

# 放電加工된 공구강표면의 研磨材 流動加工에 관한 研究 (A Study of Abrasive Flow Machining on EDMed Surfaces of Tool Steel)

최 재찬\*, 김 창호\*\*, 허 관도\*\*\*

\* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소

\*\* 부산대학교 대학원 \*\*\* 동의대학교 기계설계공학과

## ABSTRACT

A relatively new non-traditional finishing process called Abrasive Flow Machining(AFM) is being used to deburr, polish and radius workpiece or produce compressive residual stresses by flowing an abrasive-laden viscoelastic compound across the surface to be machined. This paper presents the effects of AFM on surfaces of tool steel produced by EDM and W-EDM. Using AFM, white layer produced by EDM is erased almost equally and the amount of metal removal is significantly affected the initially machined surface condition of workpiece. The dimension of workpiece is enlarged and its surface roughness is improved as AFM time is increased. The optimal AFM time can be established from the experimental results. It is considered that the grinding method like AFM is useful to grind complex or slim geometry of workpiece even. Scanning Electron Microscopy(SEM) was used to study the surface characteristics of the workpiece before and after AFM.

Key words : Deburr (버어제거작업), AFM (Abrasive Flow Machining : 연마재 유동가공), EDM(Electro Discharge Machining : 방전가공), SEM (Scanning Electron Microscopy : 주사식 전자 현미경), tool steel (공구강)

### 1. 서 론

정밀부품이나 금형을 제조하는데 있어서 최종단계인 연마작업은 지루하고 시간이 많이 소요되며 주로 고된 수작업이며 또한 균일한 표면정도를 얻기 위하여 고도의 숙련된 연마작업자를 필요로 한다. 특히 방전가공, 전해가공 및 초음파가공 등 비제재식 가공에 의한 작업이 늘어나면서 이들 가공에 의해 생성된 표면은 제거하기 위해 연마작업을 하기 위해 드는 비용은 총 금형제작비의 약 20% 정도를 차지하고 있음을 감안할 때 연마작업을 자동화하는 것이 필요하다.

연마작업의 한가지 방법으로서 연마재의 유동에 의해 표면을 연마하는 "연마재 유동가공"(Abrasive Flow Machining: AFM)이라고 불리는 방법이 있다. 이것은 다이아몬드나 실리콘 카야마이드와 같은 연삭입자를 함량이 있는 재료와 혼합시킨 반고체상의 유동성 연마재를 공작물의 구멍이나 통로에 상하로 장체로 유동시키는 방식으로 연마재에 의해 비어를 제거하거나 표면조도를 개선시키고 예리한 모서리를 둥글게 함은 물론 내부의 형상이 복잡한 한 종류 이상의 부품을 동시에 연마작업이 가능하다. 또

鏡面 研削, 變質層의 제거, 압축잔류응력의 생성 등 연마작업의 고정도, 고능률가공이 가능하기 때문에 의료 및 항공기 부품에서부터 전자 및 자동차 부품의 대량생산에 이르기까지 그 응용범위가 확대되고 있으며<sup>(1-2)</sup> AFM인자들 간의 관계를 규명하기 위해 많은 연구를 하고 있다.<sup>(3-8)</sup>

본 연구에서는 냉간성형용 합금공구강인 STD-11의 표면에 형조방전가공(EDM) 및 와이어방전가공(Wire-EDM)한 후 연마재 유동가공할 때 개선된 표면조도와와의 관계를 SEM을 비롯한 표면조도계에 의해 비교분석하였다.

### 2. 방전가공(EDM)

형조방전가공은 등유 등의 방전유가 채워져있는 가공탱크 안의 테이블 위에서 서로 마주 대하고 있는 전극과 공작물사이에 수십~수백 볼트의 전압을 인가한 후 그 간격이 수~수십 마이크로미터의 짧은 거리에 접근하면 전기장이 형성되어 방전이 발생하면 순간적으로 3,000℃ 이상의 열로 금속을 용해시키는 것이다.<sup>(9-11)</sup>

Fig.1은 SKD-11의 형조방전가공시 열변화에 의해 생긴 정면 및 측면에 대한 SEM 사진(배율: ×200)으로서 Fig.1 (b)와 같이 일반적으로 白層(white layer)이라는 용융층이 있고, 용융층의 아래는 제거열에 의해 형성된 인영층이 있으며 그 아래가 母材

의 조직이다. 이 백층은 절삭재료가 방전액의 분해 시 생기는 탄소가 표면에 침탄되어 탄소를 함유한 경도가 높은 표면층으로서 그 깊이는 표면에서 10~20 $\mu$ m 정도이다. 이것은 마르텐사이트와 산화 오스테나이트 및 비용해 탄화물로부터 만들어지는 것으로 micrivickers 1000 혹은 그 이상이 되며 용융층 아래의 열영향층의 깊이는 50 $\mu$ m 이내에서 존재한다.

가공된 표면은 한번 용융되어 재고된 층이 존재하므로 표면에 인장응력이 잔류하여 피로강도를 약하게 하기 때문에 Fig.1의 (a)와 같이 다수의 미세한 케칭균열이 발생하여 금형의 파손이나 프레스 금형의 작업시 치핑(chipping)을 유발하게 되므로 래핑(lapping)이나 호닝(honing) 등으로 이 균열을 제거함과 동시에 500~550°C로 재래피링하여 잔류응력을 제거하는 것이 바람직하다.

Fig. 1의 위치

와이어 방전가공기는 가는 와이어(보통  $\phi$ 0.05~0.30mm)를 전극으로 하고 이 와이어에 장력을 준 상태에서 와이어를 보내면서 공작물과 전극인 와이어 사이에 발생하는 방전에너지에 의하여 공작물을 가공하는 것으로서 2차원의 윤곽형상을 가공하는 것이다. 합금공구강인 SKD-11을 유중 형조방전가공하였을 때와 와이어 방전가공한 경우 표면으로부터의 깊이에 따른 경도변화를 Fig.2에 나타내었다.

Fig. 2의 위치

이 그림에서 油中の 형조방전가공에 의한 면이 보통 용융재용 고층에서 모재에 비해 경도가 높은 값(Hv 900~1000)을 나타내고 있음에 비해 와이어 방전가공에 의한 것은 오히려 모재보다 낮은 값을 나타낸다. 또한 와이어 방전가공의 경우 용융재용고층의 안쪽에 존재하는 열영향층부에서도 모재보다 경도가 약간 낮지만 15 $\mu$ m 안쪽에서는 거의 모재의 경도로 회복된다. 이것은 와이어 방전가공은 가공액으로서 탈이온수를 사용하여 방전하므로 油中 방전가공과는 달리 침탄이 생기지 않지만 와이어 전극재료가를 전기전도율이 높은 동이나 황동이기 때문에 와이어로부터 구리원자가 표면에서 철과 고용되고 이러한 동-철 고용체가 탄화물이나 잔류 오스테나이트의 사이에 섞여 있어 표면의 경도를 저하시킨다고 나코야 공업연구소에서 보고하고 있다.<sup>19)</sup>

### 3. 연마재 유동 가공 (Abrasive Flow Machining)

#### 3.1 연마재 유동가공의 원리

연마재 유동가공(AFM)의 원리는 Fig. 3과 같이 서로 반대방향인 두 개의 실린더가 피가공물과 치구사이에 형성된 경로를 통하여 반고체상의 침탄성 매체인 매디아(media)를 상하로 압출시킴으로써 표면 또는 모서리를 서서히 윤질하게 연마하는 것이다. Fig. 3의 (a)는 실험을 위한 준비가 완료된 상태를, (b), (c)는 피가공물의 형상부를 상하로 움직이는 매디아의 유동을 각각 보여준다.

Fig. 3의 위치

#### 3.2 Media

매디아는 연마재(abrasive) 입자와 유연한 반고체상(semisolid)의 매체(carrier)로 혼합된 것으로 이 매체는 제한된 경로 속으로 힘을 가하면 연마재 입자를 적당한 위치에 잡고 있다. 이와 같은 점성상태에서 Fig. 4와 같이 매디아가 압력을 받아서 시편의 홈을 통과하면 연마재가 회전하면서 표면의 거친 산과 골들을 깎아내는 연마작용을 한다. 매체의 점도와 연마재 입자의 크기, 형태 및 함유율(concentration)은 원하는 가공결과에 따라 변화시킬 수 있다.

Fig. 4의 위치

연마재 입자는 주로 silicon carbide, boron carbide, aluminum oxide 및 diamond가 사용되며, 일반적으로 탄화규소가 대부분의 금형제질에 적용되고 있으나 조정합금으로 만든 금형은 다이아몬드가 연마재로 사용되고 있다. 연마재 유동가공 전의 초기가공된 표면이 좋을수록 작은 입자를 사용하며 연마재의 입도는 #24~#220 범위 내의 입자가 많이 사용된다.

매디아의 점도, 가공압력 및 경로치수가 매디아의 유동량(제한된 경로를 흐르는 연마재의 속도)을 결정하고 이것이 연마량, 재료제거량과 모서리의 반경에 영향을 미친다.

#### 3.3 AFM 실험용 시편

냉간성형용 합금공구강인 STD-11의 표면에 매디아가 유동할 수 있는 통로를 형조방전가공 혹은 와이어 방전가공에 의하여 표면조도가 동일한 가로 $\times$ 세로가 각각 10 $\times$ 1, 15 $\times$ 5, 20 $\times$ 3, 30 $\times$ 1mm인 4개의 홈을 가공하였다. 시편의 갯수는 표면조도를 EDM 용 시편은 황삭, 중삭, 정삭조건별로 각각 20개씩, W-EDM용 시편의 경우 1차, 2차, 3차, 4차가공한 조건별로 각각 20개씩의 시편을 Fig. 5의 음영부분과 같이 예비가공하였다.

Fig. 5의 위치

시편의 홈을 예비가공하기 위하여 제작에 사용된 형조방전가공기는 Charmilles Roboform 200(Swiss), 와이어 방전가공기는 Agiecut 100D(Swiss)로서 Table 1 및 2는 각각 형조방전가공 및 와이어 방전가공조건이다. Table 1에서 EDM gap은 전극과 공작물간의 틈새이며, Table 2에서 M은 전원공급형태로서 M5는 황삭 및 중삭용, M2는 정면가공용이다. 음색은 공작물과 전극간의 틈새이며, pulse duration은 방전전류가 흐르는 시간폭으로 정삭으로 갈수록 틈새와 방전시간을 작게 설정하였고 와이어 장력은 상하 와이어 가이드사이에서 와이어를 잡고있는 장력이다.

Table 1의 위치

Table 2의 위치

#### 3.4 AFM 실험장치 및 방법

AFM 실험에 사용된 기계는 Extrude honing machine 100 series(Extrude Hone Ltd.미국)로서 연마재 입자는 Fig. 6과 같은 입도 #70인 다이아몬드를 사용하였고, AFM공정 중 시편의 통로

로 보내는 매디아의 양(media displacement)은 1회에 2048cm<sup>2</sup>로 했으며, 매디아의 압입압력은 16.6~94.4 kg/cm<sup>2</sup>로 실험했다. Table 3은 실험에 사용한 AFM 실험조건이다.

Fig. 6의 위치

Table 3의 위치

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 표면조도

형조방전가공 및 와이어 방전가공으로 가공된 홈을 연마재 유동가공하였을 때, 시간변화에 따라 변화된 표면조도를 연마재 유동방향의 평행(longitudinal)방향에 대해 표면조도 측정기(Tokyo Seimitsu, Surfcom-590A, Japan)로 측정하였다. 측정용 바늘은 반경 2.54 $\mu$ m 다이아몬드 바늘이며 표면조도의 높이는 1.25 $\mu$ m 간격으로 5mm씩 측정하였고 표면조도의 특성은 0.8mm의 컷오프(cutoff)를 기준으로 평가하여  $\mu$ m  $R_{max}/\mu$ m  $R_a$ 로 나타내었다. 또 AFM 전후의 표면의 특성을 이해하기 위하여 주사식 전자현미경(Scanning Electron Microscopy(SEM): JEOL JSM 5400, Japan)을 사용하였다.

##### 1) 와이어 방전가공(W-EDM)한 시편

W-EDM으로 각각 1차~4차한 시편을 AFM하여 연마재의 유동방향과 동일한 방향으로 표면조도를 측정하였을 때, Fig. 7과 같이 1차 가공한 황삭시편은 14.8 $\mu$ m $R_{max}$ (2.2 $\mu$ mRa)에서 3.4 $\mu$ m $R_{max}$ (0.4 $\mu$ mRa)로, 4차까지 사삭가공한 시편은 8.7 $\mu$ m $R_{max}$ (1.2 $\mu$ mRa)에서 2.8 $\mu$ m $R_{max}$ (0.3 $\mu$ mRa)로 각각 개선되었다. W-EDM으로 가공한 시편은 가공횟수에 관계없이 AFM시간이 5분 이내가 적당하며 5분이 넘을 경우, 가공시간을 증가시켜도 표면조도는 거의 개선되지않았다.

Fig. 7의 위치

Fig. 8은 와이어 방전가공한 합금공구강(STD-11)의 AFM 전후의 조직을 주사식 전자현미경(SEM)으로 찍은 사진이다. 방전가공에 의해 합금공구강에 생성된 변질층(백층)의 두께는 10~22  $\mu$ m이며, 20분 동안 AFM한 후의 변질층 두께는 1~5  $\mu$ m으로 변질층의 두께가 AFM에 의해 9~17  $\mu$ m가 제거되어 모재가 갖고 있는 특성을 충분히 발휘할 수 있을 것이다.

Fig. 8의 위치

##### 2) 형조 방전가공(EDM)한 시편

황삭, 중삭 및 정삭의 3종류로 준비한 시편을 AFM하였을 때 AFM시간의 증가에 따라 개선되는 표면조도와와의 관계는 Fig. 9와 같다. 황삭시편은 가공시간이 증가할수록 표면조도는 현저하게 개선되었으나 중삭 및 정삭 방전가공한 시편의 경우, 5분 이상 가공해도 3분 동안 가공한 표면조도에 비해 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 또 황삭 및 정삭가공한 시편을 15분동안 AFM하였을 때, 10.2 $\mu$ m $R_{max}$ (3.4 $\mu$ mRa)의 정삭가공한 시편은 2.2 $\mu$ m $R_{max}$ (0.4 $\mu$ mRa)로, 43.0 $\mu$ m $R_{max}$ (5.9 $\mu$ mRa)의 황삭시편은 23.1 $\mu$ m $R_{max}$ (3.2 $\mu$ mRa)로 향상되었다. 따라서 AFM후의 표면은 AFM전의 시편의 초기 표면조도에 의해 좌우되며 연마재 유동가공의 효과는 한계가 있으므로 AFM후의 양호한 표면을 얻으려면 초기의 표면이 좋아야한다.

Fig. 9의 위치

Fig. 10은 시편을 연마재 유동가공에 의해 3분, 10분, 20분씩 각각 가공하였을 때 개선된 표면상태를 공구현미경으로 찍은 것으로 20분후의 표면(Fig.10(d))는 방전된 초기표면에 형성된 둥근형상의 거친 산과 골들이 연마재의 유동에 의해 거의 제거되고 매끄러운 표면이 형성되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 10의 위치

#### 5. 결론

EDM 및 W-EDM된 냉간성형용 합금공구강(STD-11) 표면을 연마재 유동가공한 결과 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

- 1) 방전가공에 의해 금속의 표면에 백층과 미세한 균열이 존재하며 방전가공된 표면을 연마재유동가공으로 이 백층이 거의 제거될 수 있음을 SEM을 통하여 확인하였다.
- 2) 밀링이나 선삭가공의 경우 공구에 의해 금속의 표면에 일정한 방향성이 생기는 것과는 달리 방전가공된 표면은 이러한 방향성이 없는 요철이 존재하며 AFM에 의해 전체적으로 균일하고 부드러운 표면조도를 얻을 수 있었다.
- 3) AFM에 의해 개선되는 표면조도는 시편의 표면에 행한 방전가공의 종류 및 표면상태에 따라 다르므로 양호한 표면을 얻기 위해서는 AFM 가공 전의 시편의 표면조도가 좋아야 한다. 또 AFM 가공시간이 길수록 표면조도가 양호하게 개선되었으나 AFM 가공시간이 3-5분 이상되면 가공시간을 증가시켜도 AFM의 효과가 적은 한계 가공시간이 존재함을 알 수 있었다.
- 4) 시편의 홈의 치수가 AFM에 의해 확대되므로 실제 균형이나 부품가공시 확대여유를 감안한 설계가 필요하다. 그러나 표면조도와 마찬가지로 AFM 가공시간이 3-5분 이상되면 가공시간을 증가시켜도 홈은 거의 확대되지않았다.
- 5) 래핑용 지식의 출입이 불가능한 복잡한 형상이나 미세하고 좁은 홈의 표면을 연마재 유동가공과 같은 방법을 이용하여 일정하고 균일한 표면을 얻을 수 있다고 생각한다. AFM의 응용분야를 넓히기 위해서는 방전가공 이외에 밀링이나 선삭과 같이 다양하게 절삭가공된 금속표면 뿐만 아니라 다양한 재질의 금속에 대한 연구에 대해서도 AFM의 효과에 대한 계속적인 연구를 행할 필요가 있다고 생각한다.

#### 참고 문헌

1. T.R. Loveless, R.E. Williams, K.P. Rajukar, "A study of the effects of abrasive flow finishing on various machined surfaces", Journal of Materials Processing Technology, 47, pp. 133-151, 1994.
2. T.R. Loveless, "A study of the effects of abrasive flow finishing on various machined surfaces", M.S. Thesis, University of Nebraska-Lincoln, 1993.
3. L.J. Rhoades, "Abrasive flow machining : a case study", J. Mater. Proc. Techn., 28, pp. 107-116, 1991.
4. L.J. Rhoades, "Abrasive flow machining", Manuf. Eng., pp. 75-78, Nov. 1988.

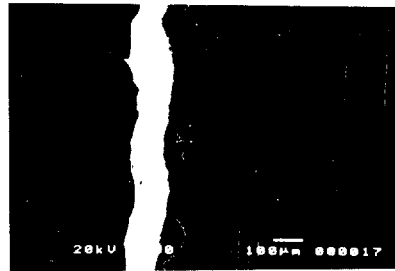
5. K. Przylen, 'Abrasive flow machining - A process for surface finishing and deburring of workpiece with a complicated shape by means of an abrasive laden medium, K.P. Rajurkar(Eds.) Advances in Non-traditional Machining', ASME, New York, PED-Vol. 22, pp. 101-110, 1986.
6. R.E. Williams and K.P. Rajurkar, "Metal removal and surface finish characteristics in abrasive flow machining. : Mechanics of Deburring and Surface Finishing Processes, R.J.Stango and P.R. Fitzpatrick (Eds.)",ASME, New York, PED-Vol. 38, pp. 93-106, 1989.
7. R.E. Williams, K.P. Rajurkar, and J. Kozak, "Metal removal distribution and flow characteristics in abrasive flow machining", Trans. NAMRI/SME, XX, pp. 145-150, 1992.
8. R.E. Williams, "Investigation of the abrasive flow machining process and development of a monitoring strategy using acoustic emission", Ph.D. Dissertation, University of Nebraska-Lincoln, 1993.
9. 김 창호, 방전가공-형조방전 및 와이어 방전가공의 완전한 활용법, 機電研究社, 1992.
10. 김 동주, "방전가공 기초이론", 프레스기술 3월호, pp. 69-81, 1995.
11. 전 태우, 박 홍식, 예 규현, 장 세복, "冷間成形 金型用鋼 (STD-11)의 放電加工面 性狀에 관한 연구", 韓國精密工學會 93年度 秋季學術大會論文集, pp. 96-100, 1993.

Table 3. Configurations of Extrude Honing Machine

Profile Series	Cylinder diameter	Media displacement	Media extrusion pressure
100	100 mm	2049 cm <sup>3</sup>	16.6~94.4 kg/cm <sup>2</sup>



(a) frontal side



(b) lateral side

Fig.1 Microstructure of EDMed surface (SEM,  $\times 200$ , EDM condition : peak current 12A pulse duration 50 $\mu$ s)

Table 1. EDM machining condition for STD-11 (Electrode:Cu)

Machining condition	Machining model	EDM gap (mm)	Peak current	Machining voltage	Pulse duration ( $\mu$ s)
Roughing	E363	H-0.18	12A	200V	50
Middle	E293	H-0.105	6A	200V	12.8
Finishing	E009	H+0.01	1A	200V	3.2

Table 2. W-EDM condition for STD-11

Parameters	1st cut	2nd cut	3rd cut	4th cut
Mode of power supply (M)	5	5	5	2
Pulse duration ( $\mu$ s)	6	5	8	16
Pulse current (A)	8	3	1	1
Wire diameter (mm)	0.25	0.25	0.25	0.25
wire tension (Newton)	15	17	17	17
Offset (mm)	0.193	0.153	0.147	0.144

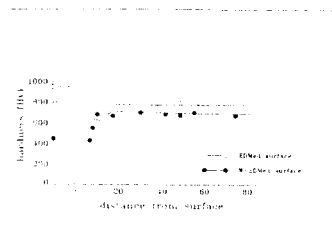


Fig.2 Hardness distribution on surface of specimen

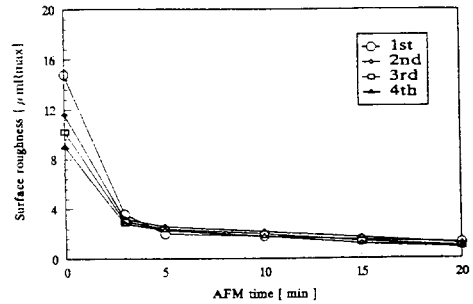
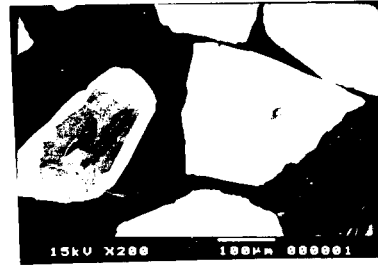
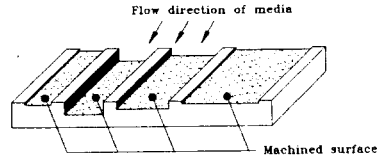
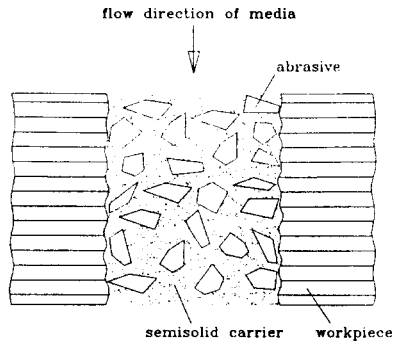
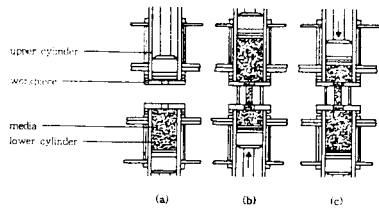
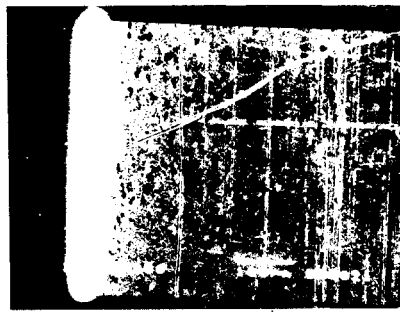


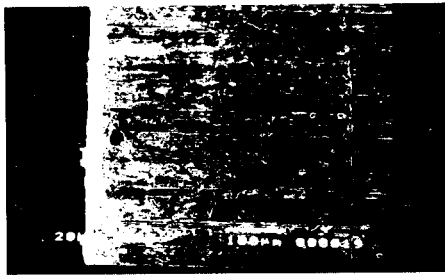
Fig.7 Change of surface roughness of W-EDMed STD-11 with AFM time in passage ( 15x5 )



white layer

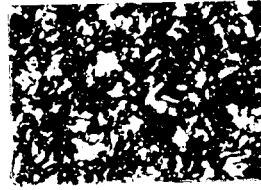
base metal

(a) W-EDMed surface

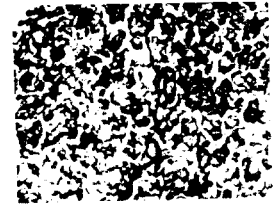


(b) Surface after AFM on W-EDMed surface

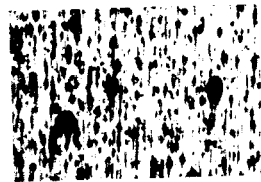
Fig.8 Microstructure of W-EDMed surface of STD-11 before and after AFM (AFM time : 20min., abrasive : # 70 diamond ,W-EDM condition : pulse current 8A, brass wire  $\phi$ 0.25mm )



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig.10 The effect of AFM W-EDMed surface of SKD-11 ( $\times 100$ ) (a) W-EDMed surface (b),(c),(d) improved surface by AFM for (b) 3min. (c) 10min. (d) 20min. respectively

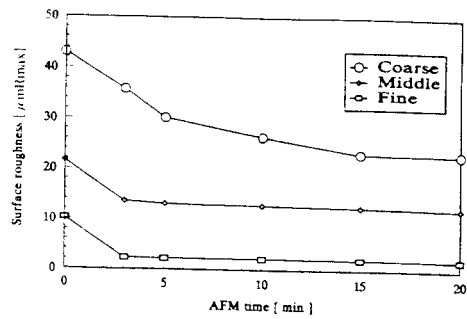


Fig.9 Change of surface roughness of EDMed STD-11 with AFM time in passage (  $15 \times 5$  )