

금형면 자동 다듬질 전문가 시스템 개발에 관한 연구-II -통합 연마 파라미터를 사용한 최적 가공 구현 및 전문가 시스템 구축-

민헌식*, 이성환**, 안유민**, 조남규**, 한창수**

Development of an Expert System for Optimizing Die and Mold Polishing-II

Huen-Sick Min*, Seoung-Hwan Lee**, Yoo-Min Ahn**, Nahm-Gyoo Cho**, Chang-Soo Han**

Abstract

To reduce the cost and increase reliability of die and mold products, automation of the finishing (polishing) process is essential. A major element of automation is a reliable database and a knowledge base for polishing status. This paper presents a polishing expert system which can determine optimal polishing sequences and conditions by using an empirical formula and an experimental database. The simplex method was used for the curve fittings of the experimental results. Also a graphical user interface, which visualizes the optimized results, was developed.

Key Words : Polishing Automation(연마 자동화), Polishing Parameter(연마 파라미터), Polishing Expert System(전문가 시스템), Downhill Simplex Method(심플렉스 메소드)

1. 서론

연마 자동화에 있어서, 연마 가공조건에 대한 효율적 D/B 구축은 가공기구부의 개발과 더불어 필수적인 과제이다. 이 경우 고품위의 표면을 얻기 위한 일련의 연마조건을 어떻게 재현성 높은 데이터 베이스로 구축하고, 최적화된 가공 조건을 산출하느냐가 관건이 된다⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾. Sasaki⁽¹⁾는 연마가공의 가공조건과 표면의 품위와의 관계

를 일반적이고 광범위하게 적용될 수 있는 통합적 연마 파라미터를 제안하였고, 조⁽⁵⁾는 이를 바탕으로, 연마 공정을 Cusp 제거 공정과 경면 가공의 두 단계로 분리하여 D/B를 구축하고, 그에 대한 타당성을 검토하였다.

정^{(6),(7)}은 초기 표면 거칠기와 목표 표면 거칠기의 입력을 통한 최적 경로를 산출하는 전문가 시스템에 대한 연구를 하였다. 본 연구에서는 “금형면 자동 다듬질 전문가 시스템 개발에 관한 연구-I”에서 얻은 실험결과를 토대로 그 결과

* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과
** 한양대학교 기계공학부
(이성환 sunglee@hanyang.ac.kr)

를 Cusp제거 공정과 경면 가공공정으로 구분하여 D/B로 구축하고 통합적 연마 파라미터를 이용한 실험식으로 표현하여, 이를 바탕으로 최적화된 가공조건을 산출하는 금형면 자동 다듬질 전문가 시스템을 개발하였다.

2. 연마 가공의 실험적 D/B 구축

Table 1, 2는 실험한 연마 조건을 정리한 것이다. 본 연구에서는 가공 변수 중 수직 가공력이 일정하다는 가정 하에, 연마포의 입도, 회전식 연마 공구의 회전속도, 진동식 연마 공구의 주파수, 이송속도를 가공 파라미터로 고려하였다.

Table 1 Polishing conditions for the rotational type

(a) Conditions for removing cusp

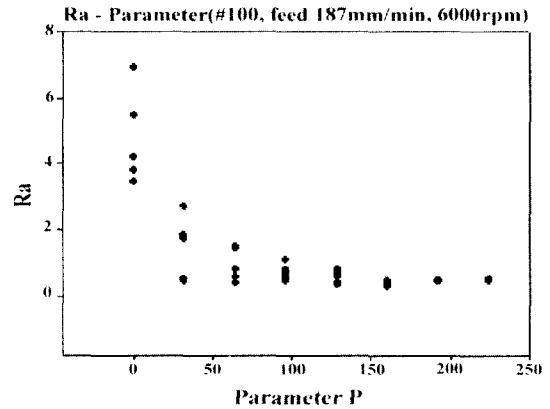
Condition	Mesh	Rotation speed: S [rpm]	Feed rate: F [mm/min]	Pick feed: p [mm]	Normal force [N]
#1	#60	5000	187	3.9	15
#2	#60	6000	187	3.9	15
#3	#100	5000	187	3.9	15
#4	#100	6000	127	3.9	15
#5	#100	6000	187	3.9	15

(b) Conditions for fine surface finishing

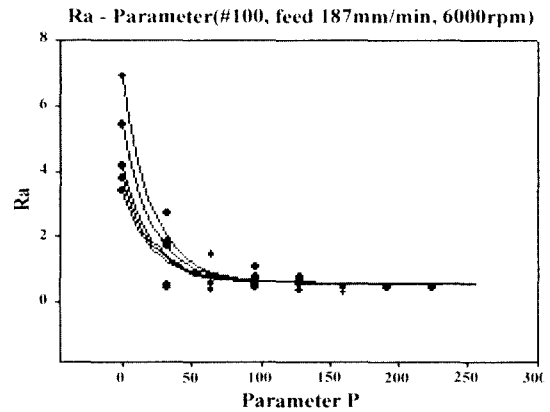
Condition	Mesh	Rotation speed: S [rpm]	Feed rate: F [mm/min]	Pick feed: p [mm]	Normal force [N]
#1	#200	5000	127	2.5	15
#2	#400	6000	127	2.5	15
#3	#800	5000	127	2.5	15
#4	#1000	6000	127	2.5	15

Table 2 Polishing conditions for the vibrational processes

Condition	Feed rate: F [mm/min]	Frequency [kHz]
#1	41	20
#2	22	20



(a) Before



(b) After

Fig. 1 Curve fitting

2.1 실험식을 이용한 D/B 구축

연마 가공시 가공회수에 따른 표면 거칠기의 가공 궤적은 지수 함수적으로 감소되는 것으로 알려져 있다. 실험 데이터를 수식화하는 방법으로서 Sasaki⁽⁸⁾는 통합 연마 파라미터 사용을 제안하였으며, 그 결과를 식(1)과 같은 지수함수로 표현하였다.

$$Ra = Ra_f + (Ra_i - Ra_f) \times e^{(-\alpha P)} \quad (1)$$

여기서, P는 통합 연마 파라미터($P = S \times N / F$)이고 Ra는 표면 거칠기, α 는 실험 상수, N는 가공 회수, S는 공구 회전속도, F는 이송 속도를 말한다. 또 Ra_i , Ra_f 는 각각 Ra의 초기값 및 수렴치이다.

실험 데이터를 식(1)과 같은 함수 형태로 수치 해석을 할 경우 수치 해석 적용 대상 범위에 따라 다른 실험식을 얻게 된다.

즉, 연마 실험 결과를 데이터 베이스화하기 위하여 1) 실험에 사용된 중요 가공 변수들에 대한 표면 거칠기를 가공 회수를 기준으로 표시하는 방법과 2) 통합적 연마 파라미터를 기준으로 표시하는 방법이 적용될 수 있는데, 전자의 경우 Fig. 1 같이 가공조건 4개인 경우에 각기 다른 Ra 값과 α 값을 갖는 실험식 4개가 생기게 된다. 이 방식의 장점은 특정 가공조건에 대해서는 초기 표면 거칠기(Ra_i)가 달라도 큰 오차없이 실험식을 적용할 있는 점이다. 또, 후자의 경우에는 4개의 실험 결과가 연마포의 입도에 종속되는 1개의 Ra 값과 α 값을 갖는 실험식을 얻게 되는데, 이 경우는 종속 조건이 연마포의 Mesh에 국한되어 전자보다 일반화된 실험 조건에서의 Ra 값을 예측할 수 있다는 장점이 있다. 본 논문에서는 양자를 모두 채택하여 특정 가공 조건에 대한 실험적 D/B와 연마 파라미터에 대한 D/B를 동시에 구축함

으로써, 각각의 D/B에 의한 최적화된 추론 결과들을 비교할 수 있는 시스템을 구성하였다.

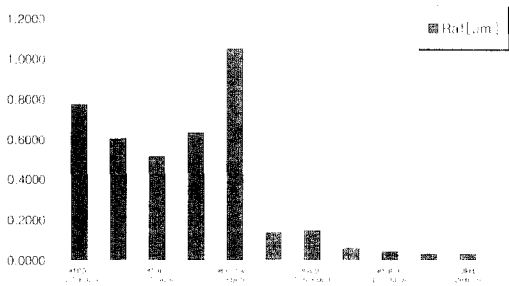
2.2 Curve Fitting

실험 데이터 궤적을 근사화 실험식[식(1)]의 형태로 얻기 위해서는 최적화된 Ra_f과 값을 구해야 한다. 본 연구에서는 보통 최소값 산출에 많이 쓰이는 Downhill Simplex Method를 사용하여 식(1)의 Ra와 값을 얻었다. 이 경우 목적함수를 실제 측정 데이터 Ra와 식(1)에서 얻어지는 값 Ra*과의 차의 제곱 값으로 표현된다.

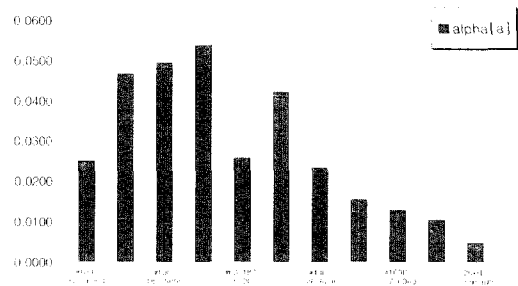
$$e^2 = (Ra - Ra^*)^2 \quad (2)$$

식(2)에 식(1)을 대입하면, 식(3)과 같은 최종 목적 함수의 형태를 얻는다

$$e^2_{ijk} = \{Ra_{ijk} - [(Ra_f)_i + [(Ra_i)_{ij} - (Ra_f)_i]e^{-\alpha_j P_{ijk}}]\}^2 \quad (3)$$

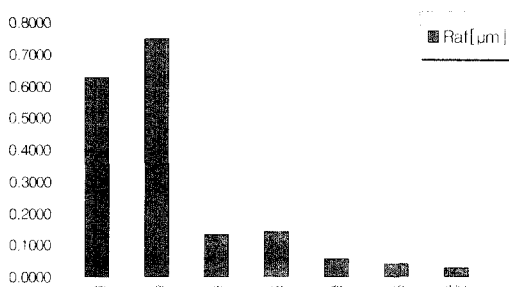


(a) Achievable surface roughness(Ra)

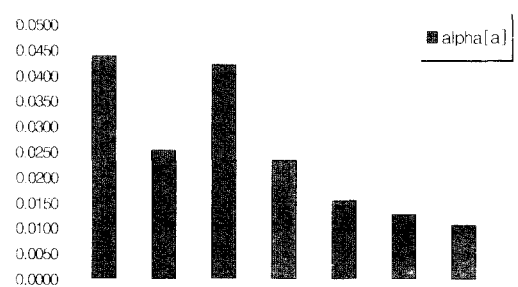


(b) Coefficients of roughness diminution(α)

Fig. 2 Characteristic values of polishing conditions



(a) Achievable surface roughness(Ra)



(b) Coefficients of roughness diminution(α)

Fig. 3 Characteristic values of polishing using total abrasive parameter(P)

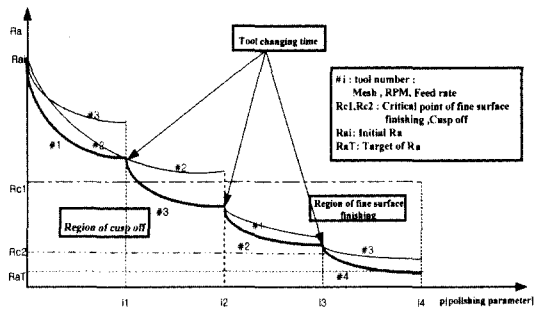


Fig. 4 Polishing tool changing

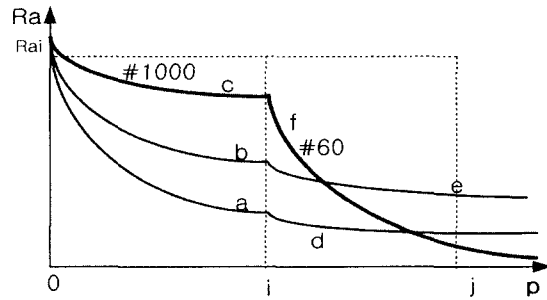


Fig. 5 Verification of optimal tool path

여기서, i 는 가공 조건 또는 Mesh, j 는 가공 시편, k 는 가공 진행에 따른 측정 반복을 말한다.

실제 실험 수행에 있어, 가공 실험 회수가 적을 경우(1~2회) 측정된 Ra값이 초기값 Ra_i 의 영향을 받아 편차가 큰 반면, 일정회수(4~5회 이상)의 가공을 거친 후에는 거의 모든 실험 데이터가 일정한 Ra값으로 수렴하기 때문에 편차가 작은 특징을 가진다. 이러한 경향을 무시하고 식(3)을 목적함수로 Fitting할 경우 편차가 큰 초기의 실험데이터의 영향으로 부정확한 Fitting Line을 얻게 된다. 따라서 초기 데이터의 영향도를 줄이기 위해 실험데이터의 분산값의 역수값 ($1/\sigma$)을 가중치로 설정, 새로운 목적함수로 구하였다. 이를 정리하면 식(4)와 같다.

$$J = \sum_i \sum_j \sum_k e_{ijk}^2$$

$$= \sum_i \sum_j \sum_k \left\{ \frac{1}{\sigma} \left[Ra_{ijk} - \left[(Ra_i)_i + \left[(Ra_i)_{ij} - (Ra_i)_i \right] e^{-\alpha P_{ij}} \right] \right]^2 \right\} \quad (4)$$

여기서, J 는 새로운 목적 함수이며, σ 는 분산값을 말한다. Fitting시 변수를 가공횟수(N)로 한 경우와 통합 파라미터(P)로 한 경우로 구분하여 식(4)의 목적함수 J 를 최소화하는 각각의 최적화된 Ra_i , α 를 구한다. Fig. 2와 Fig. 3은 가공조건(가공변수: N)에 따라 fitting해서 얻은 결과값(Ra_i , α)과 연마포의 입도(가공변수: 통합파라미터[P])를 기준으로 fitting한 결과값(Ra_i , α)이다.

3. 전문가 시스템 개발

연마 자동화 Tooling System 개발을 위해서는 숙련공의 경험에 의한 수작업 연마 가공 기술을 논리화시켜 최적화된 가공 계획을 세울 수 있는 모듈 개발이 요구된다.

3.1 최적 가공 조건 추론 알고리즘

숙련된 작업자는 목표로 하는 금형면의 표면 거칠기를 얻기 위해 경험에 근거한 최적의 연마 순서를 계획한다. 수작업에 의한 가공 계획은 우선 입도가 큰 공구를 선택하여 연마를 시작하여 단계적으로 입도가 작은 공구를 선택하여 원하는 표면 거칠기를 얻어낸다. 이 과정에서 공구 교환시기는 전적으로 숙련공의 경험, 즉 시각과 촉각으로 판단하여 적절한 공구 교환시기를 얻어낸다. 이와 같은 수동적인 연마 계획법을 논리화하면 Fig. 4와 같다. 1회 가공 시 사용자가 선택한 $Ra(R_i)$ 를 대입하여 각각 가공조건에 해당하는 Ra값을 계산하고, 이 값들 중에서 최소값을 가지는 가공조건을 선정한다. 2회 가공대는 1회 가공 때 선택한 결과값 (Ra_1)를 각각 가공조건 초기치에 대입하여 나온 결과값들 중에서 최소치를 선택하여 2회의 가공조건을 설정한다. 이와 같은 방식으로 원하는 목표 표면 거칠기 Ra_T 를 얻을 때까지 수행하여 최적의 경로를 산출한다. 이때 Cusp 가공구역과 경면 가공구역의 경계치 Rc_1 을 적절하게 선정하여 가공의 단계를 구분 짓는 것이 바람직하다. 진동식과 회전식 경면 가공 시에도 동일한 방법으로 적정한 임계 표면 거칠기 Rc_2 를 적용하면 된다. 최종적으로 목표 표면 거칠기 (Ra_T)에 이하에 도달하였을 때 연마 가공이 종료하게 된다.

3.2 추론 엔진 검증

Fig. 4와 같은 최적 경로 선정에 있어서 실제 연마 가공 시 Fig. 5와 같은 가공 경로를 갖는 경우의 존재 여부 판정이 필요하다.

즉 Fig.4와 같은 알고리즘에서는 Fig. 5의 a-d 경로를 최적 조건으로 선정하지만 Fig. 5와 같은 가공 경로가 존재할 때에는 c-f 경로가 최적 가공 조건이 되므로, 이와 같은 경우가 존재하지 않음을 증명해야만 한다. Cusp 제거 공정

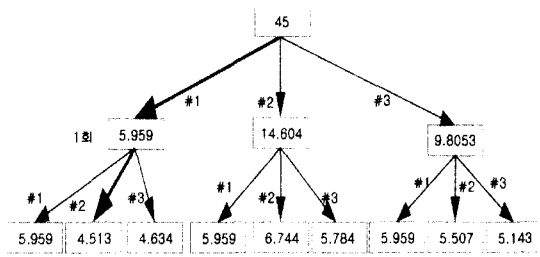


Fig. 6 Calculating Ra and optimal tool path using sampled data

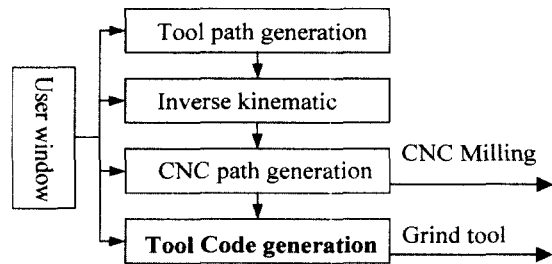
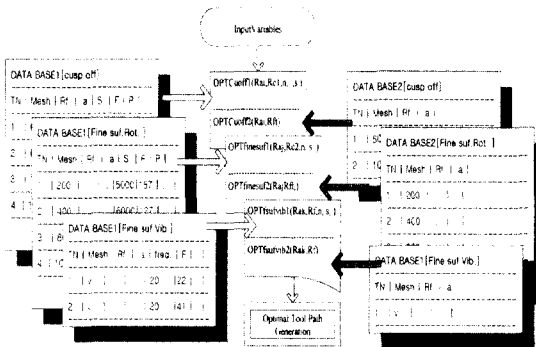
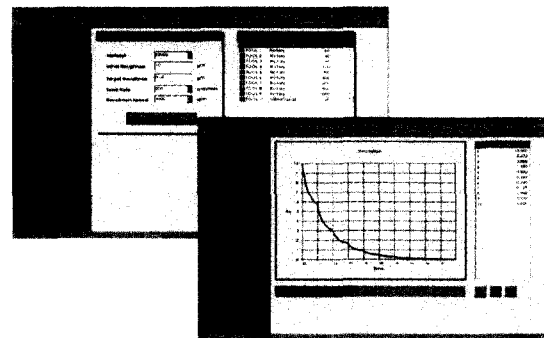


Fig. 7 Structure of the automatic polishing system



(a) Sequence diagram of the polishing expert system



(b) GUI mode

Fig. 8 Structure of the polishing expert system

data table중 몇 개를 샘플링하여 모든 조합의 경우를 추적 해가면 쉽게 Fig. 5의 존재 여부를 판정할 수 있을 것이다. 임의의 초기 Ra값을 45m라 하고, 목표값 RaT값을 4.6m로 하여 얻은 모든 가공 경우 조합에 의한 Ra값을 비교한 결과가 Fig. 6이다.

그림에서 보는 것과 같이 최적 경로는 #1→#2임을 쉽게 알 수 있으며 이 결과를 토대로 Fig. 5의 c-f와 같은 가공 경로는 존재하지 않음을 알 수 있다.

3.3 최적화 프로그램 구현

Fig. 7은 금형면 자동 Tooling System의 개략도이다. 본 연구에서 개발된 프로그램은 operating system의 모듈로서 구현된다.

Fig. 8은 전문가 시스템 프로그램 순서도와 GUI 모드를 보여 주고 있다.

구현 방식은 두 가지 방식으로 구분된다. 첫번째 방식은 초기 표면 거칠기(Ra_i)와 목표 표면 거칠기(Ra_T)를 입력하

면 최적화 프로그램에서 최적 연마 가공 인자를 추천하여 CNC 밀링 경로 제어부로 전송하는 방식이며, 두번째 방식은 초기 표면 거칠기(Ra_i), 목표 표면 거칠기(Ra_T), 사용자가 보유하고 있는 밀링머신의 사양에 맞는 회전수, 이송 속도를 입력하는 방식이다. 후자의 경우 출력 방식은 전자와 동일하다.

Table 3과 Table 4는 평가 실험을 위해 시편의 초기 표면 거칠기를 측정, 첫번째 방법으로 초기 치와 목표 표면 거칠기 값을 최적화 프로그램에 입력하여 얻은 결과이다.

Fig. 9와 Fig. 10은 Table 3, 4의 최적 연마 가공 데이터를 가지고 가공한 결과값과 일반적인 연마 가공순서 [#60-#100- #200-#400-#800-#1000]에 의한 결과값의 비교이다.

Fig. 9의 test1은 일반적인 연마 가공 순서로 가공한 결과이고 opt1은 Table 3의 최적 가공 경로로 실험한 결과이다. 결과 opt1은 test1보다 목표값(Ra_T = 0.075m)이하의 Ra값(0.065m)을 적은 가공 횟수 안에서 얻을 수 있었다.

Table 3 Optimized conditions from the expert system
($Ra_i = 4.07, Ra_T = 0.075$ [m])

Condition	Mesh	Rotation speed: S [rpm]	Feed rate: F [mm/min]	Pick feed: p [mm]	Number [N]
#1	#60	6000	187	2.5	2
#2	#100	5000	187	2.5	2
#3	#200	6000	127	2.5	1
#4	#800	6000	127	2.5	1
#5	#1000	6000	127	2.5	6

Table 4 Optimized conditions from the expert system
($Ra_i = 9.8, Ra_T = 0.043$ [m])

Condition	Mesh	Rotation speed: S [rpm]	Feed rate: F [mm/min]	Pick feed: p [mm]	Number [N]
#1	#60	6000	187	2.5	2
#2	#100	5000	187	2.5	2
#3	#200	6000	127	2.5	1
#4	#800	6000	127	2.5	1
#5	#1000	6000	127	2.5	3
#6	vib	.	41	.	1

Fig. 10의 test2는 회전식 가공만으로 연마한 경우이고 opt2는 Table 4의 최적 경로로 가공한 Ra값이다. opt2의 경우 진동식 가공 방식을 추가함으로써, 회전식만을 사용한 경우보다 적은 가공 횟수로 목표값($Ra_T=0.043m$)보다 낮은 값의 결과치($Ra=0.0389m$)를 얻었다. 따라서 본 전문가 시스템이 회전식과 진동식의 조합 가공 시에도 유용함을 보였다.

Fig. 11는 통합 파라미터[P]에 의한 최적경로(OPT [P])와 가공 조건별 최적경로의 예측값 (OPT[N])을 비교한 것이다. 가공 회수 13회차($n=13$)까지는 회전식 가공이며 그 이후는 진동식 가공이다. 전체적으로 상당히 근접한 결과를 나타내고 있으며 특히 진동식 가공의 경우 충분한 실험 D/B가 확보 되지 못하였지만 이점이 보완되면 통합 파라미터 [P]를 이용한 최적가공 경로 방식도 사용 가능함을 보였다.

4. 결론

본 연구에서는 금형면의 자동 연마 가공에 사용될 수 있

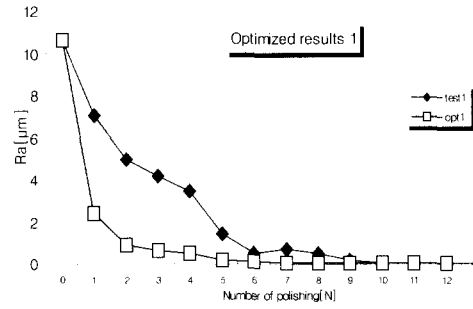


Fig. 9 Optimized results from the expert system (1)

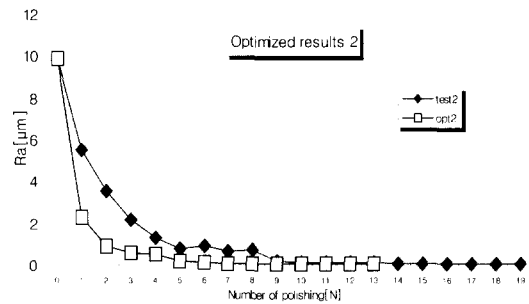


Fig. 10 Optimized results of polishing from the expert system (2)

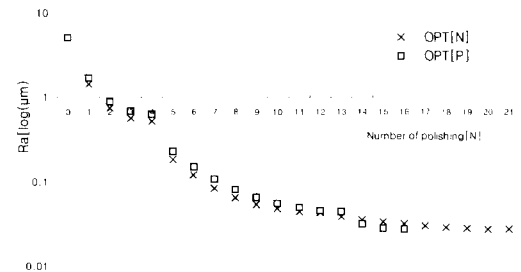


Fig. 11 Predicted Ra of the optimal tool path using total abrasive parameter [P] vs specific polishing conditions
(Input value [Ra]=0.065m, target value [Ra_T]=0.028m)

는 데이터 베이스 구축과 최적 금형 연마 공정을 산출할 수 있는 전문가 시스템을 개발, 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실제 사용되고 있는 연마 가공 조건에 따른 최적화 결과가 제시되었으며, 각 가공 조건을 통합하여 보편화시킨 통합 연마 파라미터를 이용한 최적화의 가능성을 보였다.
- (2) 초기 표면 상태와 최종 표면 상태를 입력하면 신뢰성 높은 최적 연마 순서를 산출 할 수 있는 전문가 시스템을 개발하였다.

향후, 광범위한 데이터 베이스 구축을 위해서 다양한 공구와 가공조건에 대한 실험이 요구되며, 외란의 영향에 대한 결점을 보상해 줄 수 있는 센서를 이용한 on-line 전문가 시스템의 개발의 연구, 소재 제거율에 대한 최적화의 연구가 진행되어야 하겠다.

for injection mold(2nd report): Expert system for mold and die polishing operation”, JSPE Vol. 57, No. 12, pp. 2151 ~ 2156, 1992.

참 고 문 헌

- (1) Sasaki. T., Miyoshi. T., Saito. K., et al., “Knowledge acquisition and automation of polishing operations for injection mold(1st report): Hand polishing properties of a skilled machinist”, JSPE Vol. 57, No. 3, pp. 497 ~ 503, 1991.
- (2) 안중환, 정해도, 이민철, 진차수, 외., “금형의 자동연마 시스템 개발”, 한국정밀공학회지, 제17권, 제4호, pp. 69 ~ 80, 2000.
- (3) 박균명, 장진희, 한창수, “자동 정면 다듬질 장치의 실험적 분석에 관한 연구”, 한국정밀공학회지, 제12권, 제9호, pp. 20 ~ 29, 1995.
- (4) 이민철, 하덕주, “곡면 금형 연마를 위한 머시닝센터 장착형 연마로봇 시스템 개발에 관한 연구”, 한국정밀공학회지, 제16권, 제4호, pp. 163 ~ 177, 1999.
- (5) 조성만, 안유민, 조남규, 한창수, 박균명, “금형면 자동 다듬질 장치의 D/B 구축을 위한 실험적 연구”, 한국정밀공학회지, 제9권, 제2호, pp. 80 ~ 86, 2000.
- (6) 이두찬, 정해도, 안중환, 三好陸志, “자동 금형 연마의 최적 조건 선정 전문가 시스템 개발”, 한국정밀공학회지, 제14권, 제10호, pp. 58 ~ 67, 1997.
- (7) 이태문, 정해도, 황찬해, 조규갑, “금형의 자동 연마작업 지원 전문가시스템의 개발”, 한국정밀공학회지, 제16권, 제7호, pp. 73 ~ 84, 1999.
- (8) Sasaki.T., Miyoshi.T., Saito.K., et al., “Knowledge acquisition and automation of polishing operations