

# 금형자동연마의 최적조건선정 전문가시스템 개발

## Development of Expert System for Optimal Condition of Die and Mold Automatic Polishing

이 두 찬\*(부산대 대학원), 정 해 도, 안 중 환(부산대 공대)  
Doochan Lee, Hae-Do Jeong, Jung-Hwan Ahn

### ABSTRACT

The polishing tool unit is developed which can be attached on the machining center and automatic polishing system for die and mold is also established. So, experiments are carried out under the several polishing conditions. The polishing properties of automatic polishing operation such as surface roughness, stock removal and maximum profile valley depth are obtained and analyzed quantitatively for each polishing tool. The purpose of this study is to construct an expert system for optimal condition of die and mold automatic polishing using the knowledge base that is obtained in the polishing experiments and, to verify the feasibility of the expert system through the experiments. Using this expert system, unskilled operators will be able to obtain the knowledge and experience of an expert.

### 2. 머시닝센터를 이용한 자동연마

#### 1. 서 론

금형제조공정에 있어서, 형상가공은 CAD/CAM과 CNC공작기계 등의 도입으로 자동화가 이루어지고 있으나, 제조공정의 약 30~40%를 차지하는 연마공정은 아직까지도 자동화되지 못하고 숙련공의 경험과 수작업에 의존하고 있는 실정이고 아직 미진한 상태이다. 따라서, 금형제조공정 전체를 자동화하기 위해서는 연마공정의 자동화 기술은 시급한 문제가 아닐 수 없다.

본 연구의 목적으로는 자동연마의 특성을 분석하고, 여기서 얻은 데이터를 이용하여 요구하는 금형표면상태에 능률적으로 달성할 수 있도록 하는 금형자동연마지원 전문가시스템을 개발하여 금형연마공구의 자동화를 시도하는데 있다.

본 연구의 내용으로 여러 연마공구로 가공실험을 하고, 표면거칠기, 제거깊이(Removal depth), 최대골 깊이(Maximum profile valley depth) 등을 측정하여 머시닝센터상에서의 연마특성을 파악한다. 그리고 여기서 얻어지는 연마특성 데이터를 기반으로 하여 연마공구의 표면거칠기와 스크래치를 효율적으로 제거하고, 최종적으로 요구하는 금형표면상태를 능률적으로 달성할 수 있는 연마공구를 선정하고, 그 사용순서, 연마조건(이송속도/회전수), 연마횟수를 교시하는 전문가시스템을 개발하고, 그 유효성을 실험적으로 검증하였다.

#### 2.1 머시닝센터 장착형 금형연마용 Attachment개발

본 연구에서는 3축 머시닝센터의 스피들에 장착할 수 있고, 3차원 자유곡면을 연마할 수 있도록 Fig. 1 과 같은 Attachment를 고안하였다. 이 연마 Attachment의 구조는 연마면에 대해 수직으로 접촉할 수 있도록 유니버설 조인트(Universal Joint), 연마면에 일정한 연마력을 가할 수 있도록 스프링으로 구성된다. 또한 상하방향으로 공구의 이동여유가 있으면서 회전력을 전달하기 위해 볼스플라인샤프트(Ball Spline Shaft)를 공구홀더에 장착하였다. 스프링상수는 공구동력계(KISTLER Type 5019A)를 이용하여 측정하였고, 그 값은 약 3.92 N/mm이다.

#### 2.2 금형자동연마가공 실험

##### 2.2.1 실험장치 구성

본 연구에서 사용한 연마숫들은 CBN숫돌과 엠보싱 타입의 연마시트 두가지로 연마실험을 수행하였다. CBN연마숫들은 Fig.2와 같이 밑부분 도넛형이고, #100, #200, #400, #600 4종류이다. 결합재는 레진본드이다. 그리고, 엠보싱타입의 연마시트는 NAGASE사의 제품으로 유연한 섬유소재 위에 다이아몬드 및 CBN입자를 강력하게 접착시킨 형태로 Fig.3과 같다. 그 종류는 #100, #200, #400, #800 4종류로 접착재는 레진본드이다. 또한 시험편의 재질은 금형재로 널리 쓰이는 금형강 STD11(JIS SKD11)을 사용했다.

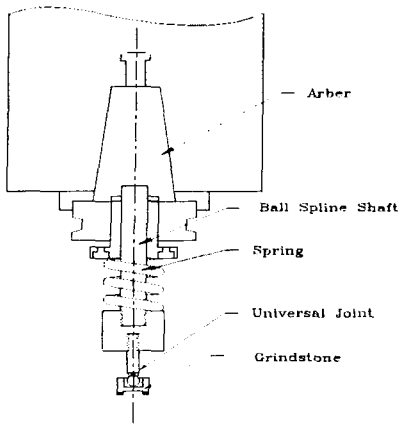


Fig.1 Construction of polishing tool

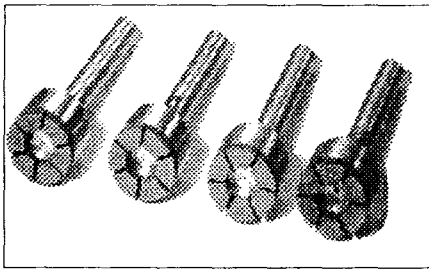


Fig.2 CBN wheel

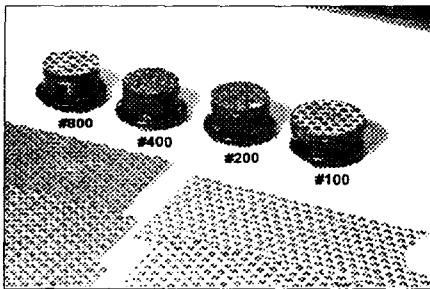


Fig.3 Polishing sheet

### 2.2.2 실험방법

연마실험은 머시닝센터에 공구를 장착하여 자동으로 연마할수 있도록 하였으며, 각 입도에 대하여 회전수, 이송속도 및 연마횟수에 대한 중심선평균거칠기, 최대골깊이와 제거깊이를 측정하였다. 그리고 연마면에 법선방향으로 약 20N을 가하도록 스프링을 압축시켜 연마하였다.

전가공면의 절삭방법으로 fP concept법을 이용하여 절삭가공하였다. 즉 볼랜드밀 1회전당 이송량  $f$  와 피이크피이드(pick feed)  $P$ 를 0.5mm로 같게 절삭하여 가공면 전체에 걸쳐 표면거칠기가 균일하도록

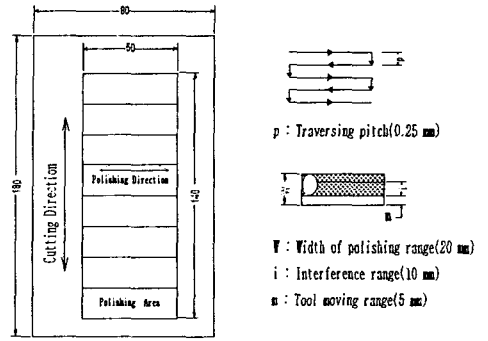


Fig.4 Workpiece configuration and polishing method

하였다. (스핀들회전수 700rpm, 이송수 350mm/min) 시편은 Fig.4와 같이 세로방향으로 9등분하여 그 첫 번째를 전(前)가공면으로 하고 그 다음부터 연마횟수를 증가시켜가며 실험을 하였다. 연마방법으로 Fig. 4의 옆 그림처럼 1회왕복에 이송량(traversing pitch)  $p=0.25\text{mm}$ 로 하여 5mm횡이송한다. 이 때 횡이송을  $n$ , 연마숫들의 지름  $D = 15\text{mm}$ , 연마폭  $W = 20\text{mm}$ 로 하면, 연마횟수  $N$ 은 다음과 같은 식으로 표시된다. 즉

$$N = (W-D) \times n/p = (20-15) \times n/0.25 = 20 \times n$$

이다. 공구간섭영역  $i = (15-5) = 10 \text{ mm}$ 가 연마

Table 1 Experimental conditions in automatic polishing

|                                    | CBN wheel                                 | Polishing sheet |
|------------------------------------|---|-----------------|
| Rotational speed of polishing tool | 1500 rpm                                  | 600rpm          |
| Feed rate                          | 300mm/min                                 | 200mm/min       |
| Number of polishingtimes           | 10~80                                     | 20~160 회        |
| Normal polishing force             | 20N                                       | 20 N            |
| Traversing pitch                   | 0.5mm/stroke                              | 0.25mm/stroke   |
| Polishing direction                | Orthogonal polishing to cutting direction |                 |
| Polishing liquid                   | OS lubricant                              |                 |

횟수  $N$ 에 해당하는 영역이 된다. 이와 같은 실험에서 사용한 연마조건은 Table 1과 같다.

### 2.3 실험결과 및 연마특성 검토

Fig.5~Fig.6은 연마시트#100에 대하여 연마횟수와 표면거칠기, 제거깊이의 관계를 나타낸다. 표면거칠기는 지수함수적으로 개선되고 있으며, 제거깊이도 두 직선으로 근사가 가능하다. 여기서 연마특성에

영향을 미치는 인자로 여러 가지가 있지만, 특히, 스펀들의 회전수, 공구의 이송속도, 연마력을 들 수 있다. 연마력이 너무 크면 제거량이 너무 많아 형상정밀도에 악영향을 미칠 수 있고, 연마력을 적당하게 할 경우, 회전수의 증가와 이송속도의 감소는 연마면에 단위 시간당 기여하는 연마입자 갯수의 증가를 의미하므로 연마효율이 훨씬 좋아진다. 여기서 회전수와 이송속도, 연마횟수를 종합적으로 취급할 수 있는 길이[L]차원의 연마파라메타를 도입할 수 있다. 즉,

$$P = \frac{F}{S} N$$

여기서, F : 이송속도, S : 스펀들회전수, N : 연마횟수이다.

Fig. 7~Fig.8은 이 연마파라메타와 표면거칠기 및 제거깊이의 관계를 나타낸 그래프이다. 따라서, 동일한 영역을 연마할 경우가 이송속도를 높이고 이 비례하여 회전수를 높이면 연마시간을 더욱 최소화할 수 있다.

제거깊이와 자동연마파라메타와 관계는 2개의 직선으로 근사시킬 수 있으며, 그 굴곡점에서 표면거칠기는 전가공면의 거칠기의 약 90%정도가 개선되고, 이 때 임계연마파라메타 $P_c$ 가 존재한다. 중심선평균거칠기와 연마파라메타P의 관계는 다음과 같이 지수함수근사식으로 표현할 수 있다.

$$R_a = (R_o - R_e) \times e^{-\alpha \times P} + R_e$$

여기서  $R_a$  : 중심선평균거칠기( $\mu m$ ),  $R_o$  : 전가공면 거칠기( $\mu m$ ),  $R_e$  : 최종중심선평균거칠기( $\mu m$ ),  $\alpha$  : 거칠기상수, P : 자동연마파라메타이다.

제거깊이도 동일하게 근사시킬 수 있다.

$$H = b_1 \times P \quad (P \leq P_c)$$

$$= b_2 \times P + C \quad (P \geq P_c)$$

따라서, 각 연마공구의 특성치로서 초기제거능력  $\alpha$ , 거칠기상수  $\alpha$ , 최종중심선평균거칠기  $R_e$ 를 들 수 있어 이 값들을 데이터베이스로 저장해 둔다.

### 3. 금형자동연마의 최적조건선정 전문가시스템개발

#### 3.1 프로그램의 기본 사고

금형연마작업에서 전가공면에 존재하는 표면거칠기, 긁힘(scratch)을 제거하기 위해서는 여러 연마공구를 순차적으로 적용하는, 즉 처음에는 연마공구의 입도가 낮은 것부터 시작하여 희망하는 표면상태에 도달할 때까지 차차로 입도가 높은 것으로 교환하여 연마작업을 반복한다. 따라서, 연마작업을 생각할 때, Fig. 9에서와 같이 여러 연마공구의 금형표면상태 변화를 충분히 파악하고, 최대한 그 능력을 살려

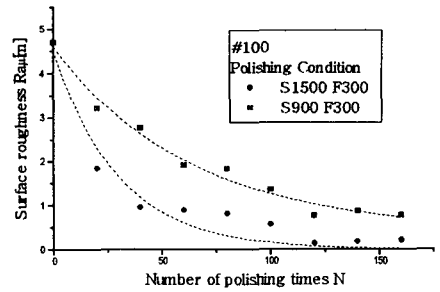


Fig.5 Difference of polishing properties

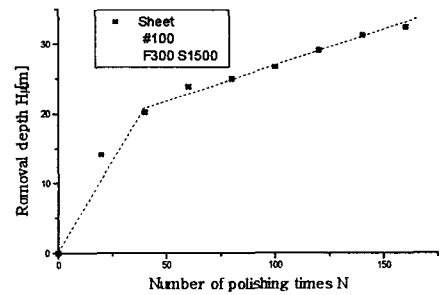


Fig.6 Removal depth to polishing parameter

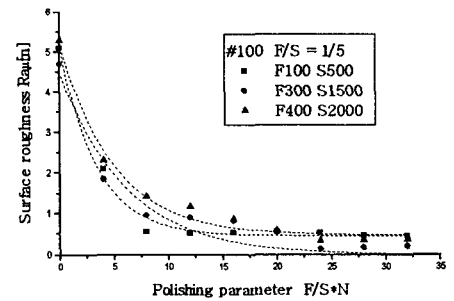


Fig.7 Effect of polishing parameter on surface roughness Ra

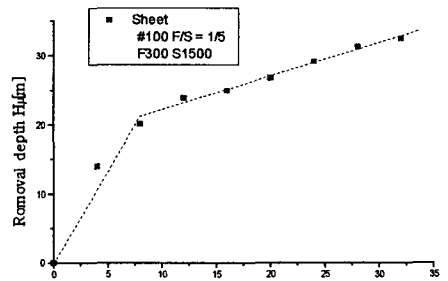


Fig.8 Removal depth to polishing parameter

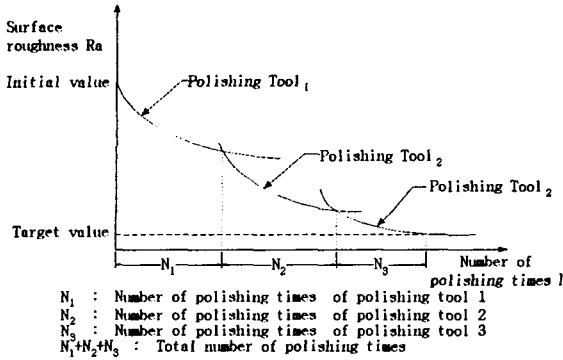


Fig. 9 Process of surface roughness in polishing operation

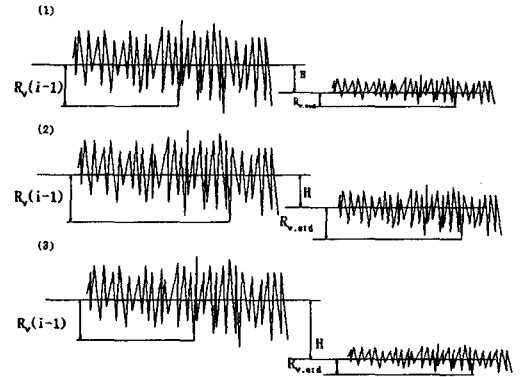


Fig. 10 Relation of removal depth and maximum profile valley depth

연마공정이 최소가 되도록 연마공구를 선정하고, 그 사용순서, 연마횟수, 연마조건(이송속도,회전수)을 표시할 수 있는 전문가시스템을 개발해야 한다.

급형자동연마지원 전문가시스템으로서 그 기본구상은 다음과 같다.

- 지식표현 : 프로덕션 룰에 의한 표현  
if [ 전가공면(표면거칠기, 최대골깊이) ],  
then [ 후가공면(표면거칠기, 최대골깊이) + 연마공구의 종류+ 연마횟수+연마파라메타(이송속도/회전수) ]
- 추론기구 : 프로덕션 룰에 의한 전향추론  
입력: 전가공면(표면거칠기, 최대골깊이)  
최종요구면(표면거칠기, 최대골깊이)  
출력: 연마공구의 종류, 작업순서, 연마조건(이송속도/회전수), 연마횟수  
평가기준: 연마횟수가 최소인 작업순서로 탐색
- 지식획득 : 머시닝센터에서의 자동연마실험으로 획득.

### 3.2 데이터 획득 및 구축

본 연구에서 사용된 자동연마공구로는 연마시트 #100, #200, #400, #800 와 CBN연마공구 #100, #200, #400, #600 등 8종류에 대한 연마실험을 통하여 연마횟수, 연마파라메타에 대한 표면거칠기곡선과 제거깊이곡선을 구한다. 그리고 최종표면거칠기Re와 거칠기상수  $\alpha$ 는 표면거칠기곡선과 연마파라메타의 데이터를 이용하여 최소자승법으로 구할수 있고, 초기제거능률  $b_1$ 도 제거깊이곡선에서 쉽게 구할수 있다. 따라서 초기값으로서 전가공면표면거칠기  $R_0$ 가 주어지면, 이것을 제거할수 있는 연마공구가 선정되고, 그 연마공구의 거칠기상수  $\alpha$ 에서 임계연마파라메타  $P_c$ 를 구할수 있다. 이는 식(3)에서  $\exp(-\alpha \times P_c) = \exp(-2) = 0.135$  (약 87% 개선)로 할수 있어 근사적으로 임계연마파라메타  $P_c$ 를

$$P_c = 2 / \alpha$$

로 구할 수 있다. 또한 임계연마파라메타에 대응하는 임계제거깊이  $H_c$ 도 쉽게 구해진다.

현편, 가공면에 존재하는 최대골깊이  $R_v$ 는 제거깊이와 밀접한 관계가 있고, Fig. 10에 나타난 것같이 3가지 경우가 있다.

- (1)  $H < R_v(i-1)$ 이고  $R_{v.std} < R_v(i-1) - H$  일 때,  
 $R_v(i) = R_v(i-1) - H$
- (2)  $H < R_v(i-1)$ 이고  $R_{v.std} > R_v(i-1) - H$  일 때,  
 $R_v(i) = R_{v.std}$
- (3)  $H > R_v(i-1)$  일 때,  
 $R_v(i) = R_{v.std}$

여기서,  $R_v(i-1)$ 은 전 공정의 가공면에 남아 있는 최대골깊이이고,  $R_{v.std}$ 는 현재 사용중인 연마공구가 표준적으로 발생시키는 최대골깊이로 연마실험을 통해 획득된다. 또  $R_v(i)$ 는 현 단계의 연마가 종료하는 시점에서 가공면에 추정되는 최대골깊이(Maximum profile valley depth)이다. 이와 같은 3가지 조건에 따라 가공후의 최대골깊이를 결정할수 있다.

### 3.3 전문가시스템의 추론 기구

본 전문가시스템의 기본구조는 Fig. 11과 같다. 우선, 전(前)가공면의 표면거칠기와 최대골깊이를 초기값으로하고 요구연마면 표면거칠기와 최대골깊이를 목표값으로 하여 입력하면, 초기값은 작업메모리(working memory)에 현재의 표면상태로 저장되고, 추론부에서는 이 작업메모리와 지식베이스의 데이터를 이용하여 연마횟수가 가장 적게 되는 현재 사용가능한 연마공구를 추론해 낸다. 그리고 이 공구로 얻을 수 있는 표면상태를 목표값과 비교하여 그 값에 도달하지 않았다면, 그 때의 표면상태의 값을 작

업메모리에 격납하여 똑같은 추론작업한다. 계속해서, 목표값에 도달할 때까지 반복추론하여 목표값이 찾아지면, 그 때까지의 연마공구의 종류 및 연마횟수, 연마파라메타를 출력하여 추론을 마친다. 또한, 기석획득항목을 두어 프로그램 사용자가 연마실험을 통해 얻은 데이터를 입력하여 프로그램의 지식베이스(knowledge base)로 등록할수 있다.

목표값탐색은 트리구조를 사용하여 중형탐색(depth-first search)으로 목표노드가 발견될 때까지 계속한다.

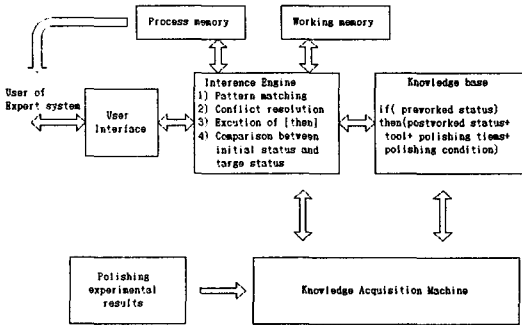


Fig. 11 Structure of expert system

#### 4. 결론

본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 금형자동연마를 위해 3축 제어 머시닝센터의 주축부에 장착할수 있는 Attachment를 개발하여, 절삭가공 후 공작물의 탈착이 필요없이 금형의 정밀도를 유지시킬수 있고, 또한 연마공구의 자동공구교환으로 금형연마 공정의 자동화에 유리하고, 전체 금형제조공정시간을 단축시킬 수 있다.
- 2) 길이차원의 자동연마파라메타P를 도입하여 중심선평균거칠기와의 관계가 지수함적으로 근사가 가능하며, 제거깊이도 두 직선으로 근사가 가능하다. 또한 임계연마파라메타P<sub>c</sub>가 존재함을 알 수 있다.
- 3) 여러종류의 연마공구와 그 연마특성을 프로덕션 룰형식으로 지식베이스에 등록하고, 전(前)가공면 및 요구표면상태(중심선평균거칠기, 최대골깊이)를 입력하면, 연마공구의 선정, 그 사용순서, 연마횟수, 연마파라메타(이송속도/회전수)를 교시하는 최적조건선정 전문가시스템을 개발하였다.

#### 참고문헌

1. 佐佐木哲夫, 三好隆志他2名: 金型磨き作業の知識獲得と自動化に関する研究(第1報)-金型熟練工の手磨き特性-, 精密工學會誌, 57[3](1991)497.
2. 佐佐木哲夫, 三好隆志他2名: 金型磨き作業の知識獲得と自動化に関する研究(第2報) -金型磨きエキスパートシステム-, 精密工學會誌, 57[12](1991)2151.
3. 佐佐木哲夫, 三好隆志他2名: 金型磨き作業の知識獲得と自動化に関する研究(第3報) -金型自動磨き装置の試作開発-, 精密工學會誌, 58[12](1992)2037.
4. 이용철, 安齋正博, 中川威雄, “금형면의 자기연마가공 고효율화에 관한 연구”, 한국정밀공학회지, Vol.13.No.6 pp.59-65,1996
5. 김기태, 이상용, “인공지능”, 도서출판 대응,1989

Table 2 Resolutions estimated by expert system

|   | 공구         | 입도 | 횟수   | Ra   | Rv  | P(F/S) |
|---|------------|----|------|------|-----|--------|
| 1 | CBN #100   | 9  | 1.82 | 4.4  | 1/3 |        |
|   | CBN #200   | 6  | 0.84 | 2.21 | 1/3 |        |
|   | Sheet #200 | 9  | 0.40 | 1.57 | 1/5 |        |
|   | Sheet #800 | 9  | 0.34 | 1.14 | 1/5 |        |
| 2 | CBN #100   | 9  | 1.82 | 4.4  | 1/3 |        |
|   | CBN #400   | 10 | 0.78 | 1.83 | 1/3 |        |
|   | Sheet #200 | 9  | 0.39 | 1.57 | 1/5 |        |
|   | Sheet #800 | 8  | 0.34 | 1.14 | 1/5 |        |