 연마 경로는 연마 공구의 회전 반경을 고려하여 생성한 연마 경로의 Z축 NC data에 가공력을 일정하게 유지하기 위한 스프링 보정량,  $\Delta Z_2$  값을 고려함으로써 NC data를 수정하여 연마 경로를 생성하였다.

본 연구에서는 가공력 보정을 위해 외부에서 어떤 추가적인 힘을 가하거나 장치를 이용하는 것이 아닌 단순히 NC data의 수정에 의해 스프링 변위를 변화시켜 수직 가압력을 조절함으로써 가공력을 일정하게 제어하였다.

**3. 연마 경로에 따른 곡면 금형 연마**

**3.1 실험 조건 및 방법**

수직형 머시닝 센터(ACE V30, Dae-Woo co.)에 Fig. 1의 attachment를 부착하여 실험을 수행하였으며, 연마 공구는 3M 사의 연마 패드를 사용하였다. Table 1에 실험 조건을 나타냈었다.

실험에는 Fig. 8과 같은 형상의 곡률 반경이 120mm인 곡면 시편을 사용하였다. 연마는 원주 방향으로 일정 구간을 왕복하며 수행하였다. 실험에 사용된 연마 경로는 Table 2에 요약한 것과 같이 어떠한 보정도 하지 않은 연마 경로와 공구 반경을 고려한 연마 경로, 공구 반경을 고려한 연마 경로에 가공력 까지 보정한 연마경로 세 가지를 사용하여 실험하였다.

Table 1 Experimental condition

Machining force	20N
Revolution	800rpm
Feed rate	100mm/min
Finishing tool	#100, 400, 800, 1000 pad(3M)
Finishing times	20-pass

Table 2 Generated finishing path

Finishing path I	무보정 연마 경로
Finishing path II	연마 공구의 회전 반경 보정
Finishing path III	연마 공구의 회전 반경과 가공력을 동시에 보정

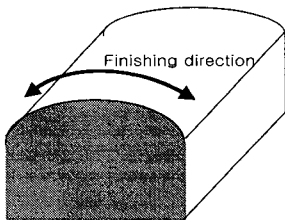


Fig. 8 Workpiece shape

### 3.2 수직 가압력 측정 결과

연마 공구의 회전 반경을 고려함으로써 수직 가압력이 일정하게 유지되는 지를 확인하기 위해 공구 동력계(Type 9443, KISTLER)를 사용하여 수직 가압력을 측정하였다. 실험 조건은 Table 1의 조건을 사용하여 1회 연마하여 신호를 획득하였다. Fig. 9는 연마 공구의 회전 반경을 고려하지 않은 연마 경로 I(finishing path I)을 사용한 경우의 수직 가압력을 나타낸다. 연마 공구의 회전으로 인한 공구 간섭에 의해 중심에서 멀어질수록 수직 가압력이 증가함을 확인할 수 있다. Fig. 10은 연마 공구의 회전 반경을 고려하여 생성한 연마 경로 II(finishing path II)를 사용한 경우이다. 수직 가압력이 Fig. 9에 비하여 상당히 균일해짐을 볼 수 있으므로 연마 공구를 볼 엔드밀로 근사화시켜 연마 경로를 생성하는 것이 가능함을 확인할 수 있다.

### 3.3 가공 단차의 측정

연마된 시편의 형상 측정 결과로는 형상 정밀

도 향상을 확실하게 확인하기는 곤란하므로 형상 정밀도 향상 정도를 정량적으로 확인하기 위해 각 연마 경로에 따라 removal depth를 측정하였다. 측정은 Fig. 11과 같이 시편의 중앙을 중심으로 1cm 간격으로 4영역의 removal depth를 측정 하였다. 측정은 Rank Talysr Hoson Co. 의 Form Talysurf Series 2를 이용하여 측정하였다.

removal depth 측정 결과를 Fig. 12에 나타내었고 시편의 중심을 기준으로 removal depth의 오차를 Fig. 13에 나타내었다. 결과에서 볼 수 있듯이 아무런 보정을 하지 않은 연마 경로를 사용한 경우 중심에서 멀어질수록 가공량이 증가하여 그 오차가 최대 16 $\mu$ m까지 증가함을 확인할 수 있다. 반면 연마 공구의 회전 반경과 가공력을 보정함에 따라 가공이 균일하게 이루어짐을 확인할 수 있다. 최종적으로 연마 공구의 회전 반경과 가공력을 동시에 보정한 연마 경로를 사용한 경우, removal depth error 2 $\mu$ m 이하의 결과를 얻을 수 있었고 8배 이상의 연마 균일성을 확인할 수 있었다.

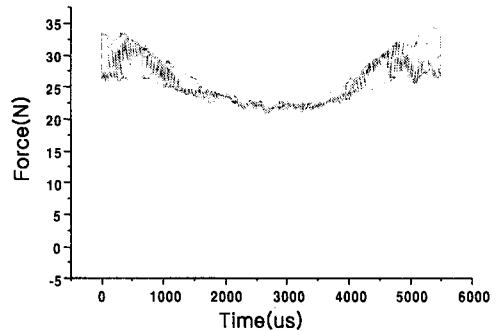


Fig. 9 Finishing pressure change using path I

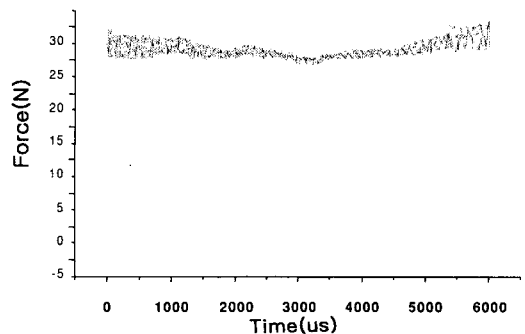


Fig. 10 Finishing pressure change using path II

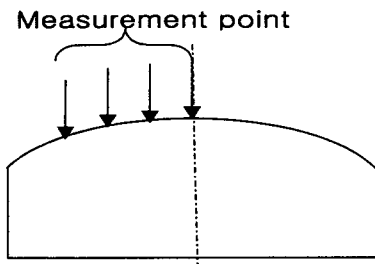


Fig. 11 Removal depth measurement

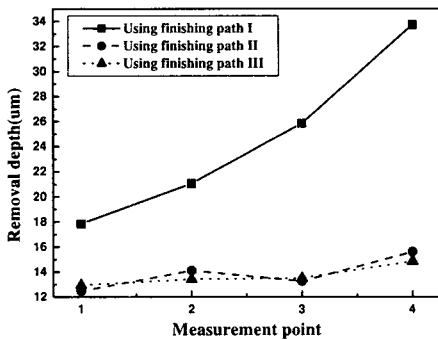


Fig. 12 Removal depth

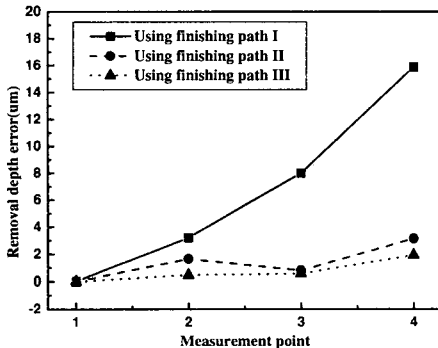


Fig. 13 Removal depth error

#### 4. 결론

3축 가공기는 5축 자동 연마기에 비하여 많이 보급되어 있고, ATC를 이용하여 절삭 공구를 연마 공구로 교체할 수 있어 금형의 이동 없이 절삭 위치에서 바로 연마를 수행할 수 있기 때문에 제조 시간 단축과 제조 경비를 줄일 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 3축 머시닝센터를 금형

자동 연마에 적용하였다. 하지만 5축 자동 연마기와 같은 방식으로 공구 경로를 생성하면 공구 위치에 따라 가공력이 변하기 때문에 가공량이 달라지고, 형상 정밀도가 떨어진다. 따라서 본 연구에서는 연마 공구의 회전 반경을 고려하여 연마공구를 하나의 볼 엔드밀로 취급함으로써 3축 연마에 적합한 연마 경로를 생성하여 수직 가압력을 일정하게 유지하였다. 그리고 3축 연마 기구상 발생하는 가공력을 곡면 전체에서 일정하게 유지할 수 있도록 스프링 변위를 조절함으로써 수직 가압력을 공구 위치에 따라 변화시키는 새로운 연마 경로를 생성하였다. 연마 경로의 보정은 연마 경로 NC data의 Z축 값을 수정함으로써 이루어졌다. 연마 공구의 회전 반경과 가압력 보정을 고려하여 생성된 연마 경로를 금형 연마에 적용한 결과 곡면 전체에서 균일한 가공력을 유지하여 균일한 가공량을 유지할 수 있으므로 금형의 형상 정밀도를 향상시킬 수 있었다.

그리고 본 논문에서는 볼록 형상에 대해 실험을 수행하였지만 향후 연구과제로 3축 가공기에 의한 자유 곡면의 연마를 위해서는 볼록 형상에 적용한 것과 같은 원리로 오목 형상에 대한 실험이 필요하며 두 형상이 조합된 형상에도 적용이 필요하다

#### 후기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 이태문, 정해도, 황찬해, 조규갑, "금형의 자동 연마작업 지원 전문가시스템의 개발," 한국정밀공학회지, 제16권, 제7호, pp. 73-84, 1999.
2. 이두찬, 정해도, 안중환, Takashi Miyoshi, "자동 금형연마의 최적조건선정 전문가시스템 개발," 한국정밀공학회지, 제14권, 제10호, pp. 58-67, 1997.
3. 이민철, "곡면금형의 머시닝센터 장착형 연마로봇 개발," 월간기계기술, 12월호, pp. 53-66, 1997.
4. 坂本正史, 水垣善夫 他2名, "CAD/CAMモデルに基づく高品位金型みがきロボットシステムの開発," 型技術, Vol. 5, No. 8, pp. 102-103, 1990.

5. 鈴木 清, 鍾博 任 他3名, “ユニバーサルジョイント  
工具による自由曲面の磁氣研磨,” 砥粒加工學會  
學術講演會講演文集, pp. 315-318, 1995.