

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

금형의 복합연마 특성에 관한 연구

박준민*, 정해도**

A Study on the Intergrated Finishing Characteristics for Dies and Molds

Jun-Min Park*, Hae-Do Jeong**

ABSTRACT

Automatic finishing process requires the development of high efficient and precision abrasive machining method for dies and molds. This study describes the evaluation of the finishing characteristics, such as surface roughness, topography and material removal depth of the electrolytic mixed abrasive machining methods. Experimental setup is composed of 3 axis machining center, a newly developed finishing attachment with constant pressure, electrode and electrolytic bath. Finally, we achieved a successful result that surface roughness is $0.01\mu\text{m Ra}$ and material removal depth is $120\mu\text{m}$ using electrolytic(0.8A, 30V) mixed abrasive (#400 CBN, #320 SiC) machining method.

Key Words : electrolytic mixed abrasive finishing(전해혼합 입자연마), 3 axis machining center(3축 머시닝센터), finishing attachment(연마 공구부), finishing characteristics(연마특성)

1. 서론

최근 고속가공기의 등장으로 인한 그라인딩 센터의 사양화와 더불어 금형의 자동연마 가공기에 대한 연구의 중요성이 날로 증대해 가고 있다. 금형가공에 있어서 마지막 공정인 연마가공의 표면품질(Surface integrity)를 향상시키기 위한 연구는 전해연마, 전해자기연마 등의 복합연마형태로 제시되고 있으며, 금형의 표면품위의 향상과 동시에 제거속도도 증가시키기 위한 연구가 진행중이다. 연마공정은 제거가공의 마지막 단계이며 전체 공정시

간의 30%~50%를 점유하므로, 전 공정시간의 단축과 고정밀, 고품위의 금형연마가공에 대한 연구의 중요성이 점차 증대해가고 있다. 또한 연마공정의 대부분은 고도의 숙련공에 의해 이루어지므로 다량의 금형을 높은 재현성을 갖고 가공하기 위해서는 자동화에 대한 요구도 절실한 실정이다⁽¹⁾.

본 연구에서는 연마자동화를 위하여 현재 절삭가공에 널리 보급되어 있는 3축 머시닝센터를 이용하고, 연마 Attachment를 개발하여 장착함으로써, 곡면연마가 가능하도록 개량하였다.

* 부산대학교 대학원
** 부산대학교 기계공학부

그리고, 연마의 고능률 및 고품위화를 도모하기 위하여 고정입자(Bonded abrasives)를 갖는 CBN숫돌과 자유입자(Free Abrasives)인 SiC(#320)를 이용하여 전해 복합연마를 시도하였다. 복합연마에 따른 실험결과는 표면거칠기(Surface roughness), 연마제거량(Material removal volume), 연마가공상태(Finished surface topography) 등을 측정하여 평가하고 고찰하였다.

2. 복합연마의 원리

일반적으로 입자가공(Abrasive Machining)은 연삭(Grinding)과 연마(Finishing)로 대별된다. 연삭은 다수의 고정입자를 이용하여 일정 이송속도(Constant feedrate)로 제거 가공하는 반면, 연마는 다수의 자유입자로 일정한 압력(Constant pressure)으로 제거 가공하는 가공법이라고 말할 수 있다.

본 논문에서 언급될 고정입자연마는 메탈, 레진 및 유리질 등의 결합체가 입자를 고정한 형태인 숫돌을 이용하여 일정한 압력에 의한 기계적으로 연마하는 방식이다. 그리고 전해연마는 도전체인 가공물과 공구에 각각 (+) 및 (-)전원을 연결한 후, 통전성이 우수한 NaCl수용액을 흘려 보내어, 가공물 표면을 전기 화학적(Electrochemical)으로 제거하는 연마방식이다. 혼합(고정+자유)입자 연마는 숫돌과 자유입자를 함유한 수용액(슬러리)를 함께 이용하여 정압상태에서 의한 기계적으로 연마하는 방법이다. 본 논문에서 언급되는 복합연마(Integrat Finishing)는 전해혼합입자연마법(Electrolytic Mixed Abrasives Finishing : EMAF)이다⁽²⁾.

복합가공의 원리는 가공물을 양극(+), 공구를 음극(-)으로 하고, 전해액에 전해전류를 흐르게 하여 양극의 가공물을 전해액 속으로 용출(溶出)하게 하는 전해가공의 원리와 이에 SiC(#320)의 자유연마입자가 함께 전가공면의 pick부위를 선택적으로 제거하게 된다. 결국 가공 메카니즘은 전기화학적 용출과 기계적 제거의 상승효과(Synergy effect)에 의해 제거능률을 향상하고, 화학적 표면처리에 의해 표면거칠기를 향상시킨다고 설명할 수 있으며⁽²⁾, 그 개념도는 Fig.1에 나타내었다.

즉, 복합연마는 숫돌의 회전력과 스프링에 의한 가압으로 인해 자유입자가 전가공면의 골부분에 머물면서 전가공면의 날카롭고, 뾰족한 산부분을 선행 가공하게 되고, 이러한 산부분이 존재함으로써 자유입자의 골부분에 대한 가공량은 미세할 것이다. 또, 여기에 고정입자가 산부

분을 가공하게 되고, 전해의 용출현상을 추가함으로써 상승효과를 기대할 수 있다. 즉, 자유입자와 고정입자는 산부분을 선택적으로 가공하게 되는 것이다. 또한 숫돌면의 마모 및 고정입자(CBN)손상을 줄임과 동시에 제거속도는 향상시킬 수 있다⁽³⁾.

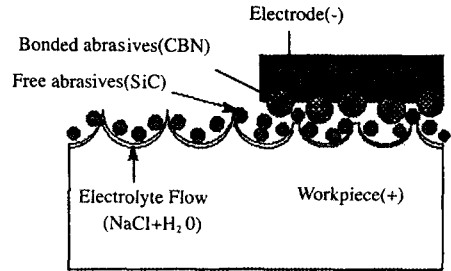


Fig. 1 Concept of die finishing using EMAF method

3. 실험장치

3.1 장치의 구성

본 연구에서는 평면균형에 대한 연마특성을 실험하기 위해 제작된 전체시스템의 개략도를 Fig.2에 나타내었다. 일정 압력을 유지하기 위한 기구로서 스프링을 장착하였고 공작물측에 양극(+)을 공구측에 음극(-)을 인가하였다. 스프링의 탄성계수는 공구동력계(KISTLER

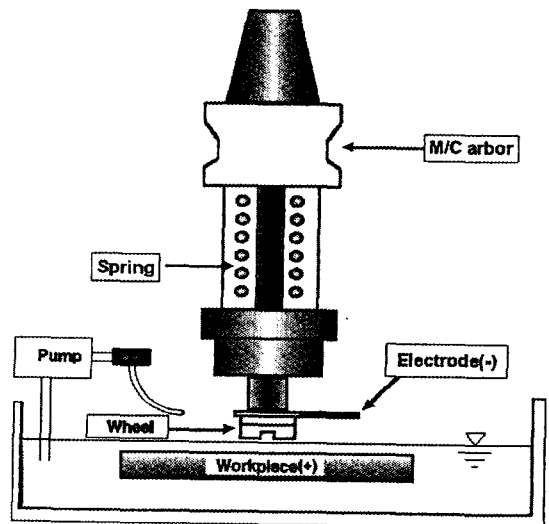


Fig. 2 Experimental setup

type 5019A)를 이용하여 측정하였고, 그 값은 3.92N/mm이다. 선행실험의 결과로부터 실험의 기계적인 parameter와 가공조건을 table1과 같이 고정하고, 전해가공에 대한 복합연마의 특성을 파악하였다.

Table 1 Experimental Conditions

workpiece	STD 11(JIS SKD 11)
wheel grain size	#100, #200, #400, #800, #2000
electrolyte	NaCl 20 wt%
current	7 A
pulse width	$\tau_{on} : 2\mu s, \tau_{off} : 2\mu s$
Spindle rpm	800
load	19.5 N (6.5N/cm ²)
feedrate	200mm/min(0.25mm/rev)

3.2 슷돌

본 실험에 사용된 슷돌은 결합재가 주철인 CBN 슷돌을 사용하였으며, 슷돌의 단면과 밀면형상을 Fig.3에 나타내었다. 주철본드스�돌은 일반 연삭스�돌에 비해 고강도를 가지며, 내마모성이 우수하여 가공표면의 품위향상은 물론 전해드레싱성도 양호한 장점이 있다. 또한 주철 matrix는 다른 메탈본드 슷돌에 비해서 피연삭성이 나쁘기 때문에 연삭비는 떨어지지 않으며, 장기간의 가공을 행할 수 있다.

스�돌의 형상은 3개의 세그먼트가 조합된 형태로서 중공형으로 구성하였으며, 연마액의 순환 및 칩의 배출이 원활할 수 있도록 밀면에 부채꼴형의 홈이 나도록 설계되었

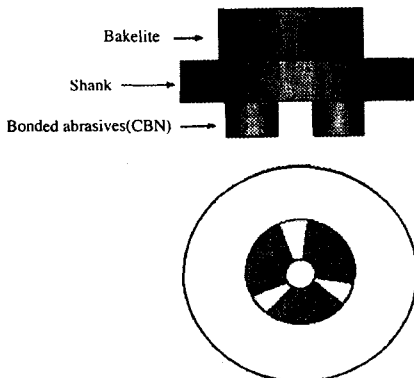


Fig. 3 Structure of cast iron bonded CBN wheel

다. 또 전체 시스템과의 절연을 위해서 생크의 뒷부분에 절연체인 베이크라이트(bakelite)를 사용하여 볼 스플라인 샤프트(Ball Spline Shaft)와 볼트체결이 가능토록 하였다.

3.3 전해전원

전해장치의 전원 공급은 FUJI ELIDER 910(FUJI DIES Co.)를 이용하였다. 본 실험에서는 전해가공조건을 선행실험의 결과로부터 선택하여 table1과 같이 고정하여 실험을 수행하였다. 공구의 전극은 carbon brush를 통해 회전체인 슷돌 끝단에 전원이 공급되도록 설치하였으며, 인가전류(Ip:7A) 및 인가전압(Vp:10V)에 대하여 측정전류와 전압은 각각 800mA와 30V로 나타났다.

3.4 전가공면

노즈반경이 10mm인 초경(WC)볼 엔드밀을 이용하여 table2와 같은 절삭조건으로 연마실험을 위한 전가공면을 형성하였다. Fig.4에서와 같이 피크 피이드량 p와 공구 한날당 이송량 f를 동일하게 가공하는 fp concept을 이용하여 절삭면을 형성하였다. 식(1)에 표2의 절삭조건을 대입하면 가공면의 이론적 표면거칠기(Rth)는 약 3 μ m이 된다.

$$R_{th} = \frac{f^2}{8R} \quad (1)$$

(Rth : 이론적 표면거칠기 R : 공구반경, f : 공구날당 이송량)

Fig.4의 fp concept 모델의 (c)의 조건인 피크 피이드량 p와 공구 한날당 이송량 f를 동일하게(f=p)할 경우

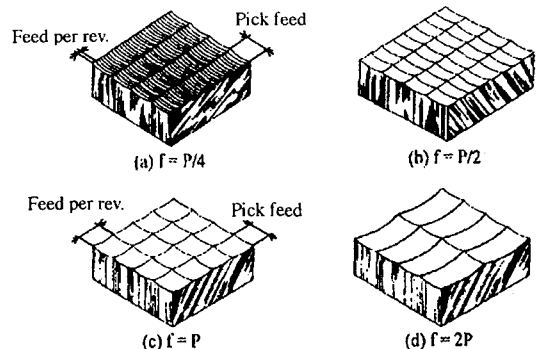


Fig. 4 fp concept models

절삭가공면의 형상(modified profile)은 직교양방향에서 동일하게 나타난다. table2의 절삭조건은 연마를 위한 전가공면의 형성을 위한 조건으로서, $f=p=0.5\text{mm}$ 로 설정하였을 때 절삭면의 표면거칠기(p-v value)는 실제 절삭 후 측정된 결과는 표면거칠기 값이 이론치에 접근하고 있음을 알 수 있다. Fig.5에 실제 절삭면인 전가공면으로서 표면거칠기의 값이 $3.4260\mu\text{m}$ 로 이론치와 약간의 차이는 있으나, 근접된 값을 알 수 있다. 본 실험의 표면거칠기는 Taylor Hobson사의 Form Talysurf Series 2로써 표면거칠기를 측정하였다.

Table 2 Conditions of cutting experiment

spindle rpm	800
feedrate	400mm/min(0.5mm/rev)
pickfeed	0.5mm
cutting depth	0.5mm

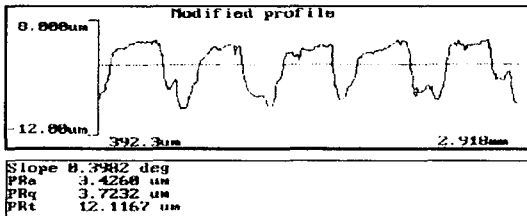


Fig.5 modified profile of cutting surface

3.5 실험방법

연마실험은 볼 앤드밀 절삭공구 이송방향에 수직인 방향으로 연마공구를 이송시켰고, 연마방식 및 조건은 표3과 같이 4가지의 방법을 선정하여 연마특성을 비교평가하였다. 실험에 사용한 연마액은 전해액으로 대응하고, #320 SiC입자는 전해액에 20 vol%로 넣어 슬러리 상태로 순환과 동시에 교반시키며 실험을 수행하였다.

4. 실험결과

4.1 표면거칠기

그림6.7에서 볼 수 있듯이, 연마면의 표면거칠기는 단순한 고정입자연마에 비해 고정입자에 전해를 가하거나 자유입자(SiC)를 첨가한 전해고정입자연마 및 혼합 입자

Table3. Conditions for die finishing methods

Finishing types	conditions
Bonded Abrasives Finishing (BAF)	CBN wheel(loading:19.5N) +electrolyte(NaCl 20wt%)
Electrochemical Bonded Abrasives Finishing(EAF)	BAF + electrolytic power (800mA,30V)
Mixed(free+bonded) Abrasives Finishing (MAF)	BAF + free abrasives(SiC:#320)
EMAF	ECAF +free abrasives (SiC:#320)

연마가 우수함을 알 수 있다.

전해고정입자연마의 경우는 연마반복횟수의 증가에 따라 표면거칠기 값(Ra)이 고정입자 연마보다 가파른 기울기를 갖는다. 이는 전해에 의한 용출이 표면거칠기 향상에 효과적인 것으로 사료된다. 혼합형입자연마는 반복횟수 20회 이전에 표면거칠기 값이 급격히 감소함이 뚜렷하며, 고정입자(CBN #400)보다 입도가 큰 자유입자(SiC #320)가 적극적으로 연마에 참여하고 있음을 입증한다.

복합연마 즉, 전해혼합입자연마는 Fig.7에 나타난 바와 같이 반복횟수 20회에서 이미 $0.2\mu\text{m}$ Ra를 얻을 후 60회 반복한 후에는 $0.01\mu\text{m}$ Ra에 도달하였다. 이는 복합연마가 전해에 의한 전기화학적 용출과 고정 및 자유입자에 의한 기계적 제거작용의 상승효과에 의해 단시간내에 목표연마면 거칠기에 도달하기 위해서는 가장 효과적이고 연마 반복횟수 10회에서도 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있었다. 그리고, 연마숫들의 주축회전수와 가공면 거칠기의 상관관계를 조사한 결과를 Fig.8에 나타내었으며, 회

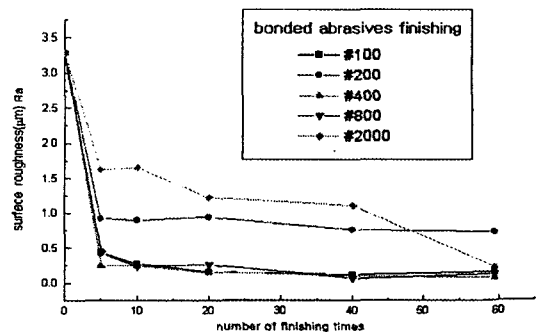


Fig. 6 Comparison of surface roughness of STD11 generated by five types of bonded abrasive mesh size

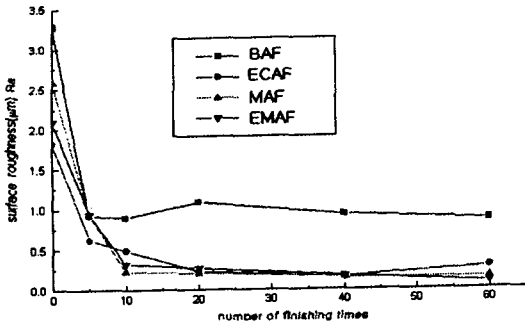


Fig. 7 Comparison of surface roughness of STD generated by four types of finishing method

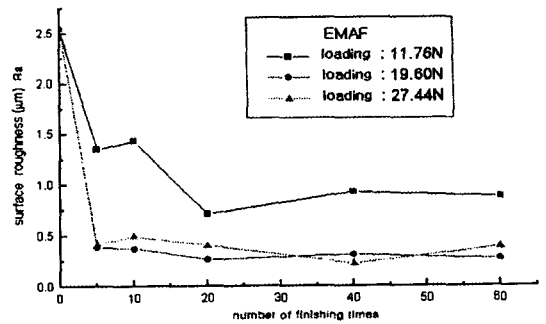


Fig. 9 Surface roughness changes by finishing pressure in EMAF

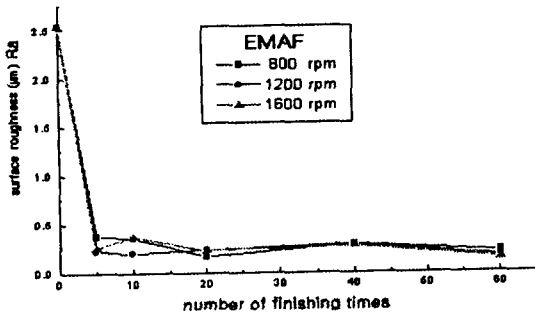


Fig. 8 Surface roughness changes by spindle rotation in EMAF

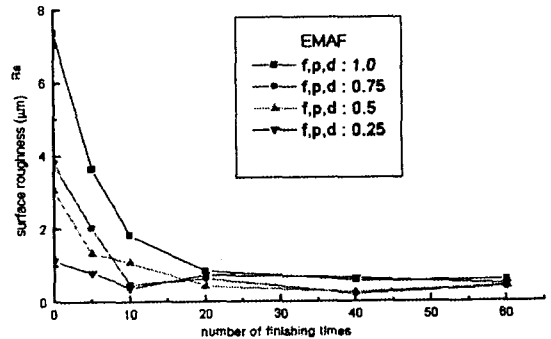


Fig. 10 Comparison of surface roughness of STD 11 generated by EMAF for four types of pre-cutting surface

전수의 변화는 가공면의 거칠기와는 서로 독립적이며 큰 영향을 주지않음을 알 수 있었다. Fig.9에서는 가압력에 따른 복합연마의 특성을 비교하였다. 연마에서는 가압력의 변화가 중요한 요소로서 작용함을 알 수 있으며, 본 실험에서 가압력이 증가됨에 따라 연마면의 표면거칠기가 향상됨을 알 수 있다. 그러나, 본 실험에서의 최적의 가압력인 19.6N보다 가압력을 높게 하였을 경우(27.44N)에 표면거칠기의 변화에는 큰 차이가 나타나지 않음을 알 수 있다. 이는 가압량이 증가하게 되면, 자유입자의 유동상태를 억제하여 오히려 연마면의 품질을 악화시키기 때문이라고 사료된다.

본 연구에서는 일반적인 연마공정에 있어서 간과할 수 없는 전가공면에 대한 평가를 위해 Fig.10에서와 같이 feedrate(f), pickfeed(p) 및 절입깊이(d)를 각각 1.0, 0.75, 0.5, 0.25의 네가지경우로 전가공면을 달리 하여 실험한 결과를 Fig.10에 나타내었다. 실험의 결과 약 20회정도에서 1 μ m Ra이하의 표면거칠기를 얻을 수 있어서 전가공면의 상태에 큰 영향을 받지 않고 복합연마 방식이

연마제거효과가 매우 높음을 보여주고 있다. 따라서 금형의 총가공시간을 고려한다면 f,p를 크게 하여 절삭가공시간을 단축시키고 20회이내의 복합연마에 의해 1 μ m Ra정도의 금형 가공면을 쉽게 얻을 수 있다.

4.2 연마제거량

연마방법에 따른 연마제거량을 Fig.11에 나타내었다. 재료제거량은 표면거칠기 측정에 이용된 Taylor Hobson사의 Form Talysurf Series 2로써 단면의 단차를 측정하여 제거량을 계산하였다. 각 연마방식과 비교해서 복합연마의 경우가 재료제거량이 약 2배 정도의 능률을 보이고 있다. 이는 복합연마의 원리에서도 설명된 바와 같이 기계적 연마방식과 전기-화학적 연마의 상승효과에 의한 결과라고 사료된다.

4.3 가공면의 평가

연마면의 평가는 광학현미경사진($\times 50$)과 표면거칠로서 평가하였으며 Fig.12에 나타내었다. 연마가공 전,후

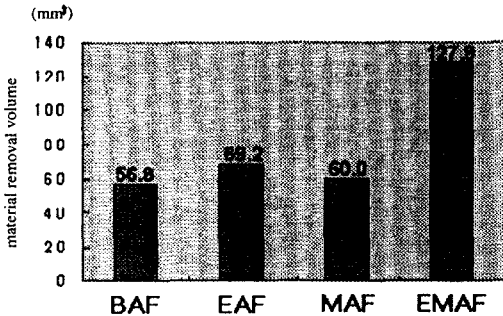


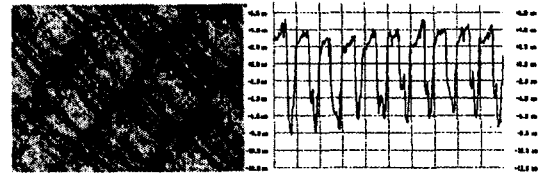
Fig. 11 Comparison of material removal volume of STD11 generated by four types of finishing methods

를 통하여 연마면을 볼 수 있듯이, 가공면에서도 고정입자면과 전해고정입자면 및 혼합입자면의 경우 전가공면의 절삭공구의 궤적이 많이 잔존하지만 복합연마의 경우에는 전가공면의 절삭궤적이 완전히 제거된 연마면을 보여주고 있다. 고정입자의 경우 Ra :0.8930 μ m의 표면거칠기를 가지나, 이에 반해 복합입자의 경우 Ra :0.1207 μ m의 현저한 차이를 보여주고 있다. Fig.12의 ㉔, ㉕, ㉖, ㉗에서의 실험조건은 가압력 19.6N, 고정입자 #400 주축회전수 800rpm, 이송속도 400(m/min)에 대해 각 연마방식에 따른 연마가공면과 표면거칠기의 profile을 나타내었다. Fig.12의 가공면의 평가는 연마반복 횟수 10회에 대해 실험한 것으로 복합연마에서는 전가공면의 절삭면이 나타나지 않았으며, 이는 가공능률면에서 복합연마의 고능률화를 입증함을 알 수 있다.

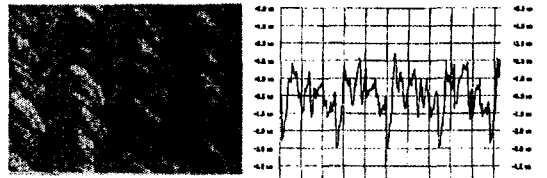
5. 결 론

본 실험의 결과로부터, 복합연마가공이 능률면에서나 공작물의 품위면에서 우수한 특성을 지닌다는 것을 알 수 있었으며, 복합연마가공의 특성을 요약하면 아래의 4가지 특성으로 요약된다.

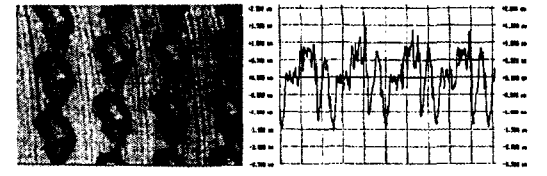
- ① 기계적 가공과 전기화학가공의 복합은 제거능률 및 가공면 품위 향상에 기여한다.
- ② 복합연마는 다른 연마가공방법보다는 뛰어난 연마제 거속도와 표면거칠기를 실현할 수 있었다.
- ③ 본 실험에서 사용된 자유입자(#320 SiC)와 최적의 고정숫돌입자는 #400를 사용하였으며 최적의 관계에 대한 여부는 향후 조사할 것이다.
- ④ 각 연마방식 중에서 우수한 연마효과를 보인 복합연마는 표면거칠기가 상이한 전가공면에 대한 평가에서도



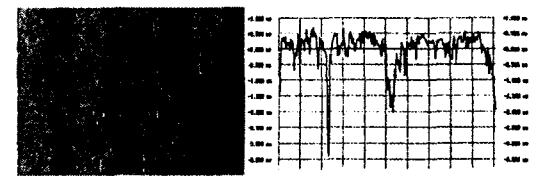
㉔ before finishing
($\times 50$, Ra:3.4408 μ m)



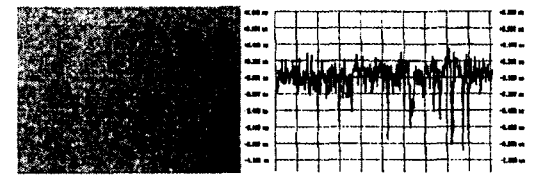
㉕ after BAF
($\times 50$, Ra:0.8930 μ m)



㉖ after ECAF
($\times 50$, Ra:0.5323 μ m)



㉗ after MAF
($\times 50$, Ra:0.3639 μ m)



㉘ after EMAF ($\times 50$, Ra: 0.1207 μ m)

Fig.12 Comparison of finished surface topography generated by four types of finishing method (left:micrograph,right:profile of surface)

제거능률이 뛰어났다.

본 실험에서는 평면에 대해서만 그 특성을 파악하였으나, 곡면금형이나 다른 연마입자와의 관계 및 전가공면이

연마에 미치는 영향 등에 대하여 앞으로 연구가 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 이두찬, 정해도 : 금형 자동연마의 최적조건선정 전문가 시스템 개발, 한국정밀공학회 秋季學術大會 論文集, pp. 519-523, 1996.
2. Masahiro YOSHIDA : 電解研削による曲面の仕上げ加工, 日本 砥粒加工學會誌 Vol. 37, pp. 34-40 No.2 MAR, 1993.
3. 清宮 紘一 : 電解砥粒鏡面仕上げ方法および装置, 日本 砥粒加工學會誌 Vol. 37 No.4 JUL. pp. 51-56, 1993.