

금형면 자동 다듬질 장치의 D/B 구축을 위한 실험적 연구

조성만*, 안유민**, 조남규**, 한창수**, 박군명***

Experimental Study of Developing D/B for Polishing Automation of Die and Mold

Sung Man Jo*, Yoomin Ahn**, Nahm Gyoo Cho**, Chang Soo Han** and Gyun Myoung Park***

Abstract

Although polishing process take 30~50% of whole process of manufacturing die and mold, it has not been fully automat- ed yet. Considering current trend of manufacturing, it is necessary to study on polishing automation. To accomplish automation, reliable database must be developed. For developing it, polishing mechanism should be defined and a general empirical formula that can be applied widely should be created. In this paper, it is found that polishing process must be separated into 2 process such as removing cusp and getting fine surface process and the polishing parameter which is com- posed of major machining parameters and normalization of data can be applied efficiently in making reliable database.

Key Words : polishing process(연마공정), die and mold(금형), polishing automation(연마 자동화), data base(데이터 베이스), polishing parameter(연마 파라미터)

1. 서 론

현재 금형 가공에 있어서 최종 경면을 얻기 위해서 연 마 가공으로 마무리를 하게 되는데 이 공정에서 일반적인 절삭가공은 어느 정도 자동화가 이루어져 있는 상태이나 연마 공정은 자동화가 이루어지지 않아 숙련된 작업자의 수작업에 많은 부분을 의지하고 있는 실정이다.⁽¹⁾⁽²⁾ 절삭 가공의 경우 컴퓨터와 수치제어 기술의 발달로 인하여 CNC 기계가 등장되어 놀라운 가공 성능의 향상을 가져온 점을 감안한다면 연마 가공의 자동화는 가공효율과 인건 비 절감 등 금형 제품의 가격 경쟁력 강화에도 필수적인 해결 과제인 것이다.

연마 자동화를 위해서는 가공 기구부의 개발도 수행되 어야 하지만 이와 함께 자동화에 적용될 연마 가공의 가 공조건에 대한 데이터 베이스의 구축 또한 병행되어야 한 다.⁽³⁾ 현재까지 연마 자동화의 기법은 CNC 기계에 장착할 수 있는 다듬질 전용장치에 의한 방법⁽⁴⁾과 다관절 로봇에 의한 다듬질 가공⁽⁵⁾의 두 가지 형태가 국내에서 연구되고 있다. 본 연구에서는 전자의 경우에 적용할 수 있는 데이 터베이스의 구축에 대한 실험을 수행하였다. 대부분의 절 삭가공 경우에는 치수 정밀도가 중요하다. 그러나 연마 가 공에서는 치수 정밀도보다는 최종 표면의 품질이 중요하 다. 연마 공구의 사용에 있어서도 공구의 변화가 절삭 가 공보다 훨씬 복잡하고 다양한 패턴을 보이게 된다. 이러한

* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과
** 한양대학교 기계공학과
*** 생산 기술 연구원

어려움 때문에 연마 가공의 최적 가공조건을 선정하기 위한 데이터 베이스 구축이 용이하지 않은 실정이다.^{6,8)}

본 연구에서는 연마 자동화를 위한 데이터 베이스 구축을 위한 금형면 다듬질 가공 실험을 수행하였다. 첫 번째로, 최종 금형면을 획득하기 위한 연마 공정을 cusp 제거 과정과 경면가공의 두 단계로 분리해야 하는 필요성에 대해서 고찰을 하였다. 두 번째로는, 연마가공의 가공 조건들이 획득되는 표면의 품질에 비선형적이고 복잡적으로 영향을 미치기 때문에 일반적인 데이터 베이스 구축에 어려움을 겪었던 점에 착안하여 보다 일반적이고 광범위하게 적용될 수 있는 통합적 연마 파라미터⁶⁾와 데이터의 무차원화를 이용하여 데이터 베이스 구축이 보다 용이하게 이루어질 수 있는 방법을 고찰하였다.

2. 금형면 다듬질 가공 실험

연마 자동화 기구부는 연마 가공시 고속 회전을 가능하게 하고 완만한 곡면의 변화에 따라 별도의 기구부의 작동 없이도 유연하게 대응할 수 있는 공압 시스템을 사용하여 일정한 가공력을 가공면에 가하도록 제작하였다. 제작된 연마가공 기구는 Fig. 1과 같다.

연삭숫돌은 금형 가공면의 굴곡에 관계없이 연삭숫돌의 연마면이 가공면과 항상 법선 방향으로 접촉할 수 있도록 연삭숫돌과 연삭숫돌 지지부를 유니버설 조인트로 체결하였다. 연삭입자의 결합방식은 가열 가압 후 성형한 전착 방식이다. 연삭숫돌의 모양은 Fig. 2에서와 같고 기타 연삭숫돌의 사양은 Table 1에서와 같다. 금형 시편 재료는 최근에 금형강으로 많이 이용되고 있는 KP4M을 사용하였다. 재료의 기계적 성질은 Table 2와 같고 실험에 사용된 시편의 크기는 20×80×80mm이다. 시편의 강도 및

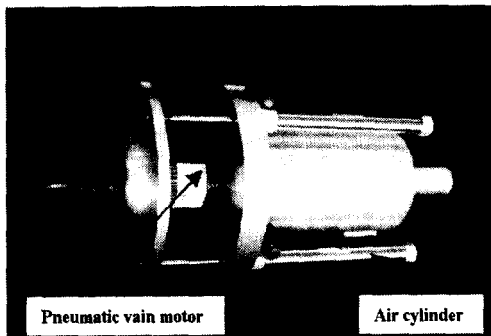


Fig. 1 Polishing device used in experiment

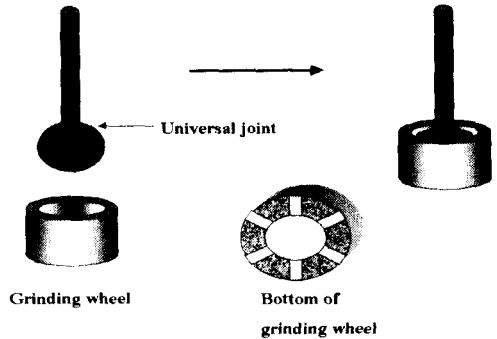


Fig. 2 Shape of grinding wheel

Table 1 Characteristics of grinding wheel

Inner, outer dia.	8.1mm, 15.6mm
Grain size	#230, #400

Table 2 Mechanical properties of KP4M

Yield Point(kgf/mm ²)	90-95
Tensile Strength (kgf/mm ²)	105-115
Elongation (%)	13-16
Reduction of Area (%)	35-40
Hardness (H _v)	40-44

경도가 일반 강 소재에 비해 높은 편이라 효율적인 연마 가공성능을 얻기 위해서 강도가 매우 좋은 CBN을 연삭 입자로 사용하였다.

금형가공에서 곡면 가공단계이자 연마 다듬질의 전 가공 단계인 볼 엔드밀 작업에서는 Fig. 3 에서와 같이 이송 속도와 크로스 피드(cross-feed:f)를 갖게 하여 cusp를 생성하였다.³⁾ Cusp는 볼 엔드밀 가공에 의해 가공면에 크로스 피드 만큼 주기적으로 생기는 뾰족한 선들 형태의 공구 자국을 말한다. 연마가공에서의 이송 방향은 엔드밀 가공에서의 이송 방향과 직각이 되도록 하였다. 그리고 각 시편들이 최대한 동일한 초기 조건을 갖게 하기 위하여 머시닝센터를 이용하여 작업을 수행하였고 측정오차 최소화를 위하여 엔드밀 가공 전에 시편의 6면을 모두 연삭을 수행하였다. 매 측정 때마다 동일한 위치를 측정하기 위하여 최⁹⁾등에 의해 특별히 고안된 고정기구와 위치오차 보정 알고리즘을 사용하였다. 본 연구에서는 경면 단계까지의 가공보다는 효율적인 cusp 제거가공 과정까지 만

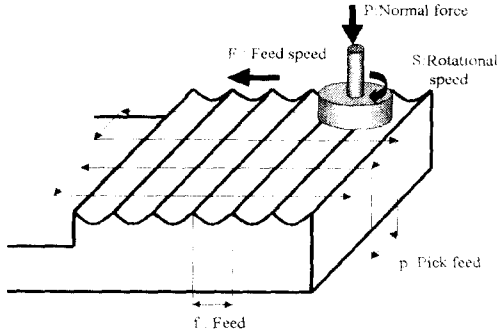


Fig. 3 Polishing method

Table 3 Polishing condition for experiment

Condition	Normal force:P [N]	Rotation speed:S [rpm]	Feed speed:F [mm/min]	Pick feed:p [mm]
# 1	10	4000	187	3.9
# 2	10	5000	187	3.9
# 3	10	6000	267	3.9
# 4	10	7000	342	3.9

을 실험을 통해 살펴보았다. 불 엔드밀 가공 후 시편의 초기 표면 정도와 소재 제거의 효율을 고려하여 입도 #230과 #400인 연삭숫돌을 이용하여 cusp제거 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 가공조건은 Table 3과 같다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 Cusp 제거전과 제거후의 공정 비교

자동 연마기구에 의한 금형면 시편의 cusp 제거 과정에서 시편의 같은 지점에서 측정된 표면형상(profile)의 변화 양상은 Fig. 4~Fig. 9와 같다. 그리고 가공조건은 연삭숫돌 회전속도(S)가 5000rpm이고 이송속도(F)가 187mm/min이고 수직 가공력(P)이 10N이고 연삭숫돌 이동량(P)은 3.9mm이고 연삭숫돌 입도는 #400이다.

Fig. 4는 시편의 초기상태를 나타낸 표면형상이다. 그림에서 보는바와 같이 cusp의 모양이 선명하게 보인다. Fig. 5는 1회 가공 후, Fig. 6은 2회 가공 후, Fig. 7은 3회 가공 후, Fig. 8은 4회 가공 후, Fig. 9는 5회 가공 후의 표면형상의 모습들이다. Cusp 제거 과정인 Fig. 4에서부터 Fig. 6 까지에서는 불 엔드밀 가공에 의해 가공면 표면 위에 생긴 주기적 돌출 부위만 점차적으로 제거 되어가고 있

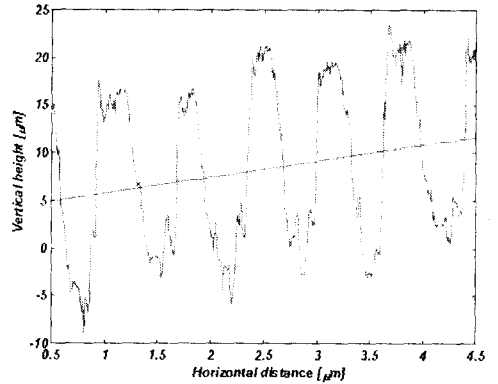


Fig. 4 Profile of initial state(before polishing)

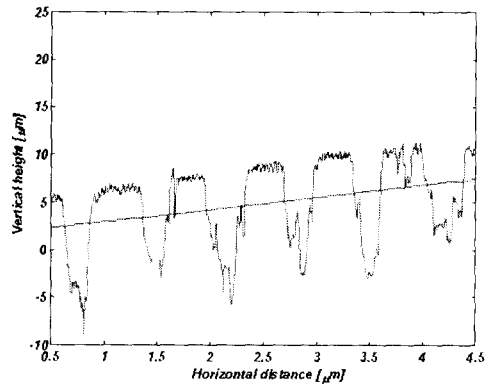


Fig. 5 Profile after 1st polishing

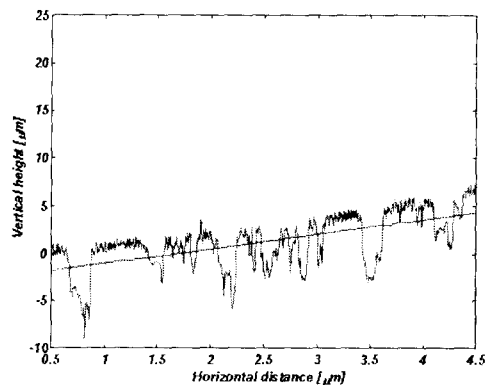


Fig. 6 Profile after 2nd polishing

다. Fig. 7 단계에 가서는 가공면의 주기적 돌출 부위가 모두 없어지면서 cusp가 완전히 제거된 상태가 되었다. Fig.

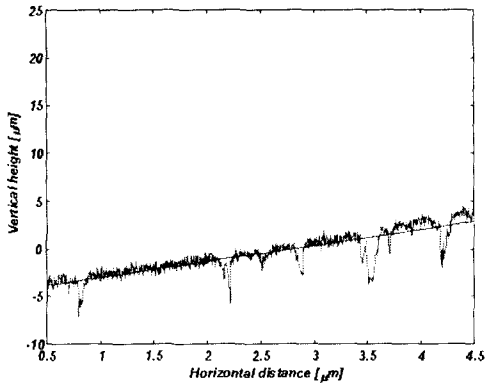


Fig. 7 Profile after 3rd polishing

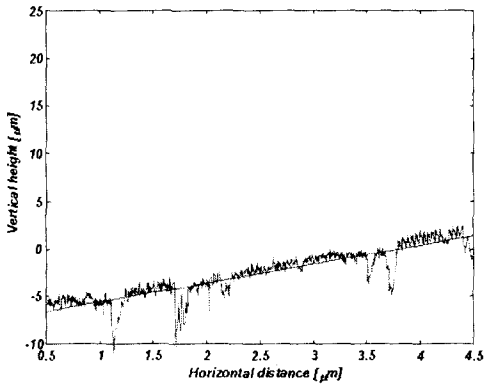


Fig. 8 Profile after 4th polishing

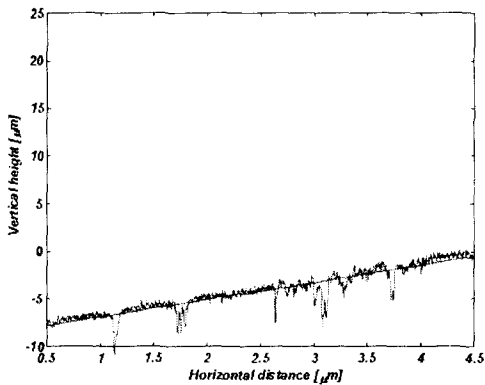


Fig. 9 Profile after 5th polishing

7에서부터는 금형면의 표면은 주기적 돌출 부위가 없는 불규칙한 거칠기 형상이다. 이 후의 과정은 cusp 제거 후

연마 가공 과정으로서, Fig. 7에서부터 Fig. 9 단계까지는 금형면 높이가 조금씩 낮아지면서 불규칙한 거칠기 정도도 조금씩 작아지는 양상을 보이고 있다. Fig. 8과 Fig. 9의 가공면 형상에서 깊은 골과 같이 새롭게 나타나는 파형은 연삭숫돌 마모가 진행됨에 따라서 연삭숫돌에서 탈락된 연삭입자 등에 의해서 생긴 스크래치 자국으로 여겨진다. 실제 다듬질 가공에서는 적절한 절삭유 사용 등에 의해 가공면으로부터 연삭 칩과 탈락된 연삭입자 등의 제거가 이루어지면 바람직하리라 생각된다.

입도 #230인 경우에도 비슷한 표면형상들의 변화 양상이 발견되었는데 cusp가 제거되기 전과 제거후의 표면형상 변화 형태에는 확연한 차이가 있음을 알 수가 있다. Cusp 제거 전의 표면 형상들은 연마숫돌과 금형면이 접촉할 때에 연삭숫돌이 일정한 굴곡을 가진 금형면에 접촉하기 때문에, 연마숫돌이 금형면의 돌출 부분에만 국한되어 단속적으로 접촉을 하고 접촉면의 면적도 작아진다. 그러나 cusp 제거가 끝난 뒤의 연마 가공에서는 금형면이 불규칙한 거칠기를 가져서 연삭숫돌이 표면 형상 전면에 걸쳐 접촉을 하게 되고 접촉면이 넓어진다. 이와 같이 cusp 제거 전과 제거 후의 연마 가공기구가 판이하게 다르게 된다. 뿐만 아니라 cusp 제거 공정은 소재 제거율이 중요시되는 반면, cusp 제거 후의 연마가공 공정에서는 가공면의 효율적인 제거보다는 가공 후의 표면정도가 중요하게 여겨진다. 따라서 cusp 제거 전 공정과 제거 후 연마공정을 분리하여 데이터 베이스를 구축하는 것이 타당하리라 판단된다.

3.2 표면거칠기 가공실험결과와 실험식(D/B)화

Cusp 제거 공정에 대한 가공실험 결과를 연마 파라미터를 이용하여 데이터 베이스화를 시도해 보았다. 금형면 연마가공의 실험결과를 데이터 베이스화하는 방법 중의 하나로서 실험 데이터를 수식화 하는 방법이 사용될 수 있다. 연마가공 실험결과를 수식화 하기 위해 사용될 수 있는 보편적인 방법은, 실험에 사용된 중요 가공변수들에 대해서 표면 거칠기가 가공횟수에 따라서 어떻게 변화되는가를 표시하는 방법이다. 본 연구에서는 실제 가공에 있어 수직 가공력과 연삭숫돌 이동량은 일정하게 유지된다고 가정하고, 중요한 가공변수로서 연삭숫돌의 입도와 연삭숫돌의 회전속도 및 이송속도들만을 고려하였다.

Fig. 10은 입도 #400 연삭숫돌에 대한 가공횟수와 표면 거칠기와의 실험결과를 Table 2의 각각의 가공조건에 대해서 나타낸 것이다. 중심선 평균 거칠기(R_a)의 크기가

가공횟수(N)에 따라 지수 함수적으로 감소되는 것을 알 수가 있다. 따라서 실험 데이터를 수식화 하는 방법으로서 다음의 식(1)과 같은 지수 함수가 이용될 수 있다.

$$R_a = (R_i - R_f)e^{-\alpha N} + R_f, (R_i > R_f) \quad (1)$$

식(1)에서 R_i 는 가공 전 초기 R_a 이고 R_f 는 최종 R_a 이다. 그리고 α 는 실험상수이다. 식(1)과 같은 실험식 형태의 함수로 실험결과들을 보간할 경우에는 각각의 가공 조건에 대해서 식(1)의 R_f 및 α 는 다른 값들을 가지게 된다. 따라서 일정한 연삭숫돌 입도에 대해서도 중요 가공 조건인 연삭숫돌의 회전속도 및 이송속도 등이 달라지면 각각에 해당하는 실험식이 구해지게 된다. Fig. 10의 경우에는 가공조건이 4 개이므로 4 개의 실험식들을 구해야만 한다. 그리고 가공실험 결과에 의하면, 가공 전 초기 표면 거칠기 R_i 는 실험상수 a 와 최종 표면 거칠기 R_f 에 큰 영향을 안 미치는 것으로 나타났다. 동일한 가공조건에 대해서는 초기 표면 거칠기가 달라도 똑같은 실험식을 큰 오차 없이 적용할 수가 있다.

이와 같은 방법으로 연마가공 실험결과를 데이터 베이스화를 하면, 특정한 가공조건(연삭숫돌 입도, 연삭숫돌의 회전속도 및 이송속도 등)마다 각각의 가공횟수에 따른 표면 거칠기의 변화를 관찰하여 실험식을 구해야 되기 때문에 대용량의 데이터베이스가 요구된다. 본 연구에서는 연마가공에 관한 많은 양의 실험결과 자료를 효율적으로 데이터 베이스화 하기 위해서 佐々木哲夫⁶⁾등에 의해 처음 제안된 통합적 연마 파라미터(M)을 적용해 보았다. 통합적 연마 파라미터는 식(2)와 같이 정의된다.

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

식(2)에서 S 는 연삭숫돌의 회전속도(rpm)이고 F 는 이

송속도(mm/min)이다.

Fig. 10에 도시된 표면거칠기 실험결과들을 가공횟수 대신에 통합적 연마 파라미터에 대해서 표시하여 보면 Fig. 11과 같다. 가공횟수에 따른 표면 거칠기의 변화에서와 같이 연마 파라미터가 증가함에 따라 표면 거칠기가 지수 함수적으로 감소하는 양상을 보이고 있다. 따라서 이 경우에도 식(1)과 유사한 지수 함수 식으로 수식화를 할 수가 있다. 연마 파라미터에 대해서 사용한 실험식은 다음의 식(3)과 같다.

$$R_a = (R_i - R_f)e^{-\beta M} + R_f, (R_i > R_f) \quad (3)$$

식(3)에서 β 는 실험상수로서 단위는 mm/(min rpm)이다.

식(2)에서와 같이 연마 파라미터, M 은 가공횟수와 연삭숫돌의 회전속도 및 이송속도 들을 모두 포함하는 통합적인 파라미터로서 가공면이 연삭숫돌과 미끄럼 접촉된 양 혹은 횡수에 해당된다고 볼 수 있다. 따라서 실험식은 연삭숫돌의 회전속도 및 이송속도와 같은 가공조건에 상관없이 연마 파라미터에 의해서만 결정되어야 한다. Fig. 11의 4개의 가공조건에 대한 실험 데이터를 식(3)과 같이 보간하여 Table 4와 같은 하나의 실험식을 얻었다. 이와 같이 하게 되면 연삭숫돌의 회전속도 및 이송속도에는 상관없이 연삭숫돌 입도 별로만 실험상수 β 와 최종 표면 거칠기 R_f 의 실험값을 구하면 되므로, 포괄적인 데이터베이스의 효율화가 가능해진다.

가공실험에서 중심선 평균거칠기(R_a)를 측정할 때에 제공된 평균 표면 거칠기(R_{ms})와 최대 높낮이 표면 거칠기(R_{max})도 같이 측정하여 같은 방법으로 수식화 하였다. 이 경우에도 실험 데이터들이 연삭숫돌의 회전속도 및 이송속도에 상관없이 하나의 실험식으로 수식화가 가능해졌다. 그 결과는 Table 4에서와 같다. 이와 같이 구해진

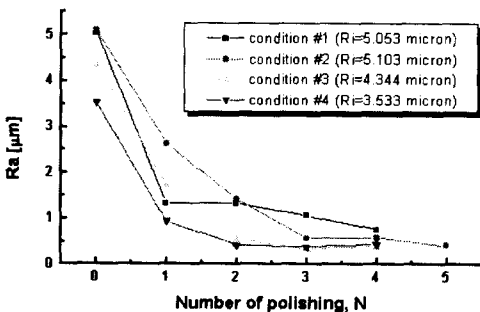


Fig. 10 R_a vs N for grain #400

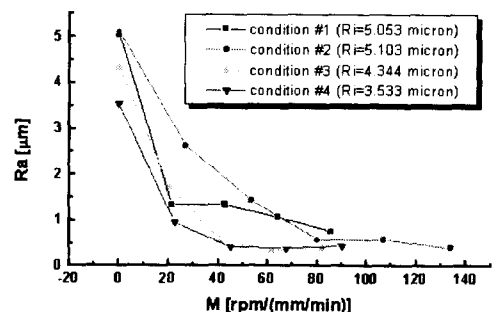


Fig. 11 R_a vs. M for grain #400

Table 4 Experimental equation for grain #400

Roughness	Experimental equation
$R_a [\mu m]$	$R_a = (R_i - 0.41)e^{-0.04416M} + 0.41$
$R_{ms} [\mu m]$	$R_{ms} = (R_i - 0.79)e^{-0.05385M} + 0.79$
$R_{max} [\mu m]$	$R_{max} = (R_i - 5.71)e^{-0.04297M} + 5.71$

Table 5 Range of polishing conditions that can be applied to the experimental equation for grain #400

Polishing condition	Range
Rotating speed [rpm]	4000 ~ 7000
Feed speed [mm/min]	187 ~ 342
Number of polishing	Below 5 times
Pick feed [mm]	(Outer dia.)/4

실험식들이 가공조건에 상관없이 있다고 하지만, 연마가공 자체가 이루어지기 위해서 필요한 가공조건 범위가 필요하게 된다. Table 5는 Table 4에 구해진 실험식들이 적용될 수 있는 가공조건들의 범위를 나타낸다. 결국 실험식이 신뢰성을 가지는 가공조건 범위 내에서는 가공조건을 달리해도 연마 파라미터 M만 같다면 거의 같은 표면 거칠기를 얻을 수가 있다.

Fig. 12는 Table 4에서와 같이 구해진 중심선 평균 표면 거칠기의 실험식을 실제 실험 데이터들과 함께 표시한 것이다. 4 개의 가공조건들의 초기 표면거칠기(R_i)가 모두 달라서, 각각의 경우에 해당하는 4 개의 식으로 표시하였다. 각각의 가공조건에 대해서 실제 가공실험 데이터의 평균값에 대한 실험식으로 구해지는 값의 오차를 구하였으며, 그 결과는 Table 6과 같다. 오차 범위는 30~50% 정도로서 실험식에 의한 예측값이 정확하다고는 할 수 없겠다. 본 연구에서는 각각의 가공조건에 대해서 4~5번의 반복 실험을 하였는데, 실제 데이터 베이스에 사용될 신뢰성 있는 실험식을 얻기 위해서 훨씬 많은 실험을 반복 수행해야겠다.

실험식의 오차의 주된 원인이 실험 데이터의 부족이라면, 모든 가공조건들에 대해서 적용할 수 있는 하나의 실험식을 구했을 때에는 한 실험식에 사용되는 실험 데이터 개수가 증가되어 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있을 것이다. 이와 같은 방법을 적용하기 위해서는 가공조건마다 다른 초기 표면거칠기 값이 문제이다. 표면거칠기 값들을 각각의 초기 표면거칠기 값들로 무차원화 하여 그 결과에

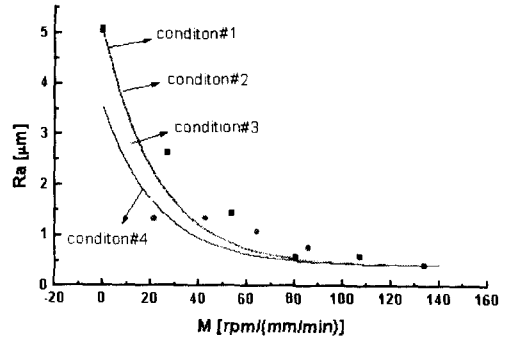


Fig. 12 R_a vs. M for grain #400 with experimental equation

Table 6 Relative error between experiment and experimental equation for grain #400

Experimental condition	Relative error [%]
# 1	39.2
# 2	19.6
# 3	55.7
# 4	48.2

대한 실험식을 구한다면 무차원화된 초기 표면거칠기 값들이 모두 1로 같게 되어 문제가 없게 된다. 모든 가공조건들의 중심선 평균 표면거칠기(R_a)들을 무차원화 한 그래프가 Fig. 13과 같다. 이 경우에도 표면거칠기 무차원 값들이 지수 함수적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 따라서 무차원 값들을 앞선 실험식 형태와 유사한 지수 함수적으로 보간하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

$$\frac{R_a}{R_i} = 0.87916e^{-0.05745M} + 0.11812 \quad (4)$$

모든 표면거칠기 무차원 값들과 실험식인 식(4)에 의한 예측 값들 사이의 오차를 구하였더니 표준편차가 0.070209 로서 신뢰할 만한 결과를 얻었다고 하겠다. 무차원화된 표면거칠기에 대해서 실험식을 구한다면 가공조건에 상관없이 하나의 실험식으로 자료화 할 수 있어 금형면 다듬질 장치에 대한 가공조건 데이터 베이스화에도 자료양의 간소화로 유리하다고 할 수 있겠다.

실험식의 신뢰성에 영향을 미치는 인자들로서 충분한 실험 데이터 양 이외에 연삭숫돌의 마모가 중요한 것 같다. 각각의 반복실험에 대해서 연삭숫돌의 마모 정도가 동일하게 되도록 드레싱을 수행하였으나, 가공이 진행되는

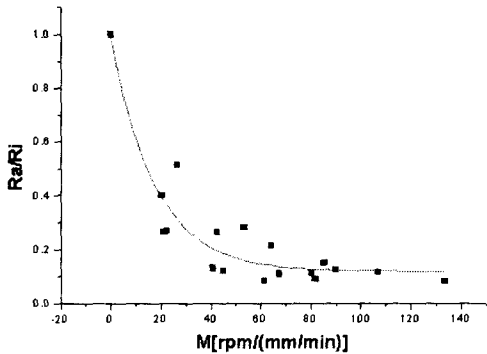


Fig. 13 R_a/R_z vs M for grain #400 with experimental equation

동안 연삭 눈막힘 현상 등의 발생으로 마모가 불규칙하게 진행되어 실험식의 오차가 유발된 것 같다. 보다 정확한 데이터 베이스용 실험식을 얻기 위해서는 연삭숫돌 마모 등의 공구성능 감퇴 현상을 고려한 실험식의 개선이 필요하다고 여겨진다.

Cusp 제거 공정실험에는 입도 #400 연삭숫돌 이외에 #230 연삭숫돌이 사용되었으나, #230의 경우는 cusp 제거까지의 가공 횟수가 2회를 넘지 않아 식(3)과 식(4)와 같은 실험식은 구하지 못했다. Cusp 제거공정 뿐만이 아니라 cusp 제거 후 연마 가공 공정에 대해서도 통합적 연마 파라미터를 이용한 데이터 베이스화가 가능하리라 여겨진다. 그리고 표면 거칠기에 대해서와 같이 가공면 소재 제거율에 대해서도 통합적 연마 파라미터의 적용을 시도해 볼 만 하다고 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 금형면의 자동 연마 가공에 사용될 수 있는 데이터 베이스를 구축하기 위한 실험적 기초 연구로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 금형면의 연마 다듬질 가공에서 cusp 제거 공정과 cusp 제거 후 연마가공 공정을 분리하여 데이터 베이스를 구축하는 것이 타당하다.
- (2) 비선형적이고 복잡한 관계를 가지는 다양한 연마 가공변수들을 하나로 통합하는 연마 파라미터와 데이터의 무차원화를 이용하면 자동 다듬질 장치의 데이터 베이스 구축을 위한 실험 데이터들이 간단하고도 포괄적인 실험식으로 표현이 가능하다.

향후, 광범위한 데이터베이스 구축을 위해서는 보다 다양한 공구와 가공조건에 대한 실험과 통합적 연마 파라미터의 적용을 연마가공 전체 공정에 대해서 표면 거칠기뿐만 아니라 가공면 소재 제거율 까지 확대하는 연구가 진행되어야 하겠다.

참고 문헌

- (1) 박균명, 장진희, 한창수, “자동 경면 다듬질 장치의 실험적 분석에 관한 연구”, 한국 정밀 공학회지, 제 12권, 제9호, pp.20-29, 1995
- (2) 佐々木哲夫, 三好陸志, 藤勝政, 加藤木修, “金型磨き作業の知識獲得と自動化に関する 研究(第1報)-金型磨き作業支援工エキスハートシステム”, JSPE, Vol.57, No.3, pp.497-503, 1991
- (3) 佐々木哲夫, 三好陸志, 藤勝政, 岡田信一郎, “金型磨き作業の知識獲得と自動化に関する 研究(第3報)-金型磨き作業支援工エキスハートシステム”, JSPE, Vol.58, No.12, pp.2037-2043, 1992
- (4) 채호철, 박균명, 한창수, 조남규, 안유민, “CNC 착탈형 금형면 자동 다듬질 장치에 관한 연구”, 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp.781-784, 1999
- (5) 오영섭, 유병삼, “수치제어 데이터와 오프라인 프로그램을 이용한 연마 로봇 시스템 개발”, 한국 정밀 공학회지, 제 16권, 제3호, pp.9-17, 1999
- (6) 佐々木哲夫, 三好陸志, 藤勝政, 加藤正則, “金型磨き作業の知識獲得と自動化に関する 研究(第2報)-金型磨き作業支援工エキスハートシステム”, JSPE, Vol.57, No.12, pp.2151-2156, 1991
- (7) 이두찬, 정해도, 안중환, 三好陸志, “자동 금형 연마의 최적조건 선정 전문가 시스템 개발”, 한국정밀공학회지, 제 14권, 제 10호, pp.58-67, 1997
- (8) 조성만, 안유민, 조남규, 한창수, 박균명, “금형면 자동 다듬질의 최적 가공조건 설정에 관한 실험적 연구”, 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp.267-270, 1998
- (9) 최한광, 조남규, 한창수, 안유민, 박균명, “Relocation Device를 이용한 표면 미세 형상 측정에 관한 연구”, 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp.394-397, 1998