

로렌츠원리에 의한 초정밀 전해연마 특성에 관한 연구

Study on the Characteristics of Precision Electrochemical Polishing by Using Lorentz's Principle

김정두 · 최민석\* (한국과학기술원)

305-701 대전광역시 유성구 구성동 373-1 한국과학기술원 기계공학과 정밀가공 및 공작기계 연구실

Jeong-Du Kim and Min-Seog Choi\* (KAIST)

Lab. for Precision Machining & Machine Tools, Dept. of Mechanical Engineering, KAIST, Taejon, 305-701

Abstract

Magnetic-electrolytic-abrasive polishing (MEAP) system was newly developed and the finishing characteristics of Cr-coated roller were analyzed. The paper describes the operational principle of MEAP system and magnetic field effect on the MEAP process by experimental results. The finishing characteristics and optimal finishing condition for Cr-coated roller were experimented and analyzed.

고 다만 연마재에 의한 연마를 행하였을 때의 표면조도 개선율을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 연마재에 의한 연마공정에 자기전해공정을 복합시키므로써 가공표면조도  $R_a$  와  $R_{max}$ 의 개선율을 각각 2~3배와 1.3~1.9배로 향상시킬 수 있으며 본 시스템은 특히  $R_a$ 의 개선율이 훨씬 클 뿐만 아니라 가공속도가 증가함에 따라 개선율도 증가한다. 이러

1. 서론

첨단산업의 비약적 발전은 초정밀가공에 보다 높은 부품 품위와 고능률 양산화 생산을 요구하고 있다. 최근의 초정밀 가공기술은 몇몇 가공기술 또는 다종의 에너지를 복합함으로써 새로운 정밀가공공정을 추구하고 있으며<sup>(1)-(4)</sup> 이것은 고능률, 고정밀가공의 양산화를 실현하고 제품의 품질을 대폭 개선하고자 하는 산업사회의 요구를 기존의 가공법으로는 만족시키기 어렵기 때문이다. 특히 난삭재의 정밀가공기술개발은 현 시점에서 이미 생산기술분야의 주요한 과제로 되고 있으며, 또한 향후 그 요구가 높아질 것으로 사료된다.

복합가공공정의 연구으로 최근 전해연마공정에 미세지립의 경 절삭작용을 결합시켜 가공물 표면의 미소요철(凹凸)을 선택적으로 제거하는 전해복합가공기술을 개발하여 SM45C를 연마한 연구<sup>(1)</sup> 등 몇몇 사례가 발표된바 있다. 그러나, 이러한 복합연마법은 다들질 능률이 낮기 때문에 가공능률을 높일 수 있는 방안에 대한 연구가 필요시 되고 있다.

본 연구에서는 자기전해복합경면 가공시스템을 이용하여 비디오테이프 등의 제조공정에서 테이프 이송가이드로 널리 이용되고 있는 크롬코팅로울러의 고능률 정밀연마실험을 수행하였으며 결과의 분석을 통해 가공특성을 파악하였다.

2. 자기전해 복합경면연마시스템의 구성

Fig.1은 자기전해복합연마(MEAP)시스템 구성 개략도를 나타낸다. 전해공정 시스템은 전해액 공급시스템과 전해전류를 발생시키기 위한 직류전원 (0~30V, 최대20A) 및 회로로 구성되어 있다. 자기장이 전기장파 수직으로 교차되도록 영구자석을 설치하였으며 가공영역의 자속밀도는 모델실험 결과 최적값으로 분석된 0.06테슬라(T)로 하였다. 점탄성연마재는 선반의 이송대에 장착하고 공작물에 가해지는 압력의 크기는 다이알게이지 및 스프링을 이용하여 측정하였다. 또한 점탄성 연마재 고정기구에는 가공물 회전축방향으로 진동시켰다. 진동진폭은 6mm, 진동주파수는 16Hz로 설정하였다. Fig.2는 개발된 자기전해복합연마시스템을 나타낸다.

3. 실험결과 및 고찰

크롬코팅 로울러 고능률연마 실험조건은 Table 1과 같다. Fig.3은 자기전해공정을 복합시킨 경우와 복합시키지 않

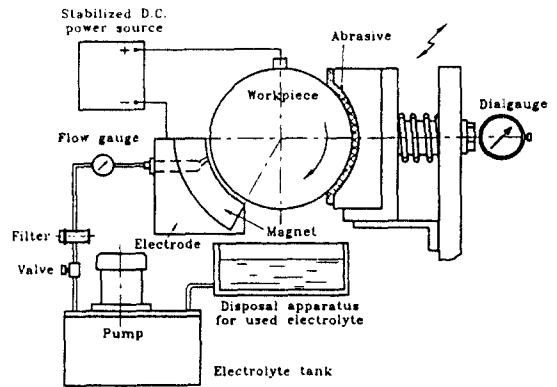


Fig.1 Schematic diagram of magnetic-electrolytic-abrasive polishing (MEAP) system

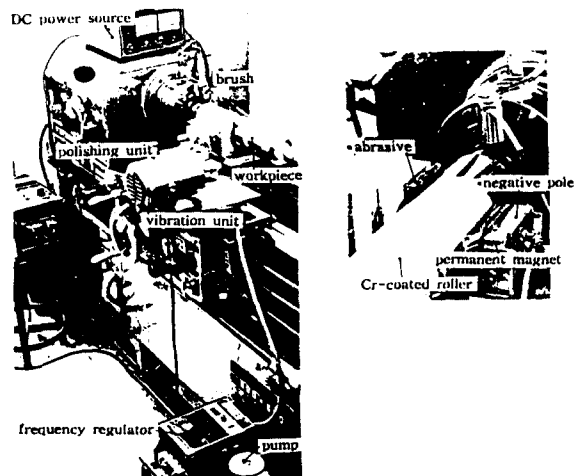


Fig.2 Experimental setup for MEAP system

한 현상은 자기전해공정을 복합시키므로써 전해작용에 의해 가공물표면에 Cr보다 경도가 낮은 양극생성물인 크롬산화물 함유 층으로 구성된 부동태화 피막이 형성되어 금속 제거가 용이하게 행해지기 때문이라고 사료된다.

전해복합가공공정에 자기장을 복합시킨 경우와 복합시키지 않는 경우의 전극간극전압과 전극전류(전류밀도)의 관계를 Fig.4에 표시하였다. 전극간극전압이 증가함에 따라 전해전류 및 전해전류밀도가 증가하며, 자기장을 인가함으로써 전해전류는 전체적으로 큰 증가를 보였다. 이것은 전해공정에 자기장을 인가함으로써 전극간극내의 이온입자가 로렌츠

Table 1 Experimental conditions

Workpiece	Cr-Coated Roller (φ 94 mm)
Electrolyte	NaNO <sub>3</sub> (20%)
Flow rate of electrolyte	1000 ml/min
Electrode gap	1.0 mm
Magnetic flux density	600 Gauss
Feed rate	0.073~0.205 mm/rev
Abrasive	WA #360, #800, #1000
Vibration of abrasive	a = 6 mm, f = 16 Hz
Electrolytic current density	0.05, 0.1, 0.15 A/cm <sup>2</sup>
Abrasive pressure	0.1, 0.3, 0.5 kgf/cm <sup>2</sup>
Workpiece speed	80, 110, 140 m/min

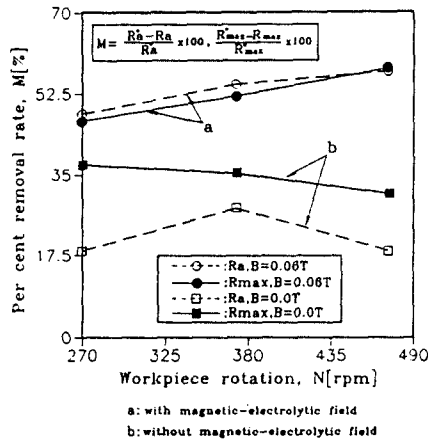


Fig.3 Effect of magnetic field on removal rate(%) of surface irregularities

힘을 받아 이온 확산운동이 가속화되고 이온들의 운동경로가 곡선으로 변함으로써 전극간극 전기저항이 감소되기 때문이다. 이와같은 전류밀도의 증가는 금속제거율을 증가시키는 직접적 원인이 된다.

Fig.5는 가공물이 정지상태에서 자기장을 인가할 때와 인가하지 않았을 때, 1분동안의 전해가공후 가공물 표면조도를 나타낸다. 자기장을 인가한 경우 전극전류밀도가 0.1 A/cm<sup>2</sup> 일 때 표면조도가 가장 양호하며 부동태화 피막이 형성되기 시작한다. 자기장을 인가하지 않을 경우에는 전극전류밀도가 0.05A/cm<sup>2</sup>에서 표면조도가 가장 양호하고 부동태화 피막이 형성되기 시작하며, 전류밀도가 커짐에 따라 가공면 조도는 자기장을 인가한 경우보다 거칠어진다. 이와 같이 자기장을 인가하므로써 가공표면조도가 전체적으로 개선되며 보다 큰 전류밀도에서 부동태화 막이 형성되기 시작하므로 활성화영역이 넓어져 금속제거율을 증가시키는 효과를 나타낸다.

Fig.6은 연마표면조도에 미치는 연마공구 이송속도의 영향을 나타낸다. 이송속도가 증가함에 따라 표면조도는 악화

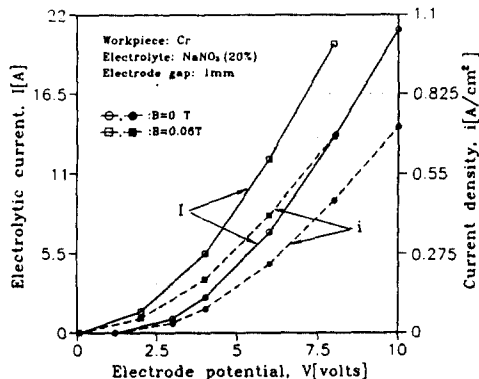


Fig.4 Electrolytic current and current density with respect to the electrode potential

되지만 이송속도가 어느 정도 높아지면 연마표면조도의 변화구배는 작아지는 것으로 나타났다.

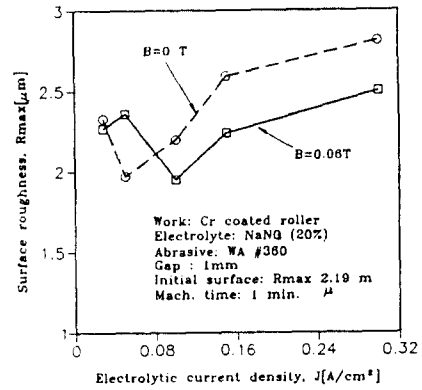


Fig.5 Effect of magnetic field on surface roughness

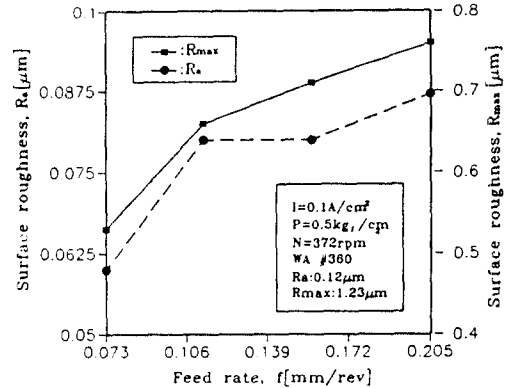


Fig.6 Surface roughness with respect to the electrode feed rate

#### 4. 경면가공 특성의 분석

크롬코팅 롤러 시편의 제작비가 고가이기 때문에 적은 회수의 실험으로 원하는 정보를 얻기 위하여 부분실험법(Fractional function design)으로 최적가공조건을 분석하였다. 가공면 조도에 지대한 영향을 갖는 가공인자 및 실험결과를 Table 2와 같다. 여기서 직교배열표는  $I=AB^2C$ ,  $X+X+X=u$ (mode 3)로서  $u=0$ 인 직교표를 이용하였다. 연마공정에 큰 영향을 미칠 것으로 판단되는 가공인자로 전해전류밀도, 연마재 가공압력 및 로울러의 회전속도를 선택하였으며, 각 인자의 수준은 3개로 하였다. 연마재의 지립은 가공능률을 고려하여 WA#320으로 하였다. 주요한 가공인자의 파라미터 값은 다음과 같은 원칙에 따라 선정하였다.

- 전해전류밀도는 가공물표면에 부동태화 피막이 형성되기 시작하고, 전해에 의한 가공표면조도가 가장 좋은 전류밀도 부근, 즉 0.10 A/cm<sup>2</sup>을 기준으로 하여 0.05 A/cm<sup>2</sup>와 0.15A/cm<sup>2</sup>로 선정하였다.

- 가공물 회전속도는 전해액이 비산하지 않는 조건에서 가능한 크게 설정한다.

- 연마재의 가공압력은 공작기계와 연마공구의 변형을 고려하여 최대치를 0.5kgf/cm<sup>2</sup>으로 선정하고 모델실험에 의해 찾아낸 최적 자속밀도 0.06T와 전극간극 1mm를 선정하였다. 연마재의 지립은 가공능률을 고려하여 WA#320으로 하였다.

실험결과와 통계적인 분석을 위해 분석하려고 하는 인자를 SN비(Signal to Noise ratio)로 치환하여 행하였다. 가공결과로서는 가공면의 조도만을 고려하여 최종 조도와 조도 개선율을 목표치로 하고 다음식에 의해 치환하였다.

$$y = Rmax \Rightarrow SN_1 = -10 \log \left( \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) = -10 \log (y^2) \quad (1)$$

$$\Delta y = \frac{R_{max}^0 - R_{max}}{R_{max}^0} \times 100(\%)$$

$$\Rightarrow SN_2 = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) = -10 \left( \frac{1}{\Delta y^2} \right) \quad (2)$$

여기서, SN<sub>1</sub>과 SN<sub>2</sub>는 가공면 조도와 조도 개선율의 SN비를 각각 나타내며 SN<sub>1</sub>은 작을 수록 좋고 SN<sub>2</sub>는 클 수록 좋다. Table 3과 Table 4는 실험결과에 대한 분산분석결과를 유의수준(significance) α에 대해 나타내었으며 요약하면 아래와 같다.

- 최종 표면조도에 대해서는 가공압력이 큰 영향을 미친다 (α=0.25에서 유의).
- 표면조도 개선율에 대한 영향에는 전해전류밀도(α=0.1에서 유의), 가공압력(α=0.25에서 유의) 순으로 큰 영향을 미친다.
- 가공물 회전속도는 표면조도 및 표면조도개선율에 큰 영향을 미치지 않는다.

Table 2 Design and results of experiments

No.	Cur. density A/cm <sup>2</sup>		Pressure kgf/cm <sup>2</sup>		Work speed m/min		Surface roughness		Luster grade
	①	②	①	②	①	②	Ra	Rmax	
1	①	0.05	①	0.1	①	80	0.057	0.597	D
2	①	0.05	②	0.3	②	110	0.030	0.327	B
3	①	0.05	③	0.5	③	140	0.030	0.207	B
4	②	0.10	①	0.1	①	140	0.057	0.457	C
5	②	0.10	②	0.3	①	80	0.060	0.500	B
6	②	0.10	③	0.5	②	110	0.033	0.400	A
7	③	0.15	①	0.1	②	110	0.053	0.533	C
8	③	0.15	②	0.3	③	140	0.064	0.480	B
9	③	0.15	③	0.5	②	80	0.043	0.403	B

\* the luster is graded A(high class), B, C and D (low class)

Fig.7과 Fig.8은 주요 공정변수들의 표면조도 및 표면조도 개선율에 대한 영향을 각각 표시한다. 이상의 분산분석결과에서 알 수 있듯이 표면조도와 표면조도개선율 측면에서 볼 때 가공조건 선정은 다음과 같다.

- 전해전류밀도는 낮은 수준(0.05 A/cm<sup>2</sup>)
- 가공압력은 높은 수준(0.5 kgf/cm<sup>2</sup>)
- 가공물 회전속도는 높은 수준(140 m/min)

그러나, 실제 연마공정에서는 가공표면조도 뿐만 아니라 높은 가공능률도 동시에 요구되므로 가공물 가공표면조도와 가공능률을 동시에 고려하여야 한다. 특히 전해 전류밀도는 금속제거량이 커다란 영향을 미치는 인자로, 전류밀도가 작을 수록 금속제거량이 작으며 가공능률에 영향이 크다. 따라서 실제의 연마공정에서는 로울러 전부의 연마공정을 몇 개의 단계로 나누어 수행하며, 단계별 공정의 요구에 따라 전류밀도를 선택하여야 한다. 즉, 전해전류밀도를 초기단계의 연마에서는 비교적 크게 선정하고 최종연마 단계에서는 비교적 작게 선정함으로써 고 능률, 고 품위 연마를 이룰 수 있다.

연마 전 표면조도 Ra 0.11 μm, Rmax 1.00 μm인 크롬코팅 로울러를 3단계의 공정을 통해 Ra 0.02 μm, Rmax 0.15 μm로 개선시킨 자기전해복합연마가공 결과가 Fig.9에 나타나 있다.

가공물 진원도는 가공시간 3분동안에 연마전의 1.95 μm에서 연마후의 0.81 μm로 개선되었다. 자기전해 복합경면연마에서 연마압력과 진원도의 관계가 Fig.10에 나타나 있다. 가공압력이 증가할수록 진원도는 급속히 개선되며 가공압력이 0.3kgf/cm<sup>2</sup>보다 증가하면 진원도 개선율은 급격히 이루어지기 때문에 이 이상의 압력을 설정할 필요가 있다. Fig.11은 가공전후의 진원도 형상을 나타낸다. 이와같이 자기전해복합경면연마법은 표면조도뿐만 아니라 가공물의 진원도 개선에도 좋은 효과를 나타내고 있다.

Table 3 Analysis-of-variance(ANOVA) of SN<sub>1</sub> for surface roughness

Source	SS	dof	MS	F <sub>0</sub>
Current, A	13.05	2	6.525	1.63
(A <sub>L</sub> )	(11.02)	1	11.02	2.755
(A <sub>Q</sub> )	(2.03)	1	2.03	0.51
Pressure, B	27.46	2	13.73	3.43 <sup>b</sup>
(B <sub>L</sub> )	(27.22)	1	27.22	6.81 <sup>b</sup>
(B <sub>Q</sub> )	(0.24)	1	0.24	0.06
Speed, C	12.02	2	6.01	1.50
(C <sub>L</sub> )	(11.96)	1	11.96	2.99
(C <sub>Q</sub> )	(0.06)	1	0.06	0.015
Error	8.0	2	4.0	
Total	60.53	8		

Table 4 Analysis-of-variance(ANOVA) of SN<sub>2</sub> for rate of surface roughness

Source	SS	dof	MS	F <sub>0</sub>
Current, A	16.73	2	8.365	9.24 <sup>a</sup>
(A <sub>L</sub> )	(14.73)	1	14.73	16.28 <sup>a</sup>
(A <sub>Q</sub> )	(2.0)	1	2.0	2.21
Pressure, B	6.83	2	3.415	3.77 <sup>b</sup>
(B <sub>L</sub> )	(6.83)	1	6.83	7.55 <sup>b</sup>
(B <sub>Q</sub> )	(0.0)	1	0.0	0.0
Speed, C	1.13	2	0.565	0.63
(C <sub>L</sub> )	(1.13)	1	1.13	1.25
(C <sub>Q</sub> )	(0.0)	1	0.0	0.0
Error	1.81	2	0.905	
Total	26.50	8		

\*a, b : significant at α=0.1 and α=0.25, respectively

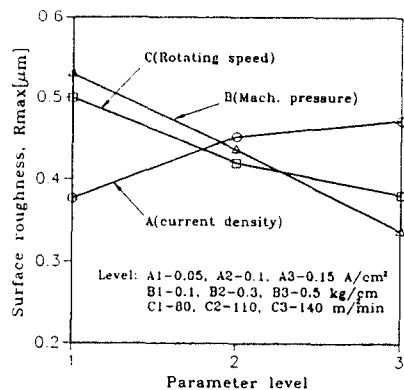


Fig.7 Effect of each parameter on surface roughness

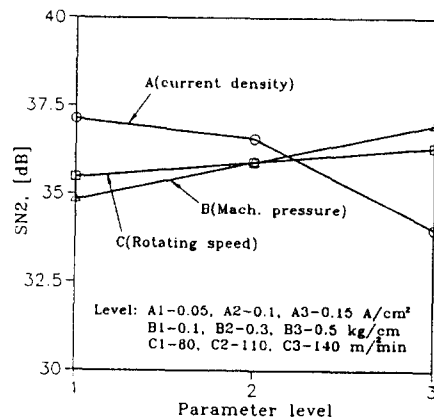
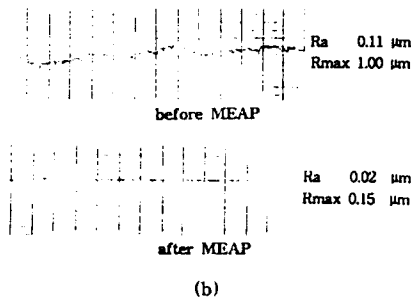
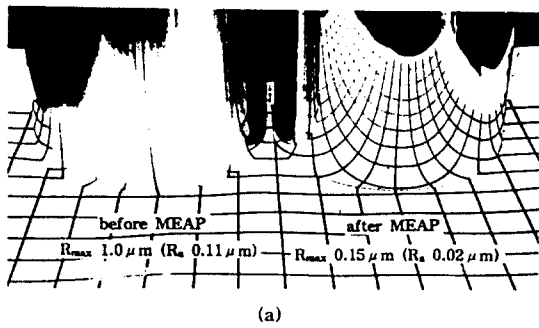


Fig.8 Effect of each parameter on SN<sub>2</sub> for surface roughness reduction ratio



Electrode gap: 1mm, Magnetic flux density: 0.06T  
 Electrolyte: NaNO<sub>2</sub>(20%), Polishing time: 3min.  
 Abrasive: WA#360

Fig.9 Roller surface(a) and the surface profiles(b) before/after polishing by MEAP process

## 5. 결론

자기전해복합경면연마 시스템을 개발하고 크롬코팅로울러의 정밀연마가공 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 자기전해복합연마 공정에서 자기장은 전해전류를 증가시킴으로써 궁극적으로 연마가공능률을 향상시키는 역할을 한다.
- (2) 자기장은 전기장과 수직되게 설치되며 자속밀도는 크롬코팅로울러의 경우 전극간극 1mm에서 0.06[T]가 최적이다.
- (3) 자기장이 0.06T인 조건에서 연마능률의 향상율 기대할 수 있는 전극간극은 2mm이내이고 간극이 작을 수록 자기전해복합작용이 효과적이다.
- (4) 전해전류밀도는 부동태화 피막이 형성되기 시작하는 전류밀도에서 연마표면조도가 가장 좋고 본 실험에서는 0.1A/cm<sup>2</sup>로 나타났다.
- (5) 가공압력은 높을 수록 금속제거량이 크나 표면조도를 고려하여 최종 연마단계에서는 보다 낮은 압력을 선정하여야 한다. 초기 연마단계에서 0.5kgf/cm<sup>2</sup>, 최종 연마단계에서 0.3 kgf/cm<sup>2</sup>로 선정하여 능률적인 정밀연마를 실현할 수 있었다.
- (6) 가공물 회전속도는 클 수록 금속제거량이 크나 초기 연마단계에서는 충분한 전해작용이 이루어지도록 가공물 회전속도를 적절히 낮추는 것이 바람직하다.
- (7) 연마공구의 이송속도는 작을 수록 표면조도 개선율이 높으나 가공능률을 고려하여 초기 연마단계에서는 보다 높은 이송속도를 선정하여야 한다.
- (8) 자기전해복합연마 실험을 통해 초기 표면조도 R<sub>max</sub>1.0 μm를 R<sub>max</sub>0.15 μm로, 진원도는 1.95 μm에서 0.81 μm로 개선시켰으며, 기존의 수퍼니싱에 의한 가공보다 3배 높은 가공능률을 실현하였다.

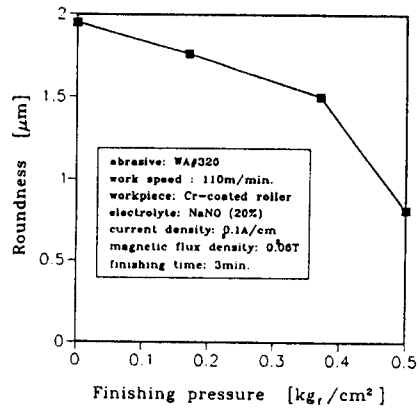


Fig.10 Effect of finishing pressure on roundness

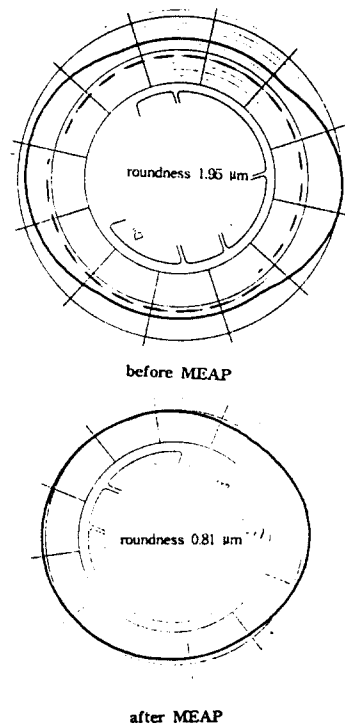


Fig.11 Roundness profile record of Cr-coated roller before/after polishing by MEAP process

## 참고문헌

- [1] Y.Kimoto, et al., A Study on High Shape Accuracy Electrolytic-Abrasive Mirror Finishing, JSPE, Vol.54, No.2 (1988) pp.353-358.
- [2] G. Kuppaswamy, An Investigation of the Effect of Magnetic Field on Electrolytic Diamond Grinding, Wear, 54 (1979)
- [3] D.X.Jin, Study on the Mechanism of Magnetic Electrolytic Finishing, 2nd International Conference on Precision Surface and Burr Technology, China (1992)
- [4] D.X.Jin, A Study on the Electrolytic Magnetic Nonwoven Abrasive Finishing, 3rd International Conference on Precision Surface Finishing and Burr Technology, Korea (1994)
- [5] R.J.Smith, Electronics, 3rd ed., Wiley, Singapore (1987)