

자기전해 가공시스템에 의한 국가표준원기의 초정밀 표면 가공에 관한 연구

(A Study on the Ultra-precision Machining of National Standard Electrode by the
Magnetic-Electrolytic-Abrasive Polishing System)

김정두, 김동섭, 강윤희*(KAIST 기계공학과)
Jeong-Du Kim, Dong-Xie Jin and Youn-Hee Kang*

Keyword : Magnetic-Electrolytic-Abrasive Polishing System(자기전해 가공시스템), National Standard Electrode(국가표준원기), Surface Roughness(표면거칠기), Straightness(진직도)

ABSTRACT : Magnetic-electrolytic-abrasive polishing system(MEAPS) was developed for machining national standard electrode and its finishing characteristics was analyzed. The paper describes the operational principle of MEAP system by experimental results. The finishing characteristics and optimal finishing condition for national standard electrodes were experimented and analyzed. As a result, MEAPS can improve straightness as well as surface roughness.

1. 서 론

첨단산업의 비약적 발전은 초정밀가공에 보다 높은 부품품위와 고능률 양산화 생산을 요구하고 있다. 최근의 초정밀 가공기술은 몇몇 가공기술 또는 다종의 에너지를 복합함으로써 새로운 정밀가공공정을 추구하고 있으며⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾ 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 연구예로 최근 전해연마공정에 미세지립의 경질삭작용을 결합시켜 가공물 표면의 미소요철(凹凸)을 선택적으로 제거하는 전해복합가공기술을 개발하여 SM45C를 연마한 연구⁽¹⁾ 등 몇몇 사례가 발표된 바 있다. 그러나, 이러한 복합연마법은 다듬질 능률이 낮기 때문에 가공능률을 높일 수 있는 방안에 대한 연구가 필요시 되고 있다. 국내에서는 KAIST에서 고능률 가공이 가능한 자기전해연마(Magnetic-Electrolytic-Abrasive polishing) 기술을 연구, 개발하여 현재 응용단계에 있으며 이를 이용한 각종 정밀가공법을 개발완료하여 실험을 통해 표면

정밀도와 진원도 등의 형상정밀도에 매우 좋은 성능을 나타냄을 확인한 바 있다.⁽¹⁾⁽⁴⁾

본 연구에서는 자기전해 가공시스템을 이용하여 매우 높은 정밀도를 요구하는 전기용량 국가표준원기의 초정밀 가공실험을 수행하였다. 전기용량 국가표준원기는 우리나라 전기용량의 표준을 설정하기위해 개발되는 Vertical Cross Capacitor의 핵심요소인 주전극(main electrode)으로써 전기용량 국가표준으로서의 의미뿐만 아니라 그 국가의 보유기술수준을 나타내는 지표가 된다.

2. 국가표준원기의 초정밀가공 필요성

국가표준원기는 우리나라 전기용량의 표준을 설정하기 위해 개발되는 Vertical Cross Capacitor의 핵심요소인 주전극(main electrode)이다. 전기용량(C_m)은 Thompson-Lampard 정전기 이론에 따르면 식(1)과 같이 표현된다.⁽²⁾

$$C_m = 0.00195354904 \text{ pF/mm} \quad (1)$$

즉 전기용량은 국가표준원기의 축방향 길이에 의해서 반이 절대측정이 가능하게 된다. Fig.1은 국가표준원기의

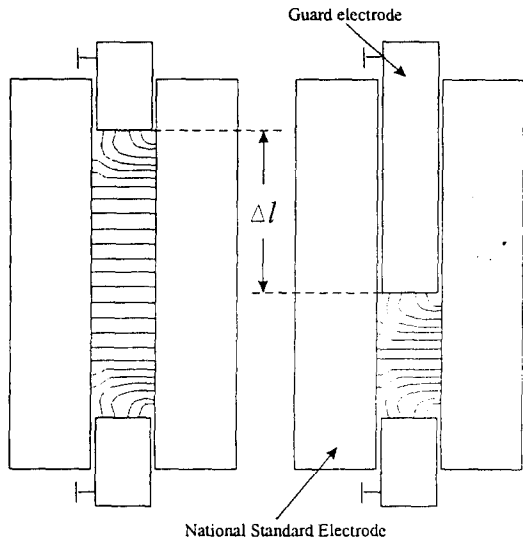


Fig.1 Measurement of electrical capacitance by measuring of length

축방향 길이측정에 의해 전기용량의 절대측정하는 방법을 나타낸 것이다. 그림에서 Guard 전극의 이송에 따른 전기용량의 변화를 나타내고 있다. Fig.2는 Vertical Cross Capacitor의 개략도를 나타낸 것이다. Guard 전극의 정밀한 이송과 위치결정이 Vertical Cross Capacitor의 성능을 좌우하는 기술이고 이 Guard 전극의 이송 guide역할을 하는 것이 국가표준원기이다. 따라서 국가표준원기의 초정밀가공은 Vertical Cross Capacitor의 개발에 있어서 가장 핵심이 되는 기술이다.

3. 자기전해 가공시스템의 원리

자기전해복합연마는 기존 전해연마공정의 전해이온들의 운동궤적을 적절히 조절함으로써 연마공정의 고능률·고정도를 동시에 달성하기 위해 개발된 공정이다. 일반적인 전해가공은 전해액 및 금속 이온들의 전기화학적 반응에 의해 가공이 이루어지기 때문에 가공에 참여하는 이온들의 갯수에 비례하는 금속의 제거가 일어난다. 또한 가공물 표면은 균일하지 않고 요철(凹凸) 형상을 갖고 있기 때문에 가공물 표면에 접근하는 이온들의 입사각도가 연마가공특성에 영향을 준다. 자기전해복합연마법은 기존의 전해공정에 자기장을 인가하여 음의 전하를 띠는 전해이온들의 운동궤적을 복잡하게 함으로써 금속과 반응하는 실제 이온의 갯수를 증가시키고 가공물 표면요철에 대한 이온의 입사각을 변화시켜 능률적인 다듬질 가공이 이루어지도록 한다. 이와같이 전해이온들의 운동을 복잡하게

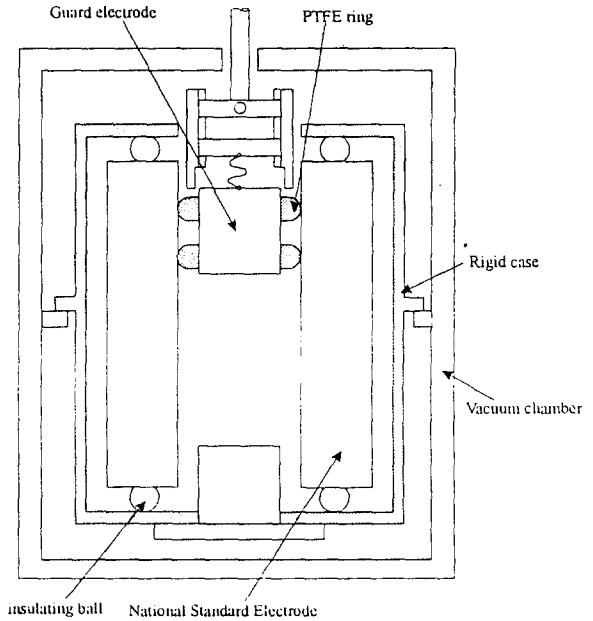


Fig.2 Schematic diagram of cross capacitor

하기 위한 자기장의 효과는 다음과 같다.

전해가공중에 이온화된 질량 $m[g]$, 전하 $q[C]$ 인 이온이 전기장 $E[V/m]$ 및 자속밀도가 $B[T]$ 인 자계가 존재하는 공간에서 속도 $v[m/s]$ 로 운동할 때 자기장에 의해 받는 로렌츠힘벡터 F 는[3]

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2)$$

이므로 이온의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{q}{m} (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (3)$$

Fig.3은 전해가공에 미치는 자기장의 영향을 도식화한 것이다. 기존의 전해공정(a)에서는 전기장에 의해 음의 이온들이 양극쪽으로 직선운동을 하기 때문에 이온들은 전체 금속표면에 도달하고 비능률적으로 표면요철이 제거된다. 반면에 자기장에 의해 곡선운동을 하는 이온들(b)은 요철의 끝부분보다는 정상점에 집중적으로 작용하여 매우 능률적으로 요철을 제거하게 되고 최종 표면거칠기를 향상시킨다.

4. 국가표준원기용 자기전해 가공시스템의 설계 및 특징

Fig.4는 자기전해 가공(MEAP)시스템 구성 개략도를

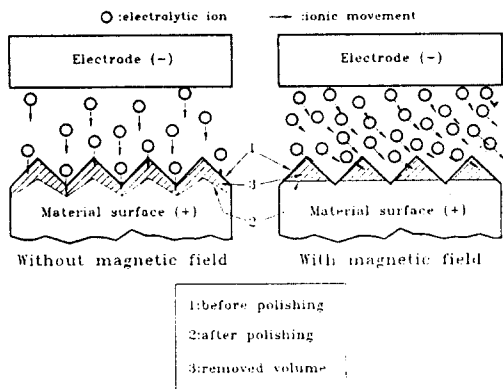


Fig.3 Magnetic field effect in the MEAPS for finishing efficiency

Table 1 Specifications of MEAPS

Cu electrode area	22 cm ²
Tool area	42 cm ²
Flow rate of electrolyte	1000 ml/min
Electrode gap	2.0 mm
Magnetic flux density	600 Gauss
Vibration of abrasive	a = 6 mm, f = 16 Hz

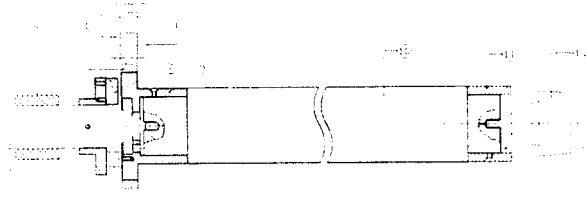


Fig.5 Fixturing method of national standard electrode on lathe

Fig.5 Fixturing method of national standard electrode on lathe

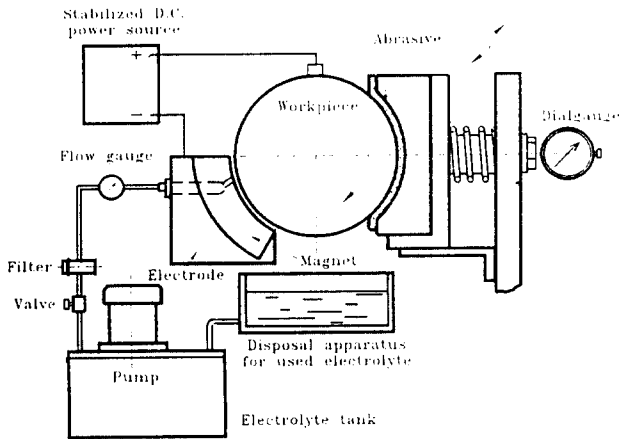
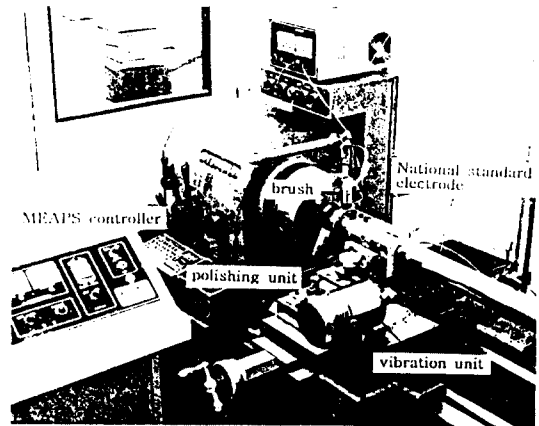


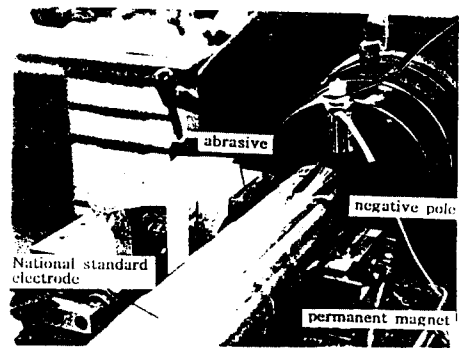
Fig.4 Magnetic-electrolytic-abrasive polishing system(MEAPS)

나타낸다. 전해공정 시스템은 전해액 공급시스템과 전해 전류를 발생시키기 위한 직류전원 (0~30V, 최대20A) 및 회로로 구성되어 있다. 자기장이 전기장과 수직으로 교차 되도록 영구자석을 설치하였으며 가공영역의 자속밀도는 최적값으로 분석된 0.06테슬라(T)로 하였다.⁴⁾ 점탄성연마재는 선반의 이송대에 장착하고 공작물에 가해지는 압력의 크기는 다이알게이지 및 스프링을 이용하여 측정하였다. 또한 점탄성 연마재 고정기구는 가공물 회전축방향으로 진동시켰다. 진동진폭은 6mm, 진동주파수는 16Hz로 설정하였다. Table 1은 자기전해 가공시스템의 주요사양을 나타낸 것이다.

Fig.5는 국가표준원기의 가공 지지방법에 대한 도면을 나타낸 것이다. 정밀도를 유지하기 위해 표준원기의 센터를 그대로 사용하였고 양 센터에 가공의 균일성을 보장하기 위해서 ⑧, ⑩과 같은 cab을 장착하였다. 또한 자기전해 가공부와 공작기계를 절연시키기 위해 공작기계와 접촉하는 부위에 ②와 같은 절연체(테프론)를 설치하였고 ⑫의 베어링센터에 세라믹도금을 하였다.



(a) External view of MEAPS



(b) Machining portion

Fig.6 Experimental setup for magnetic-electrolytic-abrasive polishing system(MEAPS)

Fig.6은 국가표준원기 가공용으로 개발된 자기전해 가공시스템을 나타낸다.

5. 국가표준원기의 초정밀가공

국가표준원기는 그것의 길이 측정에 의해 전기용량을 절대측정하는 cross capacitor의 핵심요소이기 때문에 국가표준원기의 표면정밀도와 형상정밀도는 매우 높은 수준을 요구한다. Fig.7은 국가표준원기의 설계도면을 나타낸 것이고 Table 2는 국가표준원기의 가공정밀도 요구정도를 나타낸 것이다.

Table 3은 국가표준원기의 초정밀 가공 실험조건을 나타낸 것이다.

Table 2 Specifications of National Standard Electrode and machining requirement

Material	SUS316
Diameter	69.9mm
Length	700mm
Surface roughness	< Rmax 1.0 μm
Straightness	< 7.0 μm
Roundness	< 1.0 μm

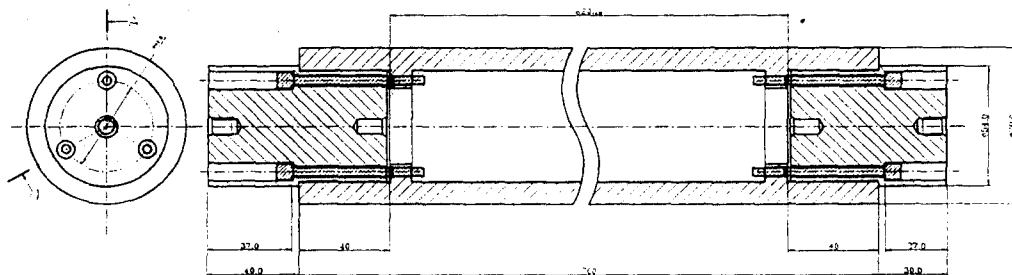
Table 3 Experimental conditions

Workpiece	National Standard Electrode (φ69.9 mm)
Electrolyte	NaNO ₃ (20%)
Feed rate	0.1~0.14 mm/rev
Abrasive	WA #320, #2000
Electrolytic current density	0.05~0.5 A/cm ²
Abrasive pressure	0.1~0.55 kgf/cm ²
Workpiece speed	370, 395 rpm

6. 실험결과 및 고찰

적합한 전류밀도 선정을 위하여 표면거칠기에 미치는 전류밀도의 영향을 조사하였다. Fig.8은 공작물이 정지상태(n=0)와 회전상태(n=372 rpm)에서의 공작물 표면거칠기에 미치는 전극 전류밀도의 영향을 나타낸 것이다. 실험은 전극을 이송시키지 않은 정지상태에서 연마재에 의한 연마를 하지 않고 자기전해공정으로만 1분간 가공하였다. 자기장의 자속밀도는 0.06 테슬라(T)이다. 실험결과 가공물이 정지상태인 경우나 회전상태인 경우 모두 전극 전류밀도가 0.10 A/cm²일 때부터 가공물표면에 부동태화막이 생성되기 시작하며 표면거칠기가 가장 작게 나타났다. 전극전류밀도가 증가함에 따라 표면거칠기는 점차 커지며 전류밀도가 0.20 A/cm²을 초과하면 표면거칠기는 연마전의 초기치보다 커진다. 특히 가공물이 정지상태인 경우 전류밀도가 0.3 A/cm²보다 커지면 반점이 많이 섞인 흰 피막이 형성되며 표면조도가 급속히 거칠어진다. 그러나 가공물이 회전하는 경우에는 전류밀도가 0.3 A/cm²보다 커도 가공물표면에 얇고 균일한 흰 피막이 형성되며 표면거칠기도 약간 거칠어질 뿐이다. 이것은 가공물이 회전함으로써 단위면적의 가공물표면이 자기전해에 의한 가공시간이 짧아지기 때문으로 사료된다. 이러한 실험결과에 의해 자기전해를 이용한 최종가공공정에서는 전극전류밀도를 0.1~0.2 A/cm² 범위에서 선정하여야 한다.

연마재의 가공물표면에 대한 가공압력은 표면거칠기에 커다란 영향을 미친다. Fig.9는 WA#320 연마재를 이용할 경우 가공압력이 표면거칠기에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 가공압력이 너무 작거나 크면 표면이 거칠어지며 가공압력이 약 0.2~0.4kgf/cm²에



View of A-A

Fig.7 Assembly drawing of national standard electrode

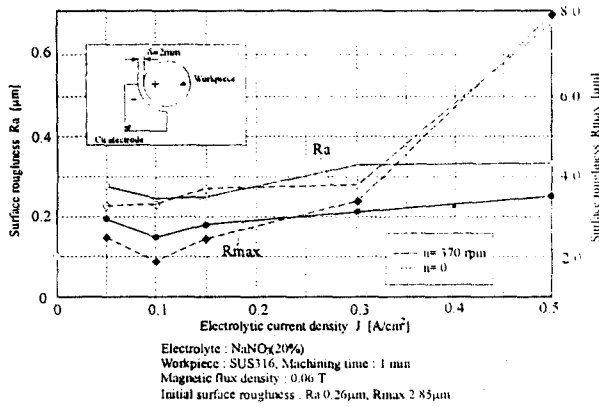


Fig.8 Relationship between surface roughness and electrolytic current density

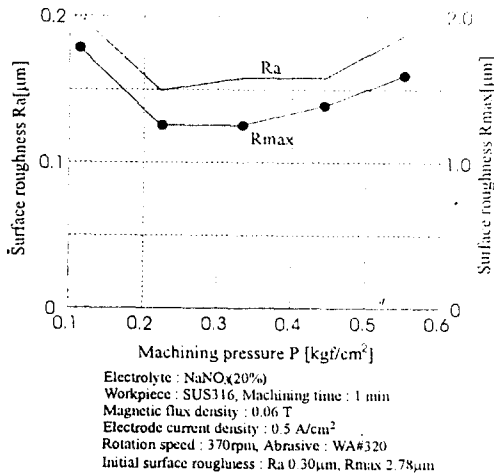
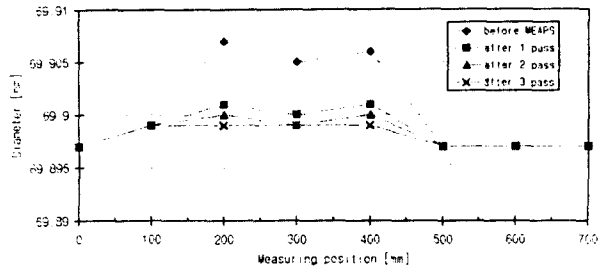


Fig.9 Relationship between surface roughness and machining pressure

서 표면거칠기가 가장 작게 나타났다. 즉 가공압력이 약 0.2~0.4kgf/cm²에서 자기전해에 의해 형성된 부동태화 피막이 제거되어 연속적인 연마가 이루어져 표면거칠기가 가장 작으며, 가공압력이 너무 크면 주로 연마재에 의한 가공이 이루어지기 때문에 표면이 거칠어진다.

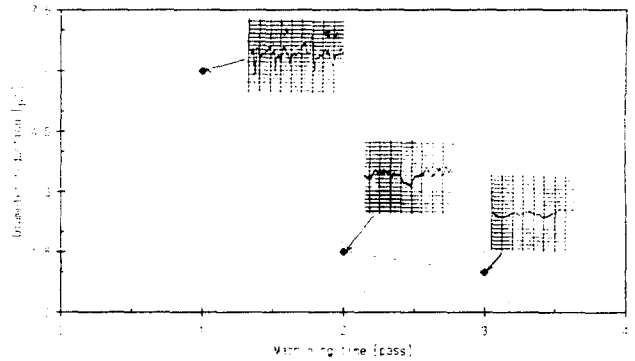
Fig.10은 가공횟수에 따른 표준전극의 직경변화를 나타낸 것이다. 표준전극의 형상정밀도중 진직도를 가공요구조건에 맞추기 위해서 직경값이 큰 부위만 자기전해 가공시스템으로 연마하였다. 직경값은 100mm간격으로 디지털 마이크로미터에 의해 측정되었다. 그림에서 알 수 있듯이 측정위치 200~400사이의 직경값이 크고 그 부위만 3번 가공하였다. 첫 번째 가공에서 직경값이 가장 크게 개선되었고 두 번째, 세 번째 가공으로 갈수록 직경값의 변화가 작았다.

Fig.11은 Fig.10의 결과를 토대로 가공횟수에 따른 표준전극의 평균 직경변화값과 그때의 표면거칠기 프로파일



Electrode current density : 0.05 A/cm², Rotation speed : 395rpm
 Machining pressure : 4kgf, feedrate : 0.1mm/rev

Fig.10 Variation of diameter according to machining times



Electrode current density : 0.05 A/cm², Rotation speed : 395rpm
 Machining pressure : 4kgf, feedrate : 0.1mm/rev

Fig.11 Diameter reduction according to machining times

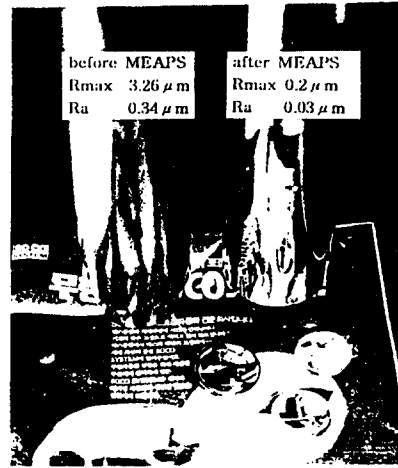
(profile)을 나타낸 것이다. 첫 번째 가공에서 가장 큰 직경변화가 나타난 것은 초기 표면거칠기 프로파일의 뾰족한 산부분이 빨리 제거되기 때문이고 두 번째, 세 번째 가공일수록 표면이 평활화되므로 첫 번째 가공보다 직경값의 변화가 작게 된다. 직경값의 변화가 이와같이 급격히 감소하는 것은 선택적인 표면가공이 가능한 자기전해 가공시스템의 특성이라고 사료된다.

Fig.12는 연마전의 초기 표면거칠기가 Ra 0.34μm, Rmax 3.26μm인 국가표준전극을 3단계의 연마공정을 거쳐 얻어진 가공물 사진과 표면거칠기 프로파일이다. 연마후의 표면거칠기는 Ra 0.03μm, Rmax 0.20μm이다. 3단계의 연마공정은 다음과 같다.

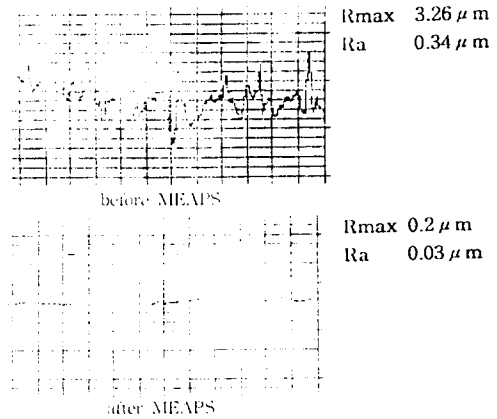
- 공정 1 : 전극전류밀도 $j = 0.2A/cm^2$
- 가공압력 $P = 0.3 Kgf/cm^2$
- 가공물 회전속도 $n = 395rpm$
- 공구이송속도 $f = 0.1mm/rev$
- 연마재 : WA#320

공정 2 : 전극전류밀도 $j = 0.1A/cm^2$
 가공압력 $P = 0.3 Kgf/cm^2$
 가공물 회전속도 $n = 395rpm$
 공구이송속도 $f = 0.1mm/rev$
 연마재 : WA#320

공정 3 : 전극전류밀도 $j = 0.1A/cm^2$
 가공압력 $P = 0.3 Kgf/cm^2$
 가공물 회전속도 $n = 395rpm$
 공구이송속도 $f = 0.1mm/rev$
 연마재 : WA#2000



(a) National standard electrode surface



(b) Surface profile

Fig.12 National standard electrode surface(a) and surface profiles(b) before/after by MEAPS

7. 결론

국가표준전극용 자기전해 가공시스템을 개발하고 정밀 가공특성을 실험분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 국가표준전극의 자기전해 가공에서 가공물표면에 부동태화 막이 활발히 형성되고 가공 표면거칠기가 가장 좋은 전극 전류밀도는 $0.1\sim 0.2A/cm^2$ 로 나타났다.
- 2) 가공 표면거칠기가 가장 작은 가공압력의 최적치는 연마재 WA#320인 경우 가공압력 $0.2\sim 0.4kgf/cm^2$ 에서 가공표면거칠기가 가장 좋게 나타났다.
- 3) 국가표준전극의 자기전해 가공실험을 통해 자기전해 가공시스템은 표면거칠기뿐만 아니라 형상정밀도중 진직도 개선에도 좋은 효과를 나타냄을 알 수 있었다.
- 4) 자기전해 가공에서 자기장은 전해이온의 운동경로를 직선에서 곡선으로 바꾸어 이온들이 표면거칠기의 골 부분 보다는 정상점에 집중적으로 작용하게 함을 확인하였다.

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. Kuppuswamy, 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)
 [6] 김정두, 김동섭, 최민석, 자기전해복합 원리에 의한 크롬코팅로울러의 고능률 정밀가공, 대한기계학회 '95년도 추계학술대회논문집(I), pp.1001~1006 (1995)
 [7] 한국표준과학연구원, 전기용량 원기 Vertical Cross Capacitor 개발, 제1차년도 보고서, (1994)