

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구센터의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

## 자동금형연마의 최적조건선정 전문가시스템 개발

이 두 찬\*, 정 해 도\*\*, 안 중 환\*\*, 三好隆志\*\*\*

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

Doo-Chan Lee\*, Hae-Do Jecng\*\*, Jung-Hwan Ahn\*\*, Takashi Miyoshi\*\*\*

#### ABSTRACT

Generally, die polishing process occupies about 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 study aims at development of an expert system for die polishing which gives such optimal parameters as tool and polishing conditions. Through experiments, polishing characteristics such as surface roughness, stock removal and scratch were analyzed quantitatively for each polishing tool, and a knowledge base for the expert system was established. Evaluation tests show that the developed system works well to suggest the optimal polishing conditions and it is very promising.

**Key Words** : knowledge base(지식베이스), expert system(전문가시스템), polishing characteristics(연마특성), optimal polishing condition(최적연마조건)

#### 1. 서론

연마가공은 고품위의 표면을 얻기 위한 제거가공으로 적용되어 왔으나, 최근에 들어 고능률, 고정밀가공기술로서의 기능도 요구되고, 특히 금형은 제품을 양산하기 위하여 필수적으로 이용되고 있는 일종의 도구로서 다품종 소량생산 개념의 확대와 더불어 그 중요성이 증가하고 있다. 금형의 제조 기술은 최종 제품의 품질 및 성능을 결정 짓는 중요한 기술로서, 금형제조공정에 있어서 금형의 형상가공은 CAD/ CAM시스템, CNC공작기계 등의 도입으로 자동화가 상당히 진전되어 있으나, 그 제조공정의 약 30~50%를 점유하고 있는 연마가공은 아직까지도 체

계화되어 있지 않고, 숙련공의 경험과 기술에 의존한 수작업으로 이루어지고 있는 실정이다. 또한, 이 금형제조 작업은 대표적인 3D업종으로 작업자의 부족, 인건비 상승, 제품수명 사이클의 단축에 의한 납기단축으로 인해 자동화를 통한 생산성향상에 대한 인식이 높아지고 있으며, 그 제조방법도 제품의 다양화, 복잡화, 고정밀화, 제조가격의 저렴화 등 수요자의 요구를 충족시키기 위해서 종래의 가공방식과 숙련공의 경험에 의존한 생산방식에서 탈피하여 금형 생산의 자동화로 변모해 가고 있다. 몇 년 전부터 일본, 독일 등을 중심으로 연마공정 자동화에 대한 연구가 진행되어 오고 있으며, 그 결과 연마공정 일부에서 연마로봇, 자동연마기같은 자동화기계에 의한

\* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

\*\* 부산대학교 기계공학부

\*\*\* 오사카대학 산업기계공학과

자동연마 작업이 숙련공에 의한 수작업을 대신하고 있으나, 아직 사용자의 기대에 충분히 만족되는 결과를 얻지 못하고 있다<sup>(1)(2)(3)</sup>.

본 연구의 목적으로는 머시닝센터를 이용한 자동연마의 특성을 분석하고, 여기서 얻은 데이터를 이용하여 요구하는 금형표면상태에 능률적으로 도달할 수 있도록 하는 금형자동연마지원 최적조건 선정 전문가시스템을 개발하고, 금형연마가공의 자동화를 시도하는 데 있다. 본 연구의 내용으로 금형숙련공이 가지고 있는 전문적인 지식이나 기술을 기초로 하여 금형숙련공을 대신할 수 있고 머시닝센터의 주축에 장착할 수 있는 금형연마용 Attachment를 개발하여 여러 연마공구에 대해서 연마가공실험을 수행하고, 그 표면거칠기(중심선평균통거칠기, Center-line average roughness), 제거량(Removal depth), 최대골깊이(Maximum profile valley depth) 등을 측정하여 머시닝센터상에서의 연마특성을 파악한다. 그리고 여기서 얻어지는 연마특성 데이터를 기반으로 하여 전가공면의 표면거칠기와 긁힘흔적(Scratch)을 효율적으로 제거하고, 최종적으로 요구하는 금형표면상태에 효율적으로 달성할 수 있는 연마공구, 그 사용순서, 연마조건(이송속도/스핀들회전수), 연마횟수를 교시하는 최적조건 선정용 전문가시스템을 개발하고, 그 유효성을 실험적으로 검증한다.

## 2. 머시닝센터를 이용한 자동연마

### 2.1 머시닝센터 장착형 금형연마용 Attachment

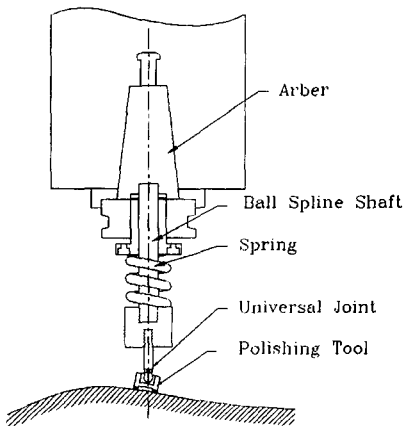


Fig. 1 Construction of attachment for automatic polishing

곡면금형의 자동연마가공에 대한 연구는 일본을 중심으로 이루어지고 있으며, 현재 여러 가지 연마공구 Attachment가 개발되어 있으며, 그 중 몇 가지는 연마기에 부착되어 판매되고 있다<sup>(4)(5)(6)</sup>. 본 연구에서는 자동연마를 수행하기 위해서 머시닝센터에 쉽게 장착하여 자유곡면 형상의 금형을 연마할 수 있는 연마공구 Attachment를 개발하였다. Fig. 1처럼 이 Attachment의 구조는 연마면에 대해 법선방향으로 접촉할 수 있도록 유니버설 조인트(Universal Joint), 일정한 연마력을 가할 수 있도록 하는 스프링, 상하방향으로 공구의 이동여유가 있으면서 회전력을 전달하기 위한 볼 스플라인 샤프트(Ball Spline Shaft), 또한 머시닝센터의 주축에 장착할 수 있도록 하는 아버(Arber)로 구성된다. 그리고, 스프링 상수의 측정은 KISTLER사의 Type 5019A 공구동력계를 사용하였고, 그 값은 약 3.92 N/mm이다. 이와 같은 Attachment는 그 구조가 간단하고, 머시닝센터에서 장·탈착이 용이하며, 가격이 저렴하다는 장점을 가진다. 또한 이 Attachment를 사용하여 연마가공을 할 경우, 그 연마경로는 형상가공에서 사용된 NC코드를 이용하고, 형상가공 후 바로 연마가공으로 이행이 가능하다. 따라서, 머시닝센터를 이용한 자동연마는 절삭공구(엔드밀, 밀링커터 등)를 연마공구로 대체해서 수행하는 범주의 연마로서 머시닝센터 1대로 절삭가공과 연삭가공을 모두 수행함으로써 유연한 생산시스템을 구축할 수 있다.

### 2.2 금형자동연마가공 실험

#### 2.2.1 실험장치

본 연구에서 사용한 실험장치는 Table 1과 같다. 그리고, 연마공구는 CBN숫돌과 엠보싱 타입의 연마시트 두 가지로 CBN숫돌은 Fig. 2와 같이 도넛형이고 그 밑부분은 슬릿모양으로 파내어 눈막힘을 방지할 수 있도록 했다. 그 종류는 #100, #200, #400, #600 4종류로 결합체는 레진이다. 엠보싱타입의 연마시트는 일본 NAGASE사

Table 1 Specification of experimental equipments

Instrument	Model
Machine	Machining Center, ACE-V30 [DAEWOO]
polishing tool	CBN wheel : #100, #200, #400, #600 [EWHA] Embossed polishing sheet : #100, #200, #400, #600 [NAGASE]
workpiece	Die steel, STD11
Measurements	Surface roughness tester, Surfcom 200B [TOKYO SEIMITSU]

의 제품으로 유연한 섬유소재 위에 다이아몬드 및 CBN 입자를 강력하게 결합시킨 형태로 Fig. 3과 같다. 그 종류는 #100, #200, #400, #800 4종류로 그 결합제는 레진이다. 또한 시험편의 재질은 금형재로 널리 쓰이는 금형강 STD11(JIS SKD11)을 사용했다<sup>17)</sup>.

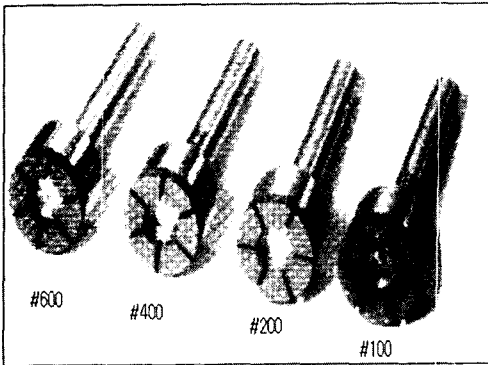


Fig. 2 CBN wheel

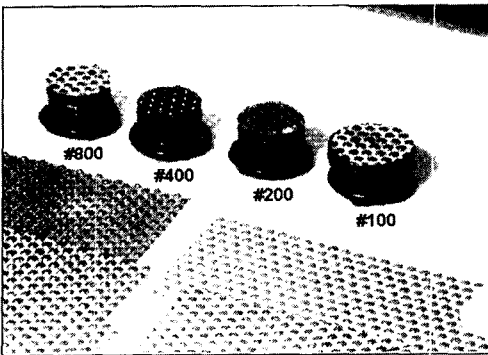


Fig. 3 Embossed polishing sheet

### 2.2.2 실험방법

절삭방법으로는 시편표면을 노즈 반경이 5mm인 초경 볼엔드밀(5R)을 사용하였는데, 이 절삭가공면의 상태는 연마효율에 영향을 미치는 인자 중에서 그 첫 번째로 생각할 수 있다<sup>18)</sup>. 따라서, 본 연구에서는 절삭에서 표면거칠기가 가장 양호하고 연마가 가장 효율적으로 될 수 있도록 하기 위해 fP Concept를 도입하였다. fP Concept는 볼엔드밀의 1회전당 이송량 f와 Pick feed량 P가 일치할 경우, 즉 “f = P” 일 때, 가공표면거칠기와 가공능률이 최적화된다는 개념으로, 본 연구에서도 이 fP Concept를 이용하여 f = P = 0.5 mm인 절삭조건으로 가공면의 전체에 걸쳐 표면거칠기가 균일하도록 하였다(회

전수 S : 700 rpm, 이송속도 F : 350 mm /min, 피이 크피이드 P : 0.5 mm). 또한, 입도 #400 이상의 연마공구를 사용할 경우는 커스프(Cusp)를 완전히 제거한 후 연마실험을 행하였다.

연마방법은 Fig. 4와 같이 절삭가공한 시편표면을 세로 방향으로 9등분하여 그 첫 번째를 전(前)가공면으로 하고 그 다음부터 연마횟수를 증가시켜 가며 실험을 하였다. 또한, Fig. 4의 옆 그림처럼 1회 이동에 이송량(Transverse pitch)을 p = 0.25 mm로 하여 5 mm 횡이송한다. 이 때 횡이송의 횟수를 n, 연마공구의 지름 D = 15 mm, 연마영역폭 W = 20 mm로 하면, 연마횟수 N은 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$N = (W - D) \times n / p = (20 - 15) \times n / 0.25 = 20 \times n \quad (1)$$

이는 요구연마영역 i = (15 - 5) = 10 mm가 연마횟수 N에 해당된다. 그리고 Table 2는 실험에서 사용한 연마조건을 나타낸다.

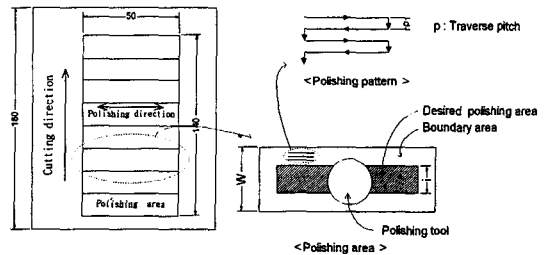


Fig. 4 Workpiece configuration and polishing method

Table 2 Experimental conditions in automatic polishing

	CBN wheel	Polishing sheet
Rotational speed of polishing tool	900, 1500 rpm	900, 1500 rpm
Feed rate	300 mm/min	300 mm/min
Number of polishing times	6~48	20~160
Normal polishing force	20 N	20 N
Traversing pitch	1.0 mm/stroke	0.25 mm/stroke
Polishing direction	Orthogonal polishing to cutting direction	
Polishing coolant	Soluble type, Oil Sincool 2% dilution	

### 2.3 실험결과 및 연마특성 검토

본 연구에서는 측정항목으로 Fig. 5에 나타난 바와 같이 중심선평균거칠기 Ra, 중심선에서 골까지의 최대깊이

인 최대골깊이(Maximum profile valley depth)  $R_v$ , 그리고 전가공면과 연마면의 중심선사이의 거리인 제거 량(Removal depth)  $H$ 를 측정하였다.

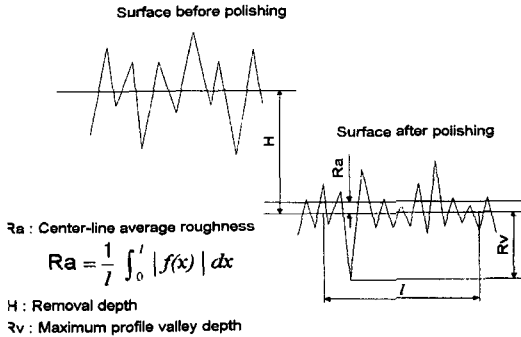


Fig. 5 Discriptions of surface roughness, removal depth and maximum profile valley depth

### 2.3.1 실험결과 및 고찰

연마횟수와 표면거칠기, 제거깊이의 관계를 Fig. 6~7 이 나타내었다. Fig. 6은 연마시트(Polishing sheet) #100에 대하여 이송속도를 300mm/min으로 일정하게 하고, 스피들의 회전수를 다르게 하였을 때 (S900 rpm, S1500 rpm) 표면거칠기의 변화를 나타내고 있는 데, 양쪽 모두 연마횟수의 증가에 따라 표면거칠기는 지수함수 적으로 개선되고 있고, 제거량은 한 점에서 만나는 두 직 선으로 근사가 가능한 데, 초기제거능률은 커지지만, 연 마횟수가 어느 정도를 넘어서면 제거능률이 떨어진다. 또 한 이 연마횟수에서 표면거칠기의 개선정도는 상당히 둔 하되어 초기표면거칠기가 최종표면거칠기의 90%정도까 지 도달한다. 이 때의 연마횟수를 임계연마횟수라 할 수 있다. 또한 Fig. 6과 같이 동일한 이송속도에 대하여 회 전수가 클 경우 최종표면거칠기에 더욱 빠르게 도달하여 연마효율이 더욱 양호함을 알 수 있다. Fig. 7은 CBN wheel #100에 대한 연마특성을 나타내고 있는 데, 이는 연마시트(Polishing sheet)의 연마특성과 동일한 경향 을 보이고 있다. 스피들회전수가 700 rpm일 때보다는 더 높은 900 rpm일 때 연마효율이 더 좋음을 알 수 있는 데 이는 연마시트의 경우와 같다. 하지만, 회전수를 더 높 이 1500 rpm일 때는 오히려 연마특성이 좋지 못하다. 이 때, Fig. 8은 스피들회전수에 대하여 CBN wheel의 수직 연마력의 변화를 측정된 것으로 평균 약 20 (N)정 도의 수직력에 공구의 회전에 의한 고주파 성분이 포함되 어 나타나고 있다. 연마력은 3가지 조건에 대해 모두 평

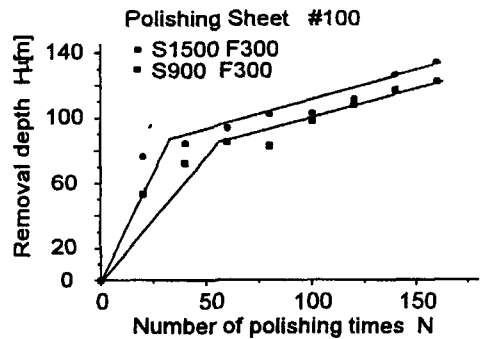
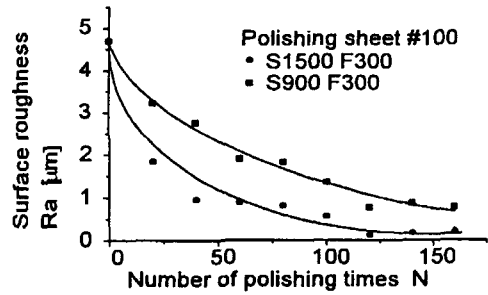


Fig. 6 Polishing properties of polishing sheet #100 according to polishing condition

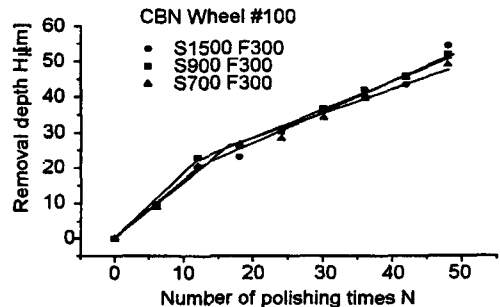
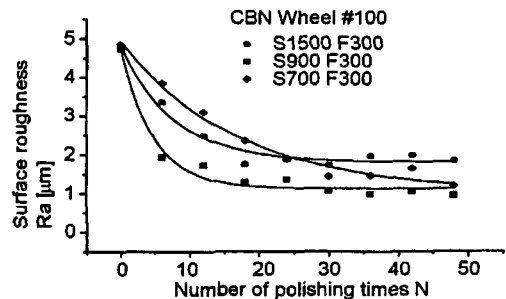


Fig. 7 Polishing properties of CBN wheel #100 according to polishing condition

균 20 (N)을 유지하고 있지만 그 진폭은 (a)회전수가 900 rpm인 경우가 가장 작고, 그 다음은 (b)회전수가 700 rpm일 때이고, (c)회전수가 1500 rpm일 때는 연마력의 변화가 아주 크다. 이는 공구의 진동이 심해져 연마특성이 오히려 나빠진 경우로, 자동연마공정에서는 Attachment의 정밀도가 연마면의 상태를 좌우하는 요소가 되는 것으로 분석할 수 있다.

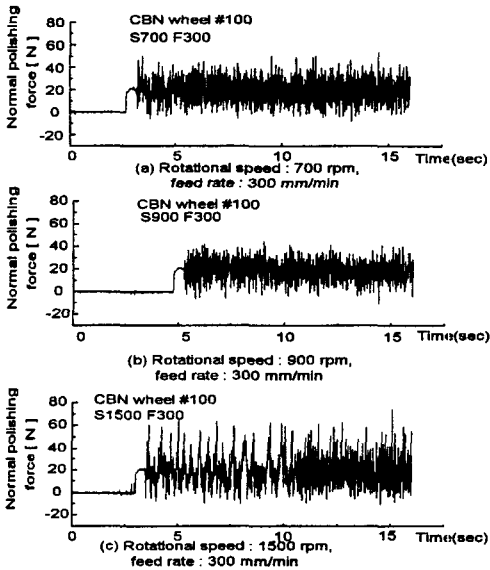


Fig. 8 Normal polishing force

### 2.3.2 연마파라메타의 도입

자동연마특성에 미치는 인자로 여러 가지가 있지만, 특히 스피ndl의 회전수, 공구의 이송속도, 연마력을 들 수 있다. 연마력은 너무 크면 제거량이 너무 많아서 형상정도에 악영향을 미칠 수 있고, 이를 알맞게 할 경우, 어느 정도까지의 회전수의 증가와 이송속도의 감소는 연마면에 단위 시간당 기여하는 연마입자수의 증가를 의미한다. 여기서, 단위 시간당 기여숫돌입자의 수를 대표하는 다음과 같은 연마파라메타를 생각할 수 있다<sup>(9)</sup>.

$$P = \frac{S}{F} N \quad (2)$$

여기서, F는 이송속도, S는 스피ndl회전수, N은 연마숫이다.

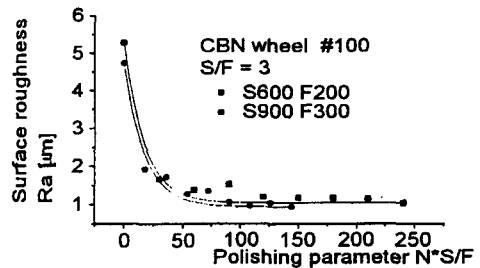
Fig. 9는 이 연마파라메타를 이용하여 표면거칠기 곡선을 나타낸 그래프이다. Fig. 9(a)는 CBN wheel #100

에 대하여 이송속도에 대한 회전수의 비가 S/F = 3인 경우로 두 곡선이 거의 일치하고 있으며, 또한 Fig. 9(b)는 연마시트(Polishing sheet) #100에 대하여 S/F = 5인 경우로 세 곡선이 거의 일치함을 알 수 있다. Fig. 10도 마찬가지로 S/F = 3인 경우로 연마효율은 조금 떨어지지만 두 곡선이 거의 일치한다. 따라서 동일한 영역을 연마할 경우, 이송속도를 높이고 이에 비례하여 회전수를 높이면 연마시간을 더욱 최소화할 수 있음을 알 수 있다.

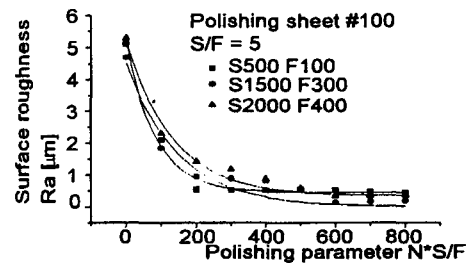
이상과 같은 관점에서 자동연마에서도 금형속련공처럼 Fig. 11과 같이 연마특성을 정량화시킬 수 있다. 표면거칠기가 최종표면거칠기의 90%에 도달할 때의 연마파라메타에서 제거량의 두 직선이 만난다. 이 때의 연마파라메타를 수작업연마에서의 임계연마숫 Nc와 똑같이 자동연마에서의 임계연마파라메타 Pc로 할 수 있다. 그리고, 표면거칠기 Ra와 연마파라메타 P의 관계는 수작업연마와 동일하게 다음과 같은 근사식으로 표현할 수 있다.

$$R_a = (R_i - R_c) \times e^{(\alpha P)} + R_c \quad (3)$$

여기서 Ra : 표면거칠기(μm), Ri : 가공전 표면거칠기(μm), Rc : 최종표면거칠기(μm), α: 거칠기상수, P : 연마파라메타이다.



(a) S/F = 3 with CBN wheel #100



(b) S/F = 5 with polishing sheet #100

Fig. 9 Relations between surface roughness and polishing parameter

제거량도 식(4)와 같이 근사시킬 수 있다.

$$\begin{aligned}
 H &= b_1 \times P \quad (P \leq P_c) \\
 &= b_2 \times P + C \quad (P \geq P_c)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

따라서, 각 연마공구의 특성치를 최종표면거칠기  $R_e$ , 최대깊이가  $R_v$ , 초기제거능률  $b_1$ , 거칠기상수  $\alpha$  로 하여 이 값들을 지식베이스의 데이터로 이용한다. Fig. 12은 각 연마공구에 대한 특성치를 나타내고 있다.

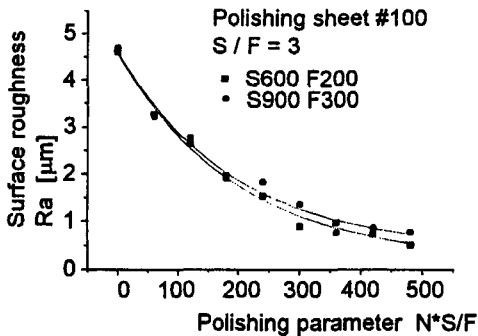


Fig. 10 Relations between surface roughness and polishing parameter  $S/F = 3$

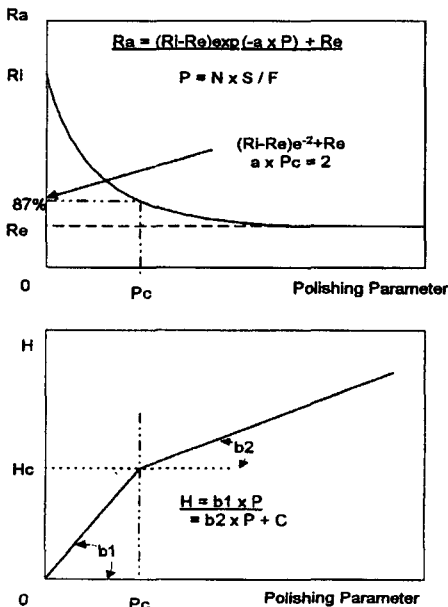


Fig. 11 Quantitative properties of removal depth and surface roughness to polishing parameter

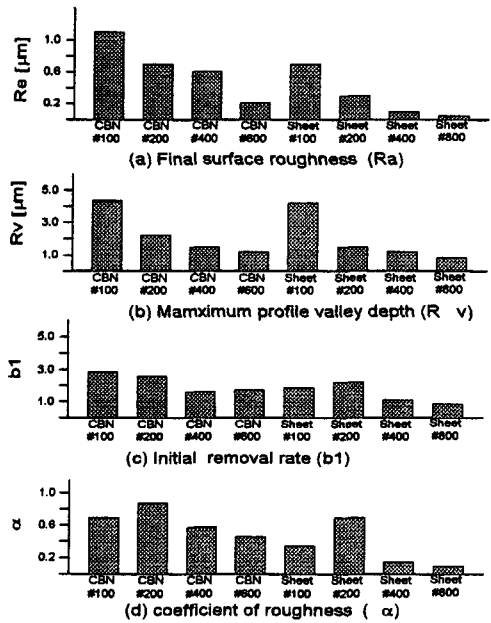


Fig. 12 Characteristic values of polishing tools (Polishing sheet :  $S/F = 5$ , CBN wheel :  $S/F = 3$ )

### 3. 금형자동연마의 연마조건선정용 전문가시스템

#### 3.1 프로그램의 기본 개념

금형연마작업에서 전가공면에 존재하는 표면거칠기, 긁힘(scratch)을 제거하기 위해서는 여러 연마공구를 순차적으로 적용하는, 즉 처음에는 연마공구의 입도가 낮은 것부터 시작하여 희망하는 표면상태에 도달할 때까지 점차 입도가 높은 것으로 교환하는 연마작업을 반복한다. 따라서, 이러한 연마작업을 생각할 때, Fig. 13에서와 같이 여러 연마공구의 금형표면상태 변화를 충분히 파악하고 현재표면상태와 목표표면상태가 주어지면, 최대한 그 능력을 살려 연마공정이 최소가 되도록 연마공구를 선정하고, 그 사용순서, 연마횟수, 연마조건(회전수/이송속도)을 교시할 수 있는 전문가시스템을 개발할 수 있고 이와같이하면 연마효율을 높일 수 있을 것이다. 그 중 가장 문제시되는 것은 연마공구의 교환시기, 현재의 금형표면의 상태를 정확하게 관찰하고 능률종계 다음의 공정으로 이동하는 연마횟수의 결정이다. 공구교환의 기준은 2장의 자동연마실험을 통해서 얻은 각 연마공구의 연마파라메타에 대한 표면거칠기 곡선, 제거량 직선, 최종적으로 도달할 수 있는 최대깊이로 추정한다.

이와 같은 사고에 기초한 지식표현은 각 공구에 대응해

서 If-Then형식으로 표시가 가능함으로 프로덕션 룰 (Production rule)이 적당하다. 프로덕션 룰은 지식을 모듈화할 수 있으며, 새로운 지식을 추가하기 쉽다는 장점이 있다. 또한 추론방법으로는 알고 있는 사실에서 추론을 거듭하여 새로운 결론을 얻어 내는 전향추론(Forward inference)이 적당하다.

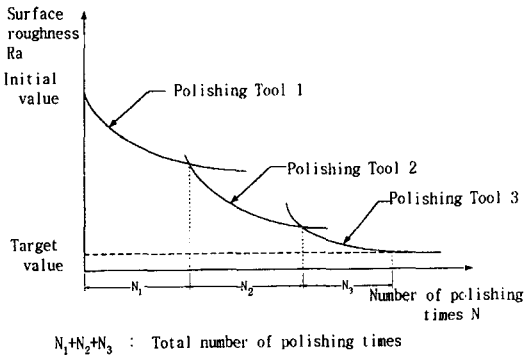


Fig. 13 Process of surface roughness in polishing operation

금형자동연마의 최적조건선정용 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 : 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 연구의 자동연마에 사용된 연마공구로는 연마시트 #100, #200, #400, #800와 CBN숫돌 #100, #200, #400, #600등 8종류를 사용했다. 각 연마공구에 대하여 연마실험을 수행하여 연마파라메타에 대한 표면거칠기곡선과 제거량직선을 구한다. 이 실험을 통하여 연마공구가 최종적으로 도달할 수 있는 최종표면거칠기  $R_e$ 와 거칠기

상수  $\alpha$  및 초기제거능률  $b_1$  등 연마공구에 대한 특성치 및 연마조건을 전문가시스템의 데이터베이스로 저장한다. 여기서, 최종표면거칠기  $R_e$  및 거칠기상수  $\alpha$ 는 지수함수곡선근사(Exponential curve fitting)로 구할 수 있으며, 초기제거능률  $b_1$ 도 제거량 직선에서 쉽게 구할 수 있다. 따라서 초기값으로서 전가공면 거칠기  $R_1$ 가 주어지면, 이 거칠기를 제거할 수 있는 연마공구가 선정되고, 표면거칠기가 선정된 공구의 최종표면거칠기  $R_e$ 의 약 90%에 도달할 수 있는 연마파라메타 값을 찾아 낸다. 즉, 표면거칠기가 약 90%정도 개선되므로 식(3)에서  $\exp(-\alpha \times P_c) = 0.1$ 로 할 수 있어 근사적으로 임계연마파라메타  $P_c$ 를 구할 수 있다. 즉,

$$H = b_1 \times P \quad (P \leq P_c) \quad (4)$$

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

이다. 따라서, 식(3)과 식(4)에서 임계연마파라메타  $P_c$ 에 대응하는 표면거칠기 및 제거량을 쉽게 구해진다.

현편, 가공면에 존재하는 최대골깊이  $R_v$ 는 제거량과 밀접한 관계가 있고, Fig. 14에 나타난 것과 같이 3가지 경우가 있다.

- (a)  $H < R_v(i-1)$  이고  $R_{v, std} < R_v(i-1) - H$  일 때,  
 $R_v(i) = R_v(i-1) - H$
- (b)  $H < R_v(i-1)$  이고  $R_{v, std} > R_v(i-1) + H$  일 때,  
 $R_v(i) = R_{v, std}$
- (c)  $H > R_v(i-1)$  일 때,  
 $R_v(i) = R_{v, std}$

여기서,  $R_v(i-1)$ 은 전(前)공정의 가공면에 남아 있는 최

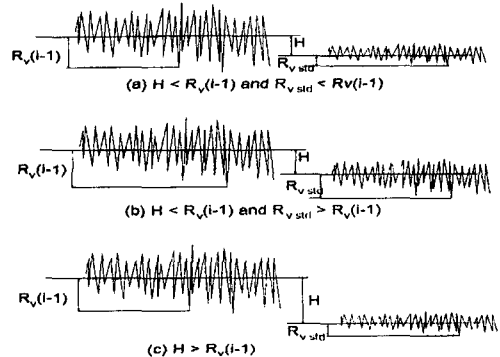


Fig. 14 Relation between removal depth and maximum profile valley depth

대골깊이이고,  $R_{v, std}$ 는 현재 사용중인 연마공구가 표준적으로 발생시키는 최대골깊이로 연마실험을 통해 획득된다. 또  $R(i)$ 는 현 단계의 연마가 종료하는 시점에서 가공면에 추정되는 최대골깊이다. 이와 같은 3가지 조건에 따라 가공후의 최대골깊이를 결정할 수 있다.

### 3.3 전문가시스템의 추론 기구

본 전문가시스템의 기본구조는 Fig. 15에 나타내었다. 우선, 전문가시스템의 사용자 인터페이스를 통하여 전(前)가공면의 표면거칠기와 최대골깊이를 초기표면상태로, 희망하는 연마면의 표면거칠기와 최대골깊이를 목표표면상태로 입력하면, 초기표면상태는 작업메모리(Working memory)에 현재의 표면상태로 저장되고, 추론엔진에서는 이 작업메모리와 지식베이스의 데이터를 이용하여 연마횟수가 가장 적게 되는, 현재 사용가능한 연마공구를 추론해 낸다. 그리고 이 공구로 얻을 수 있는 표면상태를 목표표면상태와 비교하여 그 상태에 도달하지 않았다면, 그 때의 표면상태를 작업메모리에 새로운 값으로 격납하고, 그 때 연마공구 및 연마횟수, 표면상태 값, 연마조건을 공정메모리에 저장한다. 그리고 다시 작업메모리와 지식베이스 데이터를 이용하여 똑같은 추론 작업을 계속한다. 추론은 목표표면상태에 도달할 때까지 계속하는데, 목표상태가 찾아지면 그 때까지의 연마공구의 종류 및 연마횟수, 연마파라메타(회전수/이송속도)를 공정메모리에서 출력하여 추론을 마친다. 또한, 지식획득 항목을 두어 프로그램 사용자가 연마실험을 통해 얻은 데이터를 입력하여 이를 프로그램의 지식베이스(Knowledge base)로 등록할 수 있도록 하였다.

전문가시스템도구(Expert system tool)로서 CLIPS, LIPS, EXSYS, Smart Elements 등 여러 가지가 있지만, 지식표현이 If-Then 방식의 프로덕션 룰로 간단하고 추론도 전향추론(Forward inference)으로 간단하여 절차형프로그래머 언어 C로 개발하여 일반 PC에서도 실행가능하고 금형자동연마에 전문적으로 사용할 수 있도록 했다.

추론엔진에서는 기본적인 동작으로 다음과 같은 4가지 실행을 1스텝으로 행한다.

- (1) 현재표면상태에 대해 지식베이스와 패턴매칭(Pattern matching)을 행한다.
- (2) 연마횟수가 최소가 되는 연마공구를 선정하도록 결합해소(Conflict resolution)를 행한다.
- (3) 프로덕션룰의 Then부를 실행하여 표면상태를 출력한다.
- (4) 현재 표면상태를 목표상태와 비교를 행한다.

Fig. 16은 본 시스템의 탐색트리구조를 나타낸 것으로 각 노드에서는 위의 1스텝의 동작을 반복실행한다. 탐색은 깊이우선탐색(Depth-first search)방법을 이용하는 데, 각 노드에서는 목표상태에 도달했는지 확인하고, 그렇지 않으면 현 표면상태를 효율적으로 제거할 수 있는 다음 연마공구를 선정한다. 이러한 동작은 목표상태에 도달할 때까지 반복한다. Fig. 16의 A3노드처럼 패턴매칭 룰(연마공구)을 발견할 수 없거나 목표노드(목표상태)에 도달하지 않은 경우 그 노드에서 백트랙(Backtrack)을 행하여 다음 가지(Branch)의 노드로 이동하여 목표상태에 도달할 때까지 탐색을 계속한다. A10노드에서처럼 목표상태에 도달했을 경우, 초기노드에서 목표노드까지 각 노드의 상태를 그대로 출력하면 최적연마공정이 구해지고추론은 종료된다. 하지만, 탐색하지 않은 미전개 노드에서도 목표노드가 존재할 가능성이 있기 때문에 한 목표노드가 발견된 시점에서 그 탐색경로의 각 노드의 상태값을 공정메모리에 저장하고, 마치 목표노드가 발견되지 않은 것처럼 강제적으로 앞 노드로 백트랙하여 다음 노드로 동일한 추론을 반복한다.

본 금형자동연마의 최적조건선정 프로그램에서는 요구하는 표면상태로 연마하기 위해 몇가지의 연마공정이 도출된다. 연마횟수가 최소인 가공순서로 연마할 경우 능률적이지만, 공정수와 공구상태 등의 평가기준을 시스템 사용자가 고려한다면 어느공정을 선택할 것인가는 사용자

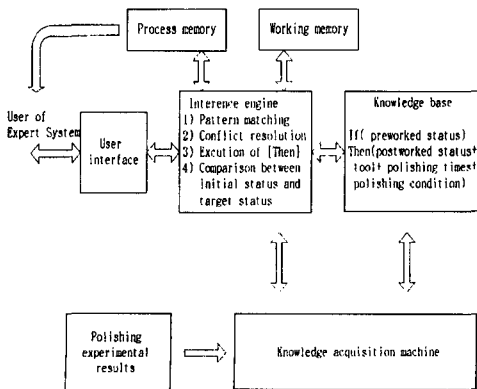


Fig. 15 Structure of expert system



에서 결정할 사항으로 생각하고, 가능한 모든 연마공정을 출력할 수 있도록 했다.

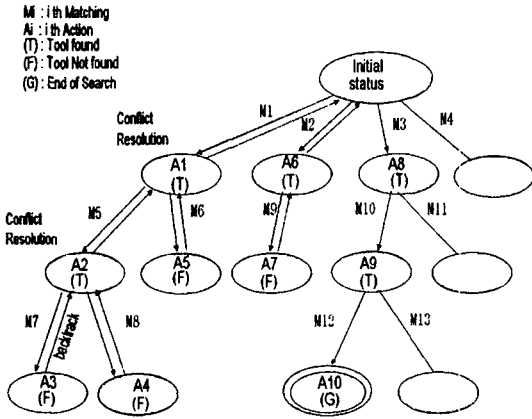


Fig. 16 Search procedure for optimum resolution

3.4 전문가시스템의 추론사례 및 검증

3.3절에서 개발된 전문가시스템의 추론예제로서 금형강(STD11)을 평면으로 절삭가공한 면에 대해 연마가공을 시험하였다. 평면의 표면거칠기는 중심선평균거칠기가 5.3 $\mu\text{m}$ 이고, 최대골깊이가 10.31 $\mu\text{m}$ 으로 표면거칠기가 0.5 $\mu\text{m}$  Ra, 최대골깊이가 1.5 $\mu\text{m}$ 이내에 들도록 연마공정을 추론하였다. Table 4는 본 시스템에 의해 드출된 추론사례로 세가지 공정 모두 4종류의 연마공구를 사용하고 있으며, 총 연마횟수가 35회, 37회, 64회로 나타나고 있다. Fig. 17은 추론공정의 연마공구를 사용했을 때 도달할 수 있는 표면상태변화를 나타내고 있다.

추론결과의 유효성을 검증하기 위해서 절삭가공한 평면에 대하여 연마가공실험을 하였다. Fig. 18은 추론결과와 실험결과를 비교한 그래프로 두 결과가 거의 일치하고 있음을 알 수 있다

Table 3 Processes estimated by expert system

	1st tool	2nd tool	3rd tool	4th tool	Total No.
Process 1	CBN #100 P = 3 N = 11	CBN #200 P = 3 N = 9	Sheet #200 P = 5 N = 10	Sheet #800 P = 5 N = 5	N = 35
Process 2	CBN #100 P = 3 N = 11	CBN #400 P = 3 N = 12	Sheet #200 P = 5 N = 9	Sheet #800 P = 5 N = 5	N = 37
Process 3	CBN #100 P = 3 N = 11	Sheet #100 P = 5 N = 38	Sheet #100 P = 5 N = 11	Sheet #800 P = 5 N = 5	N = 64

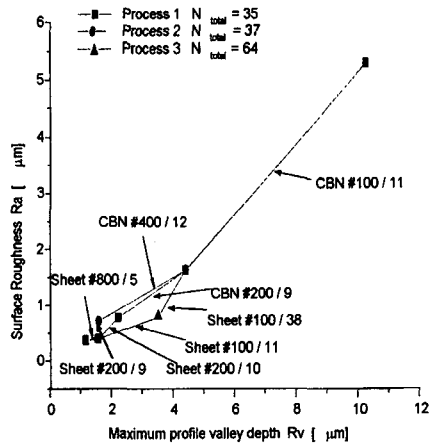


Fig. 17 Resolutions estimated by expert system

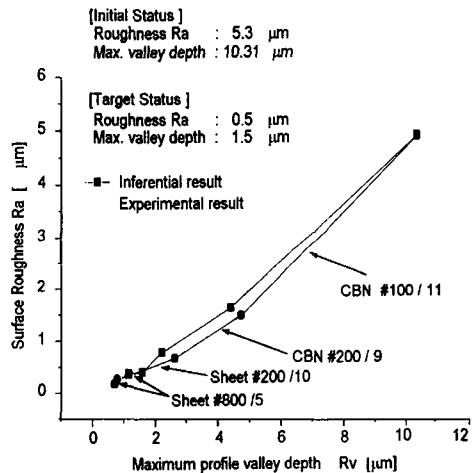


Fig. 18 Comparison of experimental result with inferential result

4. 결론

본 연구에서는 머시닝센터 장착형 Attachment를 고안하여, 이것을 이용한 자동연마실험으로 연마공구의 연마특성을 파악하고, 이를 지식베이스로 하는 금형자동연마 최적조건선정용 전문가시스템을 개발하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 금형자동연마를 위해 3축 제어 머시닝센터의 주축부에 장착할 수 있는 Attachment를 개발하여, 절삭가공 후 공작물의 탈착이 필요없이 금형의 정밀도를 유지시킬 수 있고, 또한 머시닝센터의 공구매거진에 장

착할 수 있어 연마공구의 자동공구교환으로 금형연마 공정의 자동화에 유리하다. 따라서 전체 금형제조공정 시간을 단축시킬 수 있다.

- 2) 연마파라메타 P를 도입하여 회전수, 이송속도, 연마 횟수를 통합적으로 취급할 수 있고, 또한 표면거칠기와의 관계가 지수함수식으로 표현이 가능하며, 제거량도 두 직선으로 근사가 가능하다. 임계연마파라메타Pc가 존재하여 그 이상 연마횟수를 늘려도 거칠기는 더 이상 좋아지지 않는다.
- 3) 연마공구의 연마특성을 지식베이스에 등록하고, 전(前)가공면 및 요구표면상태를 입력하면, 연마공구, 사용순서, 연마횟수, 연마파라메타(이송속도/회전수)를 교시하는 최적조건선정 전문가시스템을 개발하였고, 검증실험을 통하여 그 유효성을 확인하였다.

추후연구로 연마가공에 많은 영향을 미치는 가공변수로써 전가공면의 가공방법, 공작물의 재질, 연마패턴, 연마공구의 종류 등 이런 변수들을 고려한 연마특성실험도 병행하여 전문가시스템의 지식베이스로 활용해야 할 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

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, Vol. 57, No. 3, pp. 497-503, 1991.

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, Vol. 57, No. 12, pp. 2151-2156, 1991.
3. 정재현, “부산·경남지역의 금형산업 현황”, 정밀정형 및 금형가공 연구센터 한-일 워크샵, pp. 92-111, 1994.
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気研磨”, 砥粒加工學會學術講演會講演文集, pp. 315-318, 1995.
6. 幸田盛堂, 態谷幹人 他2名, “金型磨き面の表面性状評價”, 砥粒加工學會學術講演會講演文集, pp. 413-414, 1995.
7. 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, Vol. 58, No. 12, pp. 2037-2043, 1992.
8. 이용철, 安齋正博, 中川威雄, “금형면의 자기연마가공 고효율화에 관한 연구”, 한국정밀공학회지, Vol. 13, No. 6, pp. 59-65, 1996.
9. 정재현, “금형곡면의 연마가공 시스템”, 부산대학교 ERC 연구결과보고서, 1995.