

전해연삭을 이용한 금형의 다듬질 가공특성

황찬해* 정해도**

Die Finishing Process Using Electro-Chemical Grinding

Chan Hae Hwang*, Hae Do Jeong**

ABSTRACT

This paper describes the characteristic of die finishing to obtain smooth surface using electro-chemical grinding after cutting process. Electro-chemical grinding is possible under lower load and tool wear comparing with those in the mechanical grinding. Conventionally, if the metal bonding material of the grinding wheel is directly contacted with workpiece, the current is circulated without electrolytic phenomena. Sometimes, electrical discharge is occurred between tool and workpiece. To cope with this problem, the metal-resin bonded pellet was used in this study. This pellet is composed of optimal volume of metal and resin powders and its characteristics are changable with the each volume of powders. Finally, high efficient die finishing is realized using metal resin bonded pellet in electro-chemical grinding.

Key Words : electro-chemical grinding (전해연삭), metal-resin bonded pellet (메탈레진본드 펠릿), die finishing (금형연마)

1. 서론

금형의 다듬질가공은 일반적으로 금형의 제조공정에서 절삭공정 후 존재하는 공구마크를 제거하고 금형의 요구하는 거칠기 수준까지 표면을 가공하여 금형의 품질을 향상시키는 가공이다. 따라서 금형의 다듬질가공은 고능률, 고정밀 가공기술로서의 기능도 요구되며 특히 제품의 최종품위와 가치를 결정하는 가공으로 많은 기술과 노력이 필요한 작업이다. 그러나 금형의 다듬질공정은 아직까지 체

존하여 대부분이 수 작업으로 이루어지고 있는 실정이다. 따라서 일부 선진국에서는 금형자동연마기를 개발하여 이미 상용화하고 있으며 이는 수 작업으로 인한 정밀도와 가공능률을 보상해 줄 것으로 기대되고 있다. 이러한 산업분야의 흐름과 더불어 다듬질가공에 응용되는 다듬질가공 기술에 대한 연구는 자기연마, 전해연마, 전해자기 연마등으로 제시되고 있으며 여기에 슬러리(slurry)을 이용한 고품위 다듬질 가공등도 제시되고 있다. 이러한 연구들은 모두 금형의 고품위가공과 고능률가공을 동시

* 부산대학교 대학원

** 부산대학교 기계공학부

에 달성하는 것을 목적으로 하고 있다.

일반적으로 금형의 다듬질가공은 제품을 직접 가공했을 경우 균일한 형상(Profile) 오차와 표면 거칠기가 우선시 된다. 따라서 금형의 다듬질가공은 일단 표면 절삭마크(cusp)를 먼저 제거하여 형상정밀도를 유지한 후 평탄화된 표면에서 표면 거칠기 향상을 위한 가공으로 연계되는 것이 바람직하다. 이러한 연구개념을 바탕으로 하여 본 연구는 작은 공구마모와 가공력으로도 큰 가공효율을 가질 수 있는 전해연삭(Electro-chemical grinding)가공기술을 실제 금형의 다듬질 가공에 적용하였다. 전해연삭은 기계적 제거가공과 전해용출작용을 조합한 가공법이다. 일반적으로 금형재료를 전해연삭으로 가공하는 경우에는 용출의 진행을 방해하는 양극의 생성물이 표면에 생성되므로 이를 스톨을 이용하여 기계적으로 제거하여 전해용출현상을 지속시켜 전해가공의 효율을 향상시킨다. 전해연삭용 스톨은 절연성의 스톨입자와 전도성의 결합재로 구성되어 있다. 따라서 실제 공작물과 스톨의 접촉시 스톨표면의 절연체인 가공입자의 돌출길이가 실제로 전해작용이 일어나서 부동태층이 생길 수 있는 공간이 된다. 그러나 실제 금형의 다듬질가공은 공구와 공작물의 접촉면적이 크고 가공중의 진동에 의하여 전도성의 결합재가 직접 가공물에 접촉할 경우가 생긴다. 이 경우 전해현상은 일어나지 않으며 전류는 바로 통전이 되어 버리는 문제점이 발생한다. 특히 연삭입자의 돌출길이가 작을 경우 이러한 특성은 더욱 두드러지게 된다. 따라서 본 연구는 전해연삭의 이점을 이용하여 금형의 다듬질가공을 실행하되 위와 같은 어려움을 극복하기 위하여 레진 결합재(resin bond)의 특성을 가지면서도 전도성의 성질이 있는 메탈레진본드 펠렛(metal-resin bonded pellet)을 이용하여 금형의 다듬질가공을 실시하고 그 특성을 일반적인 연삭가공과 비교하였다.

2. 메탈레진본드 펠렛 개발

일반적으로 금형의 다듬질가공은 일정한 압력을 공작물에 전사(Pressure control)하는 방법⁽¹⁾으로 주로 가공물의 표면 거칠기를 향상시키는 가공방법이다. 따라서 다듬질가공에 적용되는 공구는 일반적으로 가공물에 일정한 압력을 가지고 접촉하여 표면을 미세하게 가공한다. 따라서 그 목적에 따라 가공특성이 다르며 절삭, 연삭가공에 비하여 소재

의 제거율(material removal rate)이 낮다. 본 연구에 이용되는 메탈레진본드 펠렛은 레진의 특성을 가져 스톨표면이 탄성을 지니므로 충격, 진동을 흡수하며 우수한 표면 거칠기를 가진다⁽²⁾. 메탈레진본드 펠렛은 전기전도도의 역할을 담당하는 일정한 양의 금속분말(metal powder)과 펠렛의 결합재의 역할을 하는 일정한 양의 레진분말(resin powder)을 섞어 일정한 온도에서 성형한다. 본 실험에서 사용된 금속분말은 다른 금속분말들보다 안정적인 전기전도도를 가지고 주변에서 쉽게 구할 수 있는 동분말(copper powder)을 이용하였으며 10 μ m크기이다. 동분말의 크기가 작을수록 그에 따른 산화막의 영향이 크고 각각의 접촉면적이 작으므로 그에 따른 전

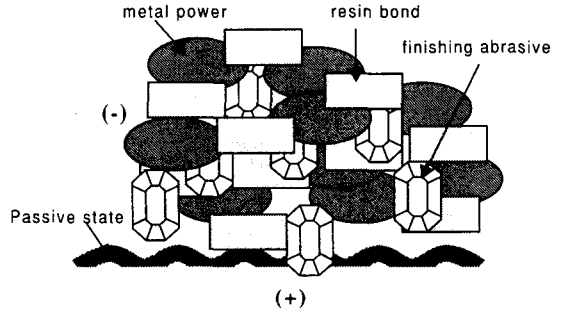


Fig. 1 Electro-chemical grinding mechanism using metal-resin bonded pellet

기 전도도의 특성이 떨어진다. 따라서 본 실험에서는 상대적으로 분말끼리의 접촉면적이 넓고 공기중에 노출시 산화되더라도 전기전도도가 우수한 편상(dendrite)상태의 동분말을 이용⁽²⁾하였다. Fig. 1은 메탈레진본드 펠렛의 전해연삭 개념도를 나타낸다. 메탈레진본드 펠렛의 제조방법은 다음과 같다. 먼저 실제 다듬질가공을 담당하는 연삭입자(Diamond/CBN)에 액상상태의 페놀수지(phenolic resin)를 얇게 도포(coating)한다. 그후 연삭입자와 동분말, 레진분말이 균일하게 배합될 수 있도록 섞는다. 그후 금형에 균일하게 충전한 다음 금형의 온도를 약 80 $^{\circ}$ C까지 가열한다. 80 $^{\circ}$ C까지 가열후 그 온도를 유지하면서 약 2~3ton/cm²의 압력으로 5~6차례 부분가압한다. 가압후 레진에서 발생하는 기포를 제거하기 위해 80 $^{\circ}$ C의 온도에서 약 60분 정도 일정 상태를 유지시킨다. 그후 레진분말의 최종성형온도인 140~150 $^{\circ}$ C까지 금형의 온도를 올려 40~60분 정도 유지한 후 탈형한다. Table 1은 제작한 도우넛형

Table 1 Specifications of finishing pellet

Bond material	Copper powder (density 3.9846g/cm ³)
	Resin powder (density 0.5768g/cm ³)
Load	2~3ton/cm ²
Manufacturing Temperature	140~160℃
Concentration	75 (3.3ct/cm ³)
Finishing abrasive	#100/120, #200/230, #325/400 #1000, #5000
	Diamond (GE MBG 620) CBN (TYPE-1)
Size	O/D 16, T9, I/D 8

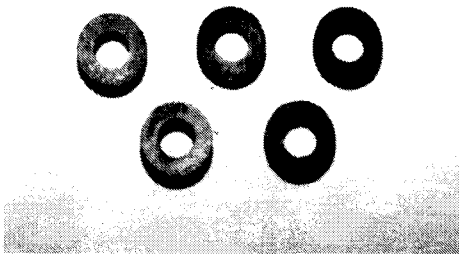


Fig. 2 Graphs of metal-resin bonded pellets



Fig. 3 SEM graphs for metal-resin bonded pellet

펠렛의 제작조건을 나타내며 Fig. 2,3은 제작된 펠렛의 실제 외관과 SEM을 이용한 조직을 나타낸다. 다듬질 가공시 공구의 집중도가 너무 높으면 오히려 표면에 손상을 줄 수 있고 형상이 변할 수 있는

등 다듬질에 적합하지 않으므로 75정도로 하였다. 펠렛의 구성요소인 금속분말과 레진 분말의 비율은 실제 펠렛의 전기적인 특성을 결정하며 따라서 본 실험에 적용하기 위하여 적절한 비율이 필요하다. 따라서 전해 연삭에 적절한 금속 분말과 레진 분말의 비율을 선정하기 위하여 금속 분말과 레진 분말의 비율을 각각 5:5, 6:4, 7:3, 8:2로 변화시켜가며 시편을 제작하였고 이들의 전기 전도도를 조사하였다. 실제 전기전도도의 측정에 이용된 장비는 APD CRYOGENIC Inc의 DF-202이며 시편의 비저항($\text{ohm} \cdot \text{m}$)을 계산하였다. 실험결과는 Fig. 4와 같으며 본 실험에서는 시편중 레진의 양이 많을수록 메탈 레진본드의 특성인 부분전해의 가능성이 많으므로

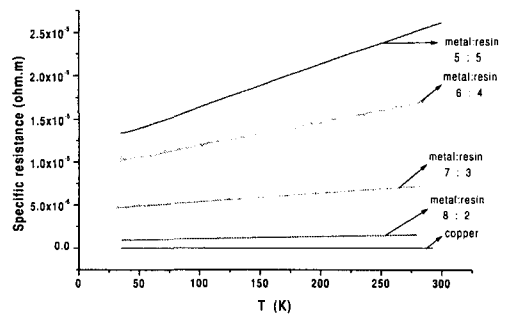


Fig. 4 Conductivity of metal-resin bonded pellet with several volume rates of metal and resin powder

금속분말과 레진분말의 비를 각각 6:4로 선정하였다. 금속분말과 레진분말의 비율 5:5로 선정할 경우 실제 연삭입자 첨가시(concentration 75) 전기 전도도가 불안하였으며 전혀 통전이 되지 않는 경우도 있었다.

3. 실험방법

제작된 메탈레진본드 펠렛은 전해연삭을 이용하여 금형의 절삭면에 존재하는 절삭마크(cusp)를 제거하고 금형의 요구하는 표면 거칠기까지 가공함을 목적으로 한다. 금형의 다듬질가공에서 초기 절삭가공면의 상태는 다듬질상태에 영향을 미치는 그 첫 번째 인자⁽³⁾라 할 수 있으며 다듬질 면의 상태를 결정하는 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 따라서

Table 2 Cutting conditions of workpiece (STD11)

Workpiece	STD 11
spindle speed	1000 rpm
feedrate	500mm/min
pickfeed	0.5 mm
cutting depth	0.5 mm

본 실험에는 전해연삭을 이용한 금형면 표면의 다듬질 가공특성을 평가하기 위하여 사용된 시편을 모두 동일하게 Table 2에 나타난 조건으로 절삭하였다. 본 실험에서 사용된 가공표면 거칠기 측정기는 Form Talysulf Series 2이며 Table 2의 조건으로 절삭된 시편의 최대 절삭마크의 높이는 $40\mu\text{m}$ 이며 표면 거칠기는 $Ra\ 3.967\mu\text{m}$ 이다. 가공된 절삭면에 다듬질가공을 수행하기 위하여 다듬질가공의 특징에 맞게 일정한 가공압력을 줄 수 있는 기구(attachment)를 이용하여 수직형 머시닝 센터에서 실험⁽⁴⁾하였다. Fig. 5는 실제 사용된 스프링 가압력을 이용하는 가압기구를 나타내며 이를 이용하여 수직형 머시닝센터에서 실험을 실시하였다. Table 3은 전해연삭법을 이용한 금형의 다듬질실험 조건을 나타낸다. 본 실험에서 실제 사용된 전해질(electrolyte)은 NaNO_3 이며 전해연삭에서 전해액으로 많이 이용된다. NaNO_3 는 다른 전해질보다 고가이나 전극에서 가까운 고 전류밀도부분에서는 표면의 부동태층(passive state)이 연속적으로 파괴되며 용출이 일어나고 전극에서 먼 부분, 즉 전류밀도가 약한 부분에서는 부동태층에 의하여 거의 용출이 일어나지 않아 전해연삭 가공시 가공정도가 우수하다. 또한 다듬질 거칠기도 상대적으로 우수하며 공작물이나 기계의 부식정도도 상대적으로 적다⁽⁵⁾. 본 실험에 사용된 전원 공급기(power supply)는 정격 DC전원 공급기와 Micro Computer & Controller를 접합하여 전압, 전류, 시간 및 반복 횟수 등을 임의 설정하여 편리하게 사용이 가능하도록 제작되었다. 기기의 세부구성은 DC Power Supply, M.C.U(Micro Computer Unit), 12Bit D/A(Digital to Analog) Converter, 작동조건을 설정하는 26Keyboard, 작동상태를 표시하는 48Character L.C.D등으로 구성되어 있다. 사용전압은 0.1~50A, 사용전류는 0.1~50A까지 변환이 가능하며 이용 펄스간격(Pulse width)은 1~999 μs 까지 변환이 가능하고 Input power는 200V±

Table 3 Experiment conditions of electro-chemical grinding

Workpiece	STD 11 (HRc 27)
Grain size	#100/120, #200/230, #325/400, #1000, #5000
Electrolyte	NaNO_3 20 wt%
Current	12A
Pulse width	$\tau_{\text{on, off}}\ 10\mu\text{s}$
Spindle speed	1500rpm
Feedrate	1000mm/min
Load	20N/cm ²

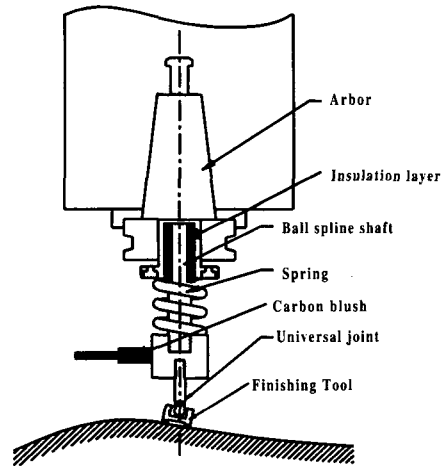


Fig. 5 Construction of die finishing attachment

15%이다. 음극(cathode)으로 사용된 전극은 카본 브러쉬(carbon blush)이며 양극(anode)은 구리전극을 사용하였다.

4. 실험결과

메탈레진본드 펠렛를 이용한 전해연삭의 특성을 조사하기 위하여 가공전류치, 가공압력, 회전수, 공구입자 크기(grain size)등을 변화시켜 그에 따른 가공특성(표면형상, 거칠기)을 조사하였다. Fig. 6은 실제 가공 전류치 변화에 따른 각 시편의 제거

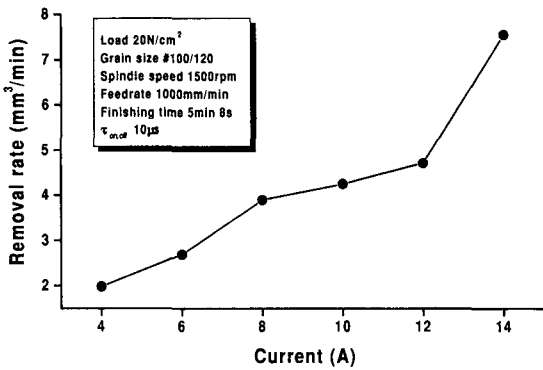


Fig. 6 Relation between finishing current and removal rate

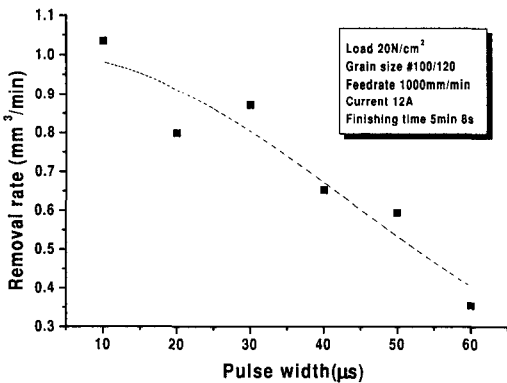


Fig. 7 Relation between finishing current (pulse width) and removal rate

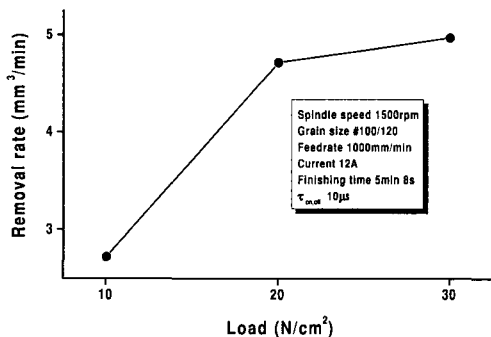


Fig. 8 Relation between finishing load and removal rate

량을 나타낸다. 전류치의 변화는 4~14A까지이며 실제 가공조건은 1500rpm, 1000mm/min, Load 20N/cm², Pulse width($\tau_{on, off}$) 10 μ s이며 그에 따른 제거량을 조사하였다. 위의 결과에 따르면 가공 전류치가 크면 클수록 그에 따른 제거량은 증가한다. 그러나 실제 14A까지 가공했을 경우 시편의 표면이 심하게 변하고 많은 열이 발생하는 등 문제점이 생겨 본 실험에서는 12A로 가공 전류치를 설정하였다. Fig. 7은 Pulse width를 변화시켜 가공 후 그에 따른 시편의 제거량을 측정 한 것이다. 실험결과 Pulse width가 증가할수록 제거량은 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 Pulse width가 증가할수록 가공에 참여하는 실제 전류치가 적어지므로 전해효과가 떨어져 가공효율이 감소한 것으로 생각된다. Fig. 8은 실제 전해연삭 시 가공압력의 변화에 따른 피삭재의 제거량을 나타낸다. 실험결과 는 실제로 압력의 증가에 따라 제거량이 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 압력이 10N/cm²에서 20N/cm²에서 증가시 제거량과 20N/cm²에서 30N/cm² 증가시 제거량은 큰 차이가 났다. 그 주된 이유는 공구가 메탈레진본드 펠릿(metal-resin bonded pellet)이므로 실제 금속본드 펠릿(metal bonded pellet)에 비하여 일정한 가공압력이상에서는 압력의 증가에 따른 제거량의 증가가 일어나지 않았다. 또 전해연삭의 특징상 가공압력이 증가할수록 실제 전해가 일어날수 있는 실제 가공간극(working gap)이 작아지므로 전해연삭의 효과는 감소하기 때문이라 생각된다. Fig. 9는 주축 회전수 변화에 따른 제거량의 변화를 나타낸 것이다. 실험결과에 따르면 회전수가 증가할수록 제거량은 비례적으로 증가하고 있다. 이는 가공중 연속적으로 생기는 부동태층을 연속적으로 빨리 제거할수록 제거량이 증가한다는 것을 나타내며 이는 전해연삭의 특징이라고 할 수 있다. Fig. 10은 5종류의 입도(grain size)를 갖는 펠릿에 따른 제거량을 나타낸다. 각 입도 크기별 가공조건은 동일하다. 전해연삭과 순수 기계적 연삭가공을 비교할 때 제거량은 입도에 절대적으로 영향을 받으며 일반적으로 입자가 클수록 제거량은 증가하였다. 이와 같은 결과의 이유는 메탈레진본드를 이용한 전해연삭은 공구의 전면에서 전해가 일어나는 것이 아니라 부분적으로 전해가 일어나므로 전해가공의 특성이 상대적으로 적음에 기인한다고 할 수 있다. 또 가공입자가 작고 표면의 절삭마크가 제거

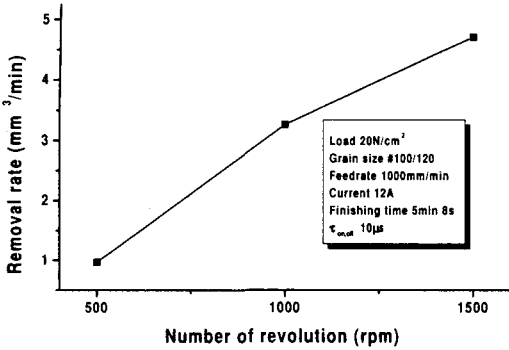


Fig. 9 Relation between finishing number of revolution and removal rate

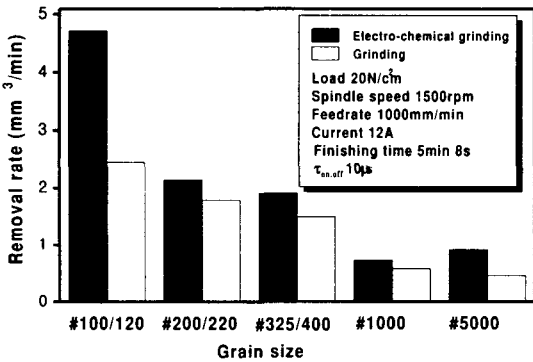


Fig. 10 Relation between of finishing pellet and removal rate

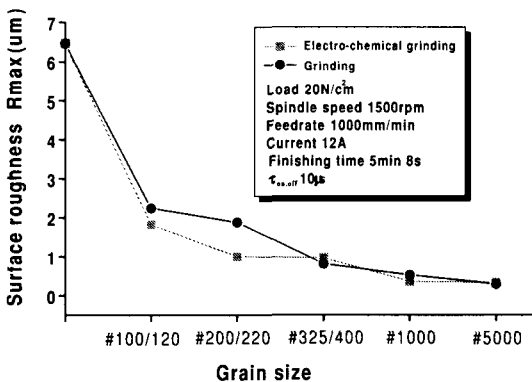


Fig. 11 Relation between grain size of finishing pellet and surface roughness

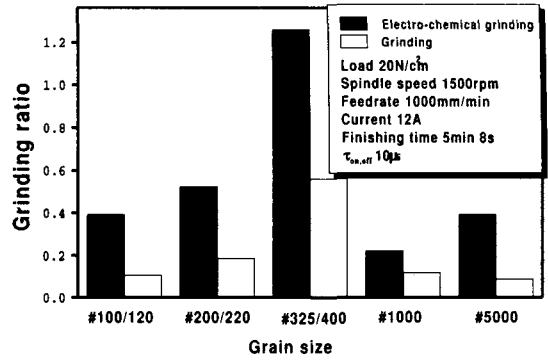


Fig. 12 Relation between grain size of finishing pellet and grinding ratio

되어 표면조도가 향상될수록 전해가공의 효과는 떨어졌다. Fig. 11은 여러 입도에 따른 표면 거칠기를 나타낸다. 실험결과 표면 거칠기는 입자크기에 절대적으로 영향을 받으며 전해연삭과 순수 기계적 연삭을 비교할 때 표면 거칠기는 크게 차이가 없었다. Fig. 12는 5종류의 입도를 갖는 펠렛에 대한 연삭비를 나타낸다. 실험결과에서 나타난 바와 같이 #325/400의 입도를 가지는 펠렛에서 가장 큰 연삭비를 나타내고 있다. 이는 #100/120, #200/230의 입도를 가지는 펠렛에서는 메탈래진본드의 특성상 피삭재의 표면에서 생성된 부동태층과 부동태층 깊이 이상으로 입자의 돌출부분이 크므로 부동태층의 제거량과 그 이상의 깊이만큼의 순수 기계적 연삭이 복합화되어 상대적으로 제거량이 많으나 그만큼 펠렛의 소모도 커서 연삭비는 상대적으로 낮다. 그러나 #325/400의 입도를 가지는 펠렛의 경우 연삭입자의 돌출길이가 상대적으로 부동태층의 깊이에 비하여 적정하고 칩(chip)에 의한 눈막힘등이 #1000, #5000에 비하여 적게 생기므로 연삭비가 상대적으로 높았다. #1000, #5000의 입도를 가지는 펠렛의 경우 연삭입자의 크기가 미세하므로 실제 공구부분에 많은 양의 칩이 끼여 눈막힘 현상이 발생하였다. 그에 따라 펠렛의 마모는 적지만 가공능력도 많이 저하된 것으로 생각된다. Fig. 13은 가공횟수 증가에 따른 실제 가공면의 표면형상(Surface Profile)의 변화를 나타낸다. 측정결과 전해연삭법은 순수 기계적인 연삭에 비하여 그 제거능률이 향상됨을 알 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 전해연삭법을 이용한 시편은 20회 정도의 가공에서 거의 절삭마크가 제거

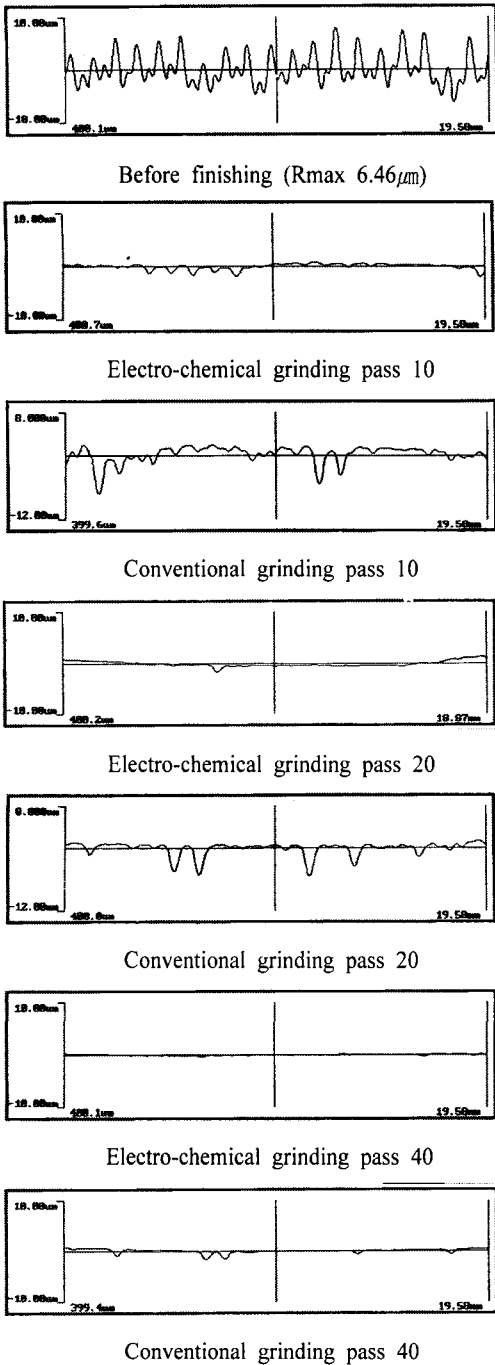


Fig. 13 Comparison of ground surface between electro-chemical grinding and mechanical grinding

되었으나 순수 기계적인 가공에서는 거의 40회 이상을 가공하여야 절삭마크가 제거되었다. 따라서 본 연구에 이용된 가공법은 순수 기계적 연삭에 비하여 2배 이상의 효율을 나타냄을 알 수 있다. 가공시 비교적 큰 가압력(20N/cm²)을 요구하므로 공구의 마모는 상대적으로 컸으며 공구의 형상이 공작물에 적절히 대응하지 못하여 그 가공효율이 감소한 것으로 생각한다. 그러나 실제가공 능력은 기계적인 연삭보다 크므로 보다 빠르게 주축을 이송시키고 금형의 형상에 적절히 대응하여 공구의 전면에 대하여 전해효과를 향상시킬 수 있는 공구의 자세제어가 가능하다면 그 가공능률은 보다 향상될 것이다.

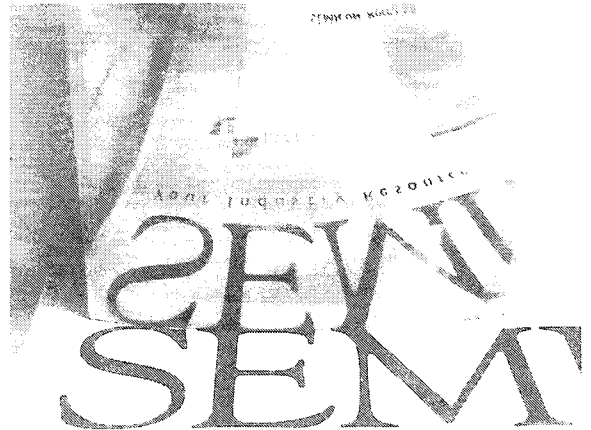


Fig. 14 Photo of die surface finished by electro-chemical grinding ($R_{max} 0.15 \mu m$)

5. 결론

본 연구에서는 금형의 절삭작업 후 존재하는 절삭마크를 효과적으로 제거하기 위하여 전해연삭법을 적용하였다. 그러나 금형의 다듬질가공은 공구와 공작물의 면이 직접 접촉하여 가공하게 되므로 종래의 전도성 메탈본드 연삭공구는 공작물과 공구 사이에 바로 통전이 되어 실제적으로 전해용출작용이 일어나지 않았다. 따라서 본 실험에서는 메탈레진본드 펠렛을 제작하여 실제 전해연삭에 적용하고 그 특성을 평가하였다. 전해연삭가공 결과 순수 기계적 연삭에 비하여 동등한 가공품위를

가지면서 제거능률을 2배정도 향상시킬 수 있었다. 향후 연구과제로는 다양한 형상과 절삭면을 지닌 가공물에 대한 적용과 특수한 곡면에 적절히 대응할 수 있는 공구의 개발이 필요하다고 생각된다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또 실험재료구입에 많은 도움을 주신 강남화성 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 황찬해, 유기태, 정해도, 안대균, “주철본드 다이 이몬드 펠렛에 의한 프레스 금형의 고능률 연마 가공(1),” 한국정밀공학회지, 제16권 3호, pp. 84~90, 1998.
2. N.Itoh, "A Study on The Lapping Machining Using Conductive Wheel with ELID," Doctor Thesis of Univ of Tokyo, pp. 101~106, 1999.
3. 이용철, 安齋正博, 中川威雄, “금형면의 자기연마가공 고효율화에 관한 연구,” 한국정밀공학회지, 제13권 6호, pp. 59~65, 1996.
4. 이두찬, 정해도, 안중환, Takashi Miyoshi, “자동 금형연마의 최적조건선정 전문가시스템 개발,” 한국정밀공학회지, 제14권, 제10호, pp. 58~67, 1997.
5. 유제구, “특수가공,” 대광서림, pp. 239~241, 1990.