

# 최적 금형연마 가공을 위한 센서 정보 통합 전문가 시스템 개발

안중환\*, 김화영\*, 申云峰\*\*, 정해도\*, 조규갑\*\*\*

## Development of a Sensor Information Integrated Expert System for Optimizing Die Polishing

Jung-Hwan Ahn\*, Hwa-Young Kim\*, Yun-Feng Shen\*\*, Hae-Do Jeong\*, Kyu-Kab Cho\*\*\*

### Abstract

This paper presents a polishing expert system integrated with sensor information which can modify the polishing sequence and conditions initially determined by the system depending on the on-site polishing status. A practical system using AE sensor to detect the on-line polishing status is developed for the rotational polishing and the smoothly curved surface. Database and knowledge base for polishing processes are established by using the results of experiments and also expert's experience. Evaluations are performed for a die of headlight lamp by using both the sensor integrated expert system and the expert system without sensor. The test results show that the sensor integrated expert system provides more optimal polishing conditions since the proposed system takes advantage of the on-line sensor information.

**Key Words :** A sensor information integrated expert system(센서 정보 통합 전문가 시스템), Die polishing(금형연마), AE sensor(AE센서)

### 1. 서 론

금형 연마 기술은 최종 제품의 품질을 결정짓는데 매우 중요한 기술로 전체 금형 제작 시간의 약 30~50%를 차지한다.<sup>(1)</sup> CNC 공작기계 등을 이용하는 금형 기계 가공 공정과 달리 금형의 연마공정은 많은 경험과 숙련자의 기술을 필요로 하고 표준화가 어렵기 때문에 대부분의 경우

작업자에 의한 수작업에 의존하고 있다. 특히 연마 가공의 자동화에 있어서 가장 어려운 문제는 최적의 연마 순서와 조건을 결정하는 것이다.<sup>(2)</sup>

몇몇 연구자들에 의해 전문가 시스템을 이용하여 연마 조건 및 순서를 결정하는 방법에 대한 연구들이 수행되었으나<sup>(3,4)</sup>, 이전 연구들은 주로 많은 실험 데이터와 지식(knowledge)들로 구성된 지식 베이스(knowledge base)를

\* 부산대학교 기계공학부, 정밀정형 및 금형가공 연구센터  
\*\* 부산대학교 대학원 지능기계공학과  
\*\*\* 부산대학교 산업공학과

구축하고, 이 지식 베이스와 추론 기구를 이용하여 오프라인으로 연마 조건 및 연마 순서들을 결정하는 방법을 취하고 있다. 이 방법은 오프라인상에서 연마 조건 및 순서를 결정하기 때문에 실제 연마 가공 중 연마 방향, 연마 압력, 표면 상태 등과 같은 온라인 조건들이 약간만 변해도 적합하지 못하게 되는 단점을 갖고 있다.

한편, 전문가들은 작업 준비 단계에서 이전의 경험과 지식을 바탕으로 미리 최적이라고 생각되는 일련의 연마 순서와 조건들을 준비한 채 작업을 시작하나 작업 중 감각 기관으로부터 들어오는 정보들을 이용하여 실시간으로 연마 순서와 조건들을 바꾸어 가며 작업을 수행한다. 이 점이 자동 연마기와 같은 기계적 장치를 이용한 자동 연마보다 숙련공에 의한 수연마의 장점이다.

본 연구에서는 숙련공이 촉각으로 연마면의 상태를 판단하는 것을 대신하여 AE 센서를 사용하여 연마면의 상태를 간접적으로 검출하였으며, 검출한 AE 신호 정보를 통합한 전문가 시스템에서 최적의 연마 순서 및 조건을 도출해 낸다. 오프라인 전문가 시스템에서 얻어지는 연마 순서와 조건들은 AE 센서에서 피드백되는 신호에 의해 추정되는 현재 연마 상태에 따라서 변경될 수 있다. 본 연구에서는 AE 센서정보가 통합된 전문가 시스템을 설계하였으며, 제안된 전문가 시스템의 성능을 평가하기 위해 연마 실험을 통해 센서 정보가 없는 전문가 시스템에 의해 얻어지는 결과와 비교하였다.

## 2. 금형 연마 전문가 시스템

### 2.1 숙련공에 의한 수연마의 특성

숙련된 작업자는 기계 가공으로 인해서 표면에 많은 커스프(cusp)와 긁힘(scratch)이 있는 금형을 원하는 금형면으로 만들기 위해 자신의 경험에 근거해서 최적의 금형 연마 순서를 계획한다. 먼저, 다소 굵고 거친 입도의 연마 공구를 선택해서 이 공구로 더 이상 표면을 부드럽게 할 수 없을 때까지 연마를 한다. 그리고 나서 이전 것보다 좀 더 가는 입도의 연마 공구를 선택해서 다시 연마를 수행하며 이런 과정은 목표로 하는 표면 상태가 얻어질 때까지 계속 반복된다.

Fig. 1은 숙련공이 적절한 연마 주기로 연마 공구를 바꾸어 가면서 초기의 표면 거칠기로부터 목표하는 표면 거칠기를 얻어 가는 과정을 도식적으로 보여주는 예이다. 이때 각 연마 공구를 교체하는 최적의 시기는 작업자의 판단에 달려있고, 기본적으로 작업자의 경험과 지식뿐만 아니

라 눈과 손가락과 같은 감각기관으로부터의 정보를 이용하여 유연하게 판단한다. 이 점이 전문가 시스템에 의해 오프라인상에서 결정된 연마조건과 순서에 따라 기계적으로 공구 교체 시기를 결정하는 자동연마와의 차이점이다.

따라서, 숙련공에 의한 연마의 특성을 자동연마에 도입하기 위해서는 전문가 시스템에 의해 결정된 연마상태에 따라 적절하게 바꿀 수 있어야 한다.

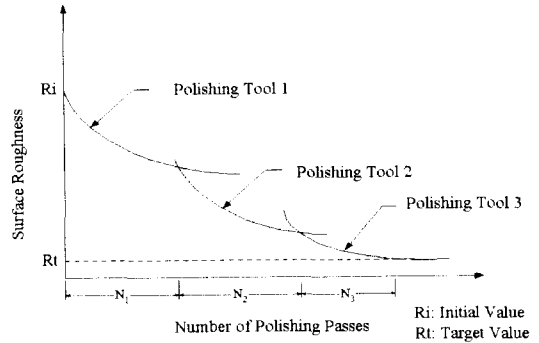


Fig. 1 Diminishment of surface roughness

### 2.2 센서 정보 통합 전문가 시스템의 구조

Fig. 2는 AE 센서 정보가 통합된 금형 연마 전문가 시스템의 구조를 나타낸다. 본 시스템은 사용자 인터페이스, 금형 연마용 지식베이스, 추론 엔진, AE 감시부로 구성된다.

사용자 인터페이스를 통해 표면 거칠기의 초기값과 목표값이 입력되면 추론 엔진에서 회전속도, 이송량, 압력, 공구 입도, 전체 연마 공정에 대한 연마 시간을 포함한 최적의 연마 순서가 도출된다.

전문가 시스템에서 출력된 연마 순서에 따라 연마가 진행되는 동안 AE 감시부는 연마 작업 중 감지되는 AE 신호를 이용하여 각 연마 공구가 원하는 대로 적절하게 연마하고 있는지를 감시한다. AE 신호의 감소율이 경계값보다 작으면 현재 사용중인 연마공구로 도달할 수 있는 면에 도달한 것으로 간주하여 비록 전문가시스템에서 지령

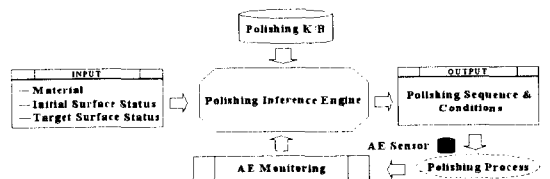


Fig. 2 Structure of the AE sensor integrated polishing expert system

한 연마횟수가 아직 남아 있더라도 다음 연마 공구로 교체한다. 또한 전문가 시스템에서 지시한 공구교환 시점에 도달했다라도 AE 신호의 감소율이 경계값보다 크면 현 공구를 이용한 연마가공을 더 실시하도록 한다.

### 2.3 연마용 지식 베이스

지식 베이스에는 전문가의 경험에서 나오는 지식뿐만 아니라 관련된 데이터북에서 얻어지는 연마 지식과 실험 데이터가 포함된다. 지식은 생산 규칙(production rule)의 형식으로 표시하였다.

#### 2.3.1 지식 획득

최적의 연마 순서를 얻기 위해서는 공구 입도와 연마 시간의 적절한 결정이 매우 중요하다. 각 공구의 연마 시간은 식(2.1)에서 정의된 것처럼 연마에 관여하는 연마 입자의 총량(total amount of abrasive grains : TAG)과 관계가 있다.<sup>6)</sup>

$$TAG = N \times S / F \quad (2.1)$$

여기서 N은 연마 경로 횟수이고, S는 주축 회전 속도, F는 이송량을 나타낸다. Fig. 3에서 표현된 것처럼 각 연마 공구와 금형 재료의 조합에 따른 표면 거칠기 R과 TAG의 관계는 식 (2.2)와 같이 근사적으로 표현될 수 있다.<sup>6)</sup>

$$R = (R_s - R_c) \exp(-\alpha \times TAG) + R_c \quad (2.2)$$

여기서  $R_c$ 는 목표 표면 거칠기이고,  $R_s$ 는 초기 표면 거칠기이다. 그리고,  $\alpha$ 는 거칠기 감쇠 계수이다.  $R_c$ 와  $\alpha$ 는 Fig. 4처럼 사용하는 연마 공구와 금형 재료에 따라 특정한 값을 갖는다. 표면 거칠기가 임계값  $R_c$ 에 도달하는 시간, 즉  $R_s$ 와의 표면 거칠기의 차이 ( $R_s - R_c$ )가 90%인 지

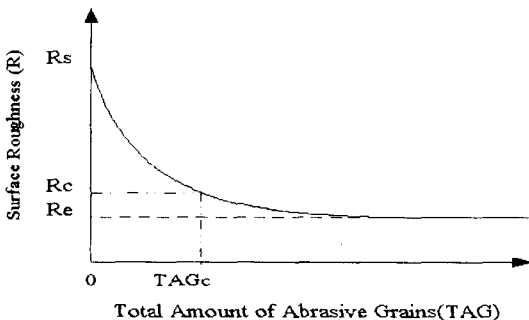


Fig. 3 Surface roughness curve along with polishing time in terms of TAG

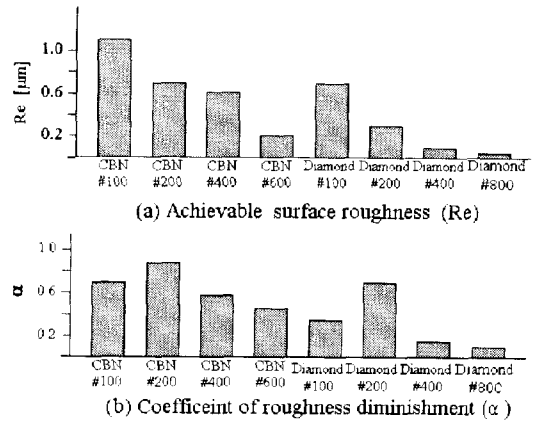


Fig. 4 Characteristic values of polishing tools for the die material of SKD11

점에 도달하는 시간이 공구 교환을 위한 최적의 시간인 것으로 간주하며 이 때의 TAG가 임계값 TAG<sub>c</sub>로 정의하였다.<sup>6)</sup> 초기 표면 거칠기와 연마 공구가 주어진다면 각 공구로 도달 할 수 있는 표면 거칠기까지 도달하는데 필요로 하는 연마 횟수가 식 (2.1)과 (2.2)에 의해서 결정된다.

Fig. 4는 다양한 연마 조건에서의 연마 실험을 통해서 본 연구에서 소재로 사용한 금형재인 SKD11에 대한 각 연마 공구의 특성치들을 나타낸다.

#### 2.3.2 지식 표현

지식은 Table 1과 같이 생산 규칙(production rules)의 형식으로 표현되며 Fig. 5는 제한한 전문가 시스템을 위한 지식 베이스의 구조를 나타낸다. 만약 초기 표면 거칠기가 지식 베이스내의 규칙들의 IF 부분에 있는 하한 R<sub>min</sub>과 상한 R<sub>max</sub>사이에 존재한다면, 임계값 TAG는 THEN 부분에 있는 연마 공구의 특성치와 식 (2.1)과 (2.2)를 이용해서 계산할 수 있다.

Table 1 Rule Format in Knowledge Base

IF	THEN
<ul style="list-style-type: none"> <li>Lower limit of premachined surface roughness (R<sub>min</sub>)</li> <li>Upper limit of premachined surface roughness (R<sub>max</sub>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Polishing tool</li> <li>Grain size(Mesh #)</li> <li>Achievable surface roughness (Re)</li> <li>Coefficient of roughness diminishment(α)</li> </ul>

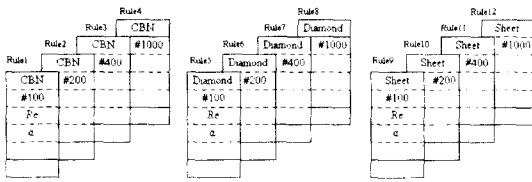


Fig. 5 Structure of knowledge base

2.4 추론 엔진

추론 엔진은 두 개의 모듈로 구성하였다. 하나는 최적 연마 순서의 오프라인상의 결정을 위한 모듈이고, 다른 하나는 AE 센서 정보를 이용하여 연마 순서의 온라인상의 수정을 위한 모듈이다.

2.4.1 최적연마 순서를 위한 오프라인상의 결정

기계 가공된 전가공면의 표면 거칠기와 목표로 하는 표면 거칠기가 전문가 시스템에 입력되면, 다음과 같은 추론 단계를 거쳐 최적의 연마 순서가 도출된다.

- [Step 1] 지식 베이스에 있는 규칙들을 이용해서, 전 가공면을 연마할 수 있는 모든 후보들을 선택한다.
- [Step 2] 이들 중에서 최소한의 연마 경로들을 가지는 한 가지 경우를 제외하고는 모두 취소한다.
- [Step 3] 선택된 후보로 얻을 수 있는 표면 거칠기를 얻기 위해 프로덕션 규칙의 THEN 부분을 실행한다.
- [Step 4] Step 3에서 얻어진 표면 거칠기가 목표로 하는 표면 거칠기와 같은지 혹은 그보다 더 나은지 확인한다.

Fig. 6은 최적의 연마 순서를 찾기 위한 탐색 트리의 구조를 보여준다. 전방 추론 방법(forward chaining method) 중 하나인 깊이 우선 탐색법(depth first search method)을 검색 알고리즘으로 사용하였다. 이 방법은 초기 상태에서

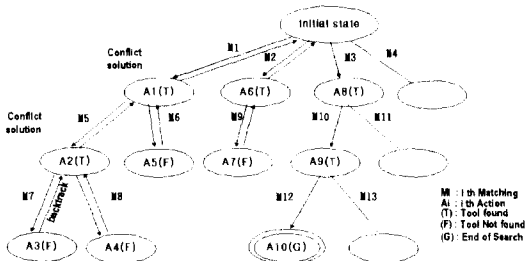


Fig. 6 Search tree for finding optimal solutions

시작해서 원하는 상태가 발견될 때까지 계속해서 탐색해 나간다. 예를 들어, 어떠한 후보도 발견되지 않거나 노드 A3에서와 같이 끝까지 갔는데도 목표에 도달할 수 없다면, A4로 되돌아와 계속 추적하며 같은 과정을 반복해서 수행한다. 즉, 가지내의 모든 노드를 통과하여 더 이상 갈 노드가 없다면, 다음 가지로 이동해서 목표가 도달될 때까지 계속된다. 만일 목표가 노드 A10에서와 같이 도달된다면, 도달한 가지 상에 있는 모든 노드들은 선택 가능한 일련의 연마 순서가 된다. 같은 방법으로 탐색 트리 내의 나머지 가지들도 검색한 후에 선택 가능한 일련의 연마 순서들을 모두 얻는다. 최종적으로 최소의 경로를 가진 연마 순서의 쌍이 가장 최적의 것으로 선택된다.

2.4.2 연마 순서에 대한 온라인상의 수정

추론 기구의 오프라인상의 모듈에 의해 결정되는 각 연마 공구의 연마 횟수는 절대적인 것이 아니고 실시간 연마 상태에 따라서 변경될 수 있다. 온라인상의 수정은 AE 신호를 이용한 실시간 연마 상태에 대한 평가에 근거해서 행해진다. 연마 중 연마면으로부터 검출한 AE 신호는 연마면의 상태를 잘 나타내며,<sup>(6)</sup> 연마면이 거칠수록 진폭이 커진다. Fig. 7은 연마 경로들을 수정하는 절차를 보여준다. 이전의 AE 레벨에 비해 현재의 AE 레벨의 감소율이 미리 설정된 경계값(threshold) 보다 작으면 임계값 TAG에 도달한 것으로 간주하고 그 때 공구를 교체한다. 경계값은 각 연마공구를 이용한 실험을 통해 미리 구하였으며

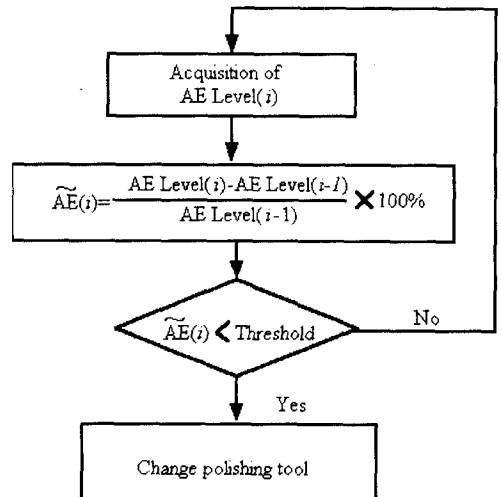


Fig. 7 Procedure of on-line modification algorithm

본 연구의 경우 감소율이 10% 이하이면 공구 교환시기로 간주하였다.<sup>(7)</sup>

### 3. 실험 및 고찰

#### 3.1 실험 장치

##### 3.1.1 연마 공구

수직형 머시닝 센터에서 연마 실험을 수행하였다. 연마 실험을 위해 머시닝 센터의 주축에 쉽게 장착할 수 있는 연마 공구 헤드를 특별히 제작하였다. Fig. 8은 본 연구에서 제작한 머시닝 센터 장착형 연마 공구헤드의 구조를 나타낸다. 유니버설 조인트, 스프링, 볼 스플라인 축과 아버로 구성되어 있으며 유니버설 조인트로 연마 공구가 항상 표면에 수직으로 접촉하도록 한다. 스프링 상수 3.9N/mm인 스프링을 이용하여 연마 압력을 조정하고 유지한다. 볼 스플라인 축은 주축 토크를 연마 공구로 전달하는 역할을 한다.

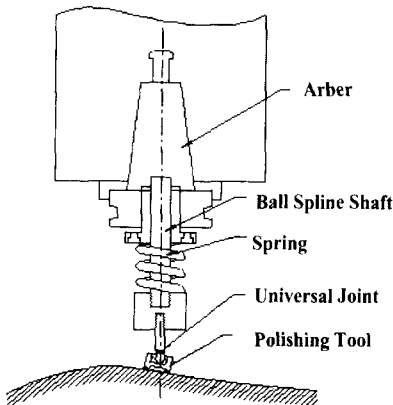


Fig. 8 Structure of polishing tool head attached to machining center

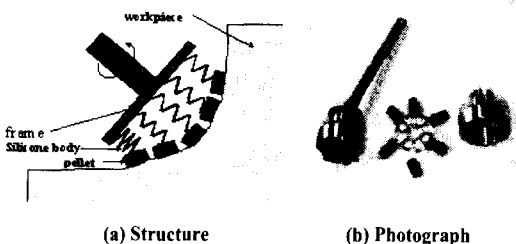


Fig. 9 Structure of elastic polishing tool(EPT)

사용하는 연마 공구의 곡면 적응성과 연마 효율을 향상시키기 위해서 Fig. 9와 같은 탄성 연마 공구(elastic pellet tool: EPT)를 개발하여 사용하였다. Fig. 9는 개발한 탄성공구(EPT)의 구조와 사진을 나타낸다. 탄성공구는 다이아몬드 펠렛과 펠렛을 탄성적으로 지지하기 위한 부드러운 실리콘 물체를 결합시킨 단단한 금속/합성수지로 구성되어 있다.

##### 3.1.2 AE 신호처리

Fig. 10은 본 연구에서 사용한 연마가공 중 AE 신호 측정을 위한 장치도이다. 전하 증폭기가 내장된 AE 센서(NANO30)를 공작물의 측면에 장착하여 신호를 검출하였다. 검출된 AE 신호는 증폭기로 증폭하고 1kHz의 차단 주파수를 가진 고대역 통과 필터(HPF)로 필터링한 후 RMS 컨버터를 통해서 변환한다. 최종적으로 전문가 시스템에서의 AE 감시를 위해 AErms 신호는 A/D 변환기를 거쳐 컴퓨터로 읽어 들인다.

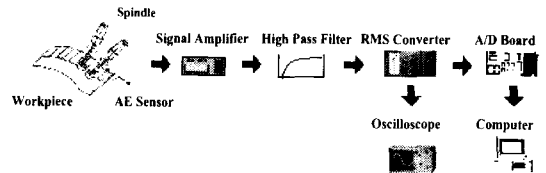


Fig. 10 Equipment for AE measurement

##### 3.1.3 AE 신호와 표면 거칠기

AE 신호는 소재 제거율(Material Removal Rate: MRR)과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 연마에서 소재 제거율은 다른 기계 가공 공정들에 비하면 상대적으로

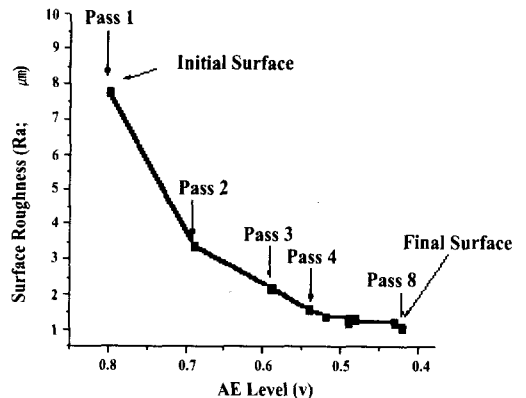


Fig. 11 AE level and surface roughness during a sample polishing with tools of mesh #100

작으며 기계 가공된 전가공면 상태에 상당히 의존한다. 가공면이 거칠수록 소재 제거율은 더 커지고 AE 레벨도 증가한다. Fig. 11은 표면 거칠기가 7.65Ra인 가공면에 #100인 연마 공구로 연마하는 동안의 AE 값의 변화 경향을 나타낸다. Fig. 11로부터 AE 레벨의 변화 추세를 이용하여 연마면 상태와 MRR을 간접적으로 추정할 수 있음을 알 수 있다.

**3.2 실험 결과와 고찰**

**3.2.1 센서 정보의 피드백 없는 전문가 시스템을 이용한 실험**

평가 실험을 위해서, Fig. 12와 같이 재료가 SKD11인 자동차 헤드라이트 램프 금형(주형)을 사용하였다. 기계 가공된 전가공면의 표면 거칠기가 8.26Ra이고 목표로 하는 표면 거칠기는 0.025Ra이다. 양쪽 상태 모두를 센서 정보의 피드백이 없는 일반적인 전문가 시스템에 입력했을 때, Table 2의 연마순서(I)이 생성되었다.

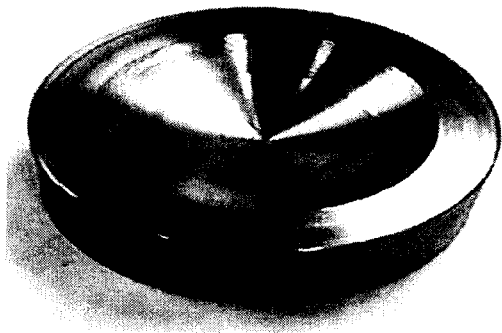


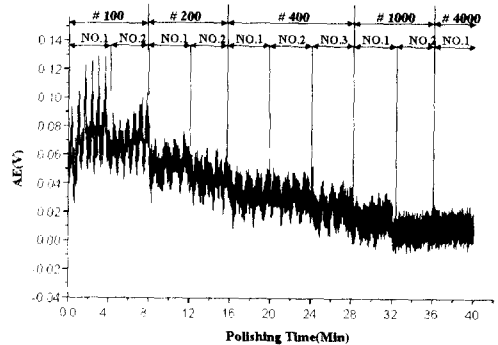
Fig. 12 Photograph of a die for car headlight lamp

Fig. 13(a)는 Table 2의 연마순서(I)를 따라 연마 작업을 진행하는 동안에 검출된 AE 레벨의 변화를 나타내며 Fig. 13(b)는 각 연마작업 후에 얻어지는 표면 거칠기를 보여준다.

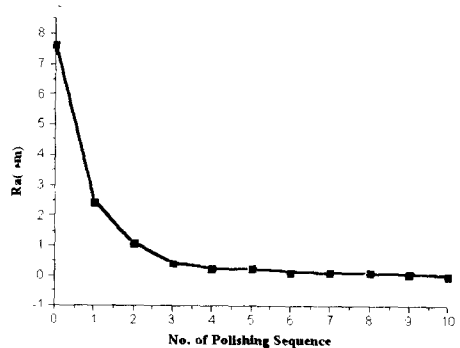
#100 입도의 공구를 사용한 처음 두 번의 연마 경로에서, 표면 거칠기는 1.0Ra로 급속히 감소해 가며 점점 더 가는 입도를 사용함에 따라 점차적으로 느리게 감소해간다. 연마 순서 (I)로 연마한 결과 총 10회 연마로 목표 거칠기 0.025Ra보다 조금 더 부드러운 0.023Ra를 얻을 수 있었다.

**Table 2 Polishing sequence and conditions resulted by expert systems**

		#100	#200	#400	#1000	#4000
Polishing Sequence (I)	Number of passes	2	2	3	2	1
	Pressure (kgf/cm <sup>2</sup> )	6.09	3.80	3.43	3.02	2.88
	Spindle speed (rpm)	600	800	800	900	1000
Polishing Sequence (II)	Number of passes	2	3	1	1	2
	Pressure (kgf/cm <sup>2</sup> )	6.09	3.80	3.43	3.02	2.88
	Spindle speed (rpm)	600	800	800	900	1000



(a) AE level



(b) Surface roughness

**Fig. 13 Results of polishing by the expert system without sensor information**

### 3.2.2 AE센서 정보를 통합한 전문가 시스템을 이용한 실험

본 연구에서 개발된 AE 센서 정보 통합 전문가 시스템을 이용해서 같은 연마 실험을 수행하였다. 전문가 시스템을 제외한 모든 초기 조건들은 이전의 실험과 완전히 동일하며, 현재 사용중인 연마공구의 교체는 AE 레벨의 감소율을 이용하여 각 연마 순서의 끝에서 실시간 연마 상태를 판단하여 결정하였다. 현 연마면의 상태를 AE 신호로 받아 판단하면서 연마 작업을 수행하였다.

Table 2의 연마 순서 (II)는 AE 신호의 피드백을 통해 얻은 새로운 연마 순서이다. 연마 순서(I)과 비교해 볼 때, #200, #4000에서 횡수가 각각 1회 늘어났고, #400, #1000에서 각각 2회, 1회 줄어들어 전체적으로 연마 횡수가 9회로 연마 순서 (I)에 비해 전체 횡수가 하나 줄어들었음을 보여준다. Fig. 14는 연마 순서(II)에 따른 작업

중 검출된 AE 레벨과 얻어지는 표면 거칠기를 나타낸다. Fig. 13에서의 결과와 비교해서 전체 연마 시간은 약4분 감소되었으며 최종 표면 거칠기는 이전의 것과 거의 같은 0.023Ra가 얻어진다. 현 연마 상태를 나타내는 온라인 센서 신호를 이용함으로써 좀더 최적의 방법으로 연마를 수행할 수 있음을 알 수 있다.

## 4. 결론

본 연구에서, 최적 금형 연마 공정을 위한 센서 정보가 통합된 전문가 시스템을 제안하였으며 실제 금형을 대상으로 한 평가 실험을 통해서 제안한 전문가 시스템의 성능을 평가하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

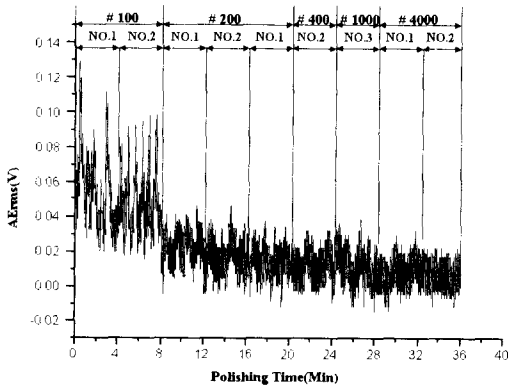
- (1) AE센서 정보가 통합된 연마용 전문가 시스템을 개발하였으며, 제안한 시스템에 초기 표면 상태와 최종 표면 상태를 입력하면 신뢰성 높은 연마 순서를 도출할 수 있음을 알았다.
- (2) AE 신호를 이용한 실시간 연마면 상태 감시를 통해 연마 순서와 조건을 수정하므로 실제 상황에 좀더 맞는 최적의 연마 순서와 조건을 얻을 수 있었다.
- (3) 센서 정보를 통합한 전문가 시스템이 센서 정보가 없이 오프라인상에서 연마 순서와 회수를 결정하는 전문가 시스템의 결점을 보상해줄 수 있음을 보여준다.

## 후 기

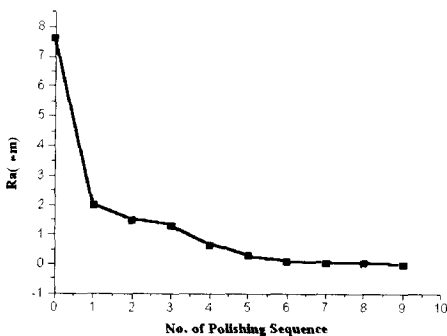
본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터(ERC/NSDM)의 지원을 받아 수행하였으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Saito. K., "Finishing and polishing of freeform surface", Bulletin of Japan Society of Precision Engineering, vol. 18, No. 2, pp. 104-109, 1984.
- (2) Kang. M. and Kim. S. G., "CIM for mold factory automation", Annals of the CIRP, vol. 39, No. 1, pp. 59-62, 1990.
- (3) Sasaki. T., Miyoshi .T., Saito. K., et. al. "Knowledge acquisition and automation of polishing operations for injection mold (1st report): Hand polishing prop-



(a) AE level



(b) Surface roughness

Fig. 14 Results of polishing by the sensor integrated expert system

- erties of a skilled machinist”, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, vol. 57, No. 3, pp. 497-503, 1991.(in Japanese)
- (4) Sasaki. T., Miyoshi .T., Saito. K., et, al. “Knowledge acquisition and automation of polishing operations for injection mold (2nd report): Expert system for mold and die polishing operation”, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, vol. 57, No. 12, pp. 2151-2156, 1991. (in Japanese)
- (5) Sasaki. T., Miyoshi .T., Saito. K., et, al. “Knowledge acquisition and automation of polishing operations for injection mold (3rd Report): Development and construction of automatic polishing apparatus”, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, vol. 58, No. 12, pp. 2037- 2043, 1992.(in Japanese)
- (6) 이두찬, 정해도, 안중환, 三好隆志, "자동금형 연마의 최적 조건 선정 전문가 시스템 개발", 한국 정밀공학회지, vol 14, No. 10, pp. 58-67, 1997.
- (7) 박상서, 김화영, 안중환, "AE센서를 이용한 연마 슷들 교체 시기에 관한 연구", 대한기계학회 98년도 추계 생산 및 설계 공학 부문 학술 강연회 논문집, pp. 17-22, 1998.