

손실각 표준기 전극의 진직, 진원도 측정시스템 개발
Development of Straightness, Roundness Measurement System
for Standard Electrode of Loss Angle

*장종훈, 김정두 / 한국과학기술원

*Jong-Hun JANG, Jeong-Du KIM / KAIST

Abstract

To acquire the high precision of profile for standard electrode of loss angle, it is needed ultraprecision machining technology like MEAP(Magnetic Electrotic Abrasive Polishing) and the very high profile measurement technology which can measure a micro unit about the workpiece. So, in this paper, it was developed the measurement system of precision of profile using non-contactable sensor that was approximate sensor of capacitance type, because that is better than others in the electrical characteristics. And standard electrode of loss angle was machined by the MEAP machining technology.

In this study, it was development of precision measurement system. This system could be used measure the workpiece of roundness and straightness much more precise and faster than general mechanical measurement system done before. And it could be helped to minimize machining time and planning by very fast and precise measurement about the workpiece.

1. 서론

손실각표준기 전극은 우리나라 전기용량의 표준을 설정하기 위해 개발되는 Vertical Cross Capacitor의 핵심요소인 주전극(Main Electrode)이다. Cross Capacitor는 전극봉의 길이측정에 의해서 전기용량을 절대측정하는 전기용량 국가표준기로서, 초정밀 기계가공기술, 전기용량 정밀측정기술, Laser Interferometer 적용기술, 전극구조

의 직선도 및 평행도 측정기술, 브릿지 설계 및 제작기술, 진공기술 등이 복합적으로 요구되는 연구분야이며 전기용량 국가표준으로의 의미뿐만 아니라 그 국가의 보유기술수준을 나타내는 지표가 된다.

전기용량 절대측정은 4개의 주전극봉과 2개의 Movable guard전극이 동시에 완벽한 직선적 평형조건이 형성된 조건에서의 전극봉 길이의 정밀 측정에 의해서 이루어진다. 전극봉사이의 완벽한 직선적 평형조건은 전극봉 자체의 형상정밀도 및 표면정밀도가 매우 정밀해야만 이루어질 수 있기 때문에 전극봉은 일반 기계가공으로는 불가능한 고도의 형상정밀도 및 표면정밀도를 요구한다. 본 논문에서는 손실각표준기 전극봉을 초정밀 측정할 수 있는 시스템개발과 더불어 진원도 및 진직도를 측정하여 최종형상정도를 보정할 수 있는 측정기술을 연구하였다.

2. 손실각 표준기 전극의 형상정밀도

요구되는 손실각표준기 전극의 형상정밀도를 만족시키기 위해서는 일반기계가공으로는 불가능한 고도의 초정밀가공기술인 MEAP (Magnetic-Electrotic-Abrasive Polishing)가공과 함께 제품의 치수 또는 형상정도를 가공중에 있어서 μm 단위의 측정이 가능한 고도의 형상측정기술이 필요하다. 이와같은 손실각표준기 전극의 진직도 및 진원도를 측정하는 고정도 측정기술 개발은 MEAP 가공공정에서의 형상측정을 통해 공작물의 가공오차를 연속적으로 측정하면서 오차가 더욱 커지기전에 공작기계를 오차가 수정되는 방향으로 조정, 혹은 보정하여 공작물의 정도유지를 극대화하는 목표를 실현하기위해 필요한 기술이다. 아래의 Fig. 1은 본 실험의 측정대상물인 손

실각표준기 전극구조이며 Table 1은 손실각표준기 전극의 형상치수 및 최종진직도, 진원도 요구정밀도이다. 현재 가공공작물의 형상측정에는

Table 1 Size and accuracy of requirement of standard electrode of loss angle

Item	Standard
Material	SUS316
Diameter	69.9mm
Length	700mm
Straightness	<7.0 μ m
Roundness	<1.0 μ m

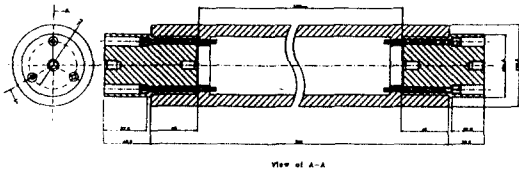


Fig. 1 Structure of standard electrode of loss angle

중간측정(In-process Measurement)시 일반적으로 사용되고 있는 마이크로미터 등을 이용한 접촉식 측정방식과 레이저인터페로메타(Laser-Interferometer)나 각종 광학(Optic)센서를 이용한 비 접촉방식 등이 있으며 측정정도의 마이크로화로 점차 비 접촉방식으로 옮겨가고 있다. 이러한 방법은 모두 공작기계에 설치된 상태에서 측정해야하는 공통점이 있는데, 즉 측정장치는 실제 작업현장에 포함된 에러요인을 건디어내면서 신뢰성, 조작성등이 뛰어나며 설비가격의 저렴화 등의 조건을 잘 갖춰야 한다. 앞서 말한바와 같이 온라인 측정의 주 대상은 공작물의 치수 또는 진직도, 진원도등의 형상정도이다. 손실각 표준기 전극과 같은 형태의 원형공작물의 측정 경우에는 공작물이 회전하는중에 변위점을 검출하여 진직, 진원도등의 형상정도를 측정할 수 있으며, 이러한 손실각표준기 전극의 형상정밀도를 얻기 위해서는 μ m단위의 진직도, 진원도 측정성능과 외부 오차 요인이 없는 형상정밀도 측정시스템개발이 필요하다. 또한, 작업중 측정방법을 실질적으로 사용하기 위해서는 가공공정의 방해가 되지 않으며, 측정값의 고정도, 신뢰성 및 조작성이 뛰어나야 하는 등의 조건을 갖추어야 한다. 따라서 본 연구에서는 형상정밀도를 측정하기 위해서, 기존의 접촉식 측정기를 사용한 형상측정방법에서 탈피한 비 접촉센서를 이용하여 측정된 데이터를

변위변환중폭기를 통해 실시간 처리 출력함으로써 가공물의 진원도, 진직도 등의 실제형상을 측정가능하게 되며, 이러한 측정치를 이용하여 기존의 기계식 측정방식을 이용한 형상측정보다 더욱 정밀하고 신속히 구현할 수 있게 하였다.

3. 형상정밀도 측정시스템

정밀로울러의 가공에 있어 일반기계가공으로는 불가능한 고도의 형상정밀도를 실현하기 위해 고도의 형상측정기술 등의 고 난이도의 '혁합기술'이 요구된다. 이러한 이유로 본 실험에 사용한 형상정밀도 측정시스템은 전기특성이 우수한 정전용량(Capacitance)식 측정기를 활용하였다. 정전용량식 센서에 의한 변위측정은 비 접촉으로 측정할 수 있으며 측정대상이 도체나 반도체일 경우 재질 또는 표면 상태에 따라 영향을 받는 일이 적고 고정밀도를 얻을 수 있는등의 장점을 지니고 있으므로 본 연구에서 개발된 측정시스템에 적합하다. 이와같은 정전용량식 측정원리는 다음과 같다.

3.1 캐패시턴스 측정원리

Fig.2와 같이 전극간의 정전용량(C)는 다음 (1)식으로 표시된다.

$$C = \frac{\epsilon \cdot S}{D} \quad (1)$$

여기서, ϵ : 유전체의 유전률

S : 전극의 대향 면적

D : 전극상호간의 간격

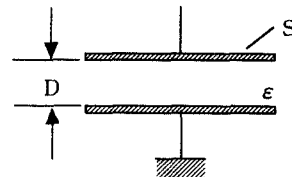


Fig.2 Principle of capacitance measurement

(1)식의 유전률 ϵ 을 진공의 유전률 ϵ_0 와 유전체와의 비유전률 ϵ_s 를 사용하면 $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_s$ 에 따라

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_s \cdot S}{D} \quad (2)$$

여기서, ϵ_0 : 진공의 유전률,

ϵ_s : 유전체와의 비유전률

S : 전극의 대향면적

로 표시된다. 정전용량에 비례한 전압출력을 회로에 의해 정전용량(C)를 전압(e)으로 변화하며

$$e = K \cdot C \quad (3)$$

여기서, C : 정전용량, e : 전압

K : 변환 감도(상수).

(2)식과 (3)식에서 다음식이 구해진다.

$$D = K \cdot \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_s \cdot S}{e} \quad (4)$$

일반적인 변위 측정에서는 ϵ_0 , ϵ_s , S는 일정하므로 $K' = K \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_s \cdot S$ 로 하면 (4)식에서 다음 (5)식을 구할 수 있다.

$$D = \frac{K'}{e} \quad (5)$$

(5)식에서와 같이 정전 용량-전압 변환회로의 전압출력 e에서 간격 D를 구할 수 있다.

3.2 시스템의 구성

본 연구에서는 고정도의 형상정밀도 측정을 위하여 비 접촉 측정시스템을 이용하여 손실각표준기 전극의 형상정밀도를 측정하였으며, 구성장비의 사양은 Table 2와 같다.

Table 2 Specification of measurement system

Term	Item	Capability
Probe & Trans.	Method	Capacitance
	Useable Range	1 ± 0.5mm
	Resolution	1 μm
	Voltage of Output	+5V ~ -5V
	Response of Freq.	10kHz
	Resistance of output	50 Ω below
Calcuator	Size	16 ∅ × 90mm
	Input Channel	2ch
	Display	max 19999
Recorder	Mode	A, B, C-(A+B)
	Input Limit	1mV ~ 50V
	Accuracy	± 0.5% or 20 μV(F.S)
	Linearity	± 0.35%(F.S)
	Velocity of Pen	0.8m/s
	Input Channel	2ch

측정시스템의 자체보정을 위해 별도의 보정장치를 사용하여 프로브와 출력장치의 보정을 실시하였으며, Fig.3은 프로브 보정그래프이다.

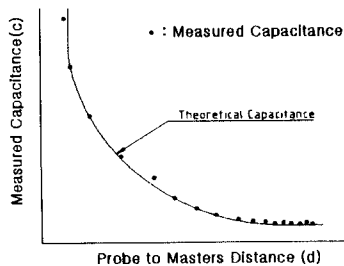
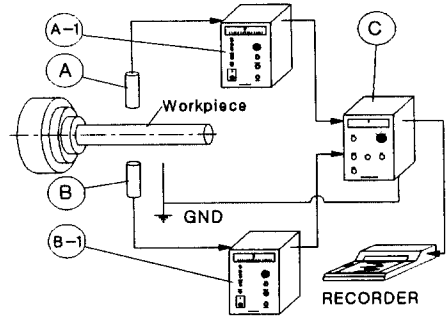


Fig.3 Calibration of capacitance probe
가공물의 형상측정을 위하여 Fig.4에서 보는것

과 같은 비 접촉 프로브와 증폭기 및 출력값들을 별도의 레코더를 사용하여 전용용지에 표시함으로써 실시간으로 데이터를 기록, 판별할 수 있다. 아래의 Fig.4는 정전용량식측정방식의 비접촉센서의 시스템 구성도를 나타내고 있고, Photo 1은 실제 구성된 전체측정시스템을 보여주고 있다.



- Ⓐ, Ⓑ : Capacitance Probe
- Ⓐ-1, Ⓑ-1 : Displacement Transducer
- Ⓒ : Main Calculator

Fig. 4 Composition of non-contact measurement system

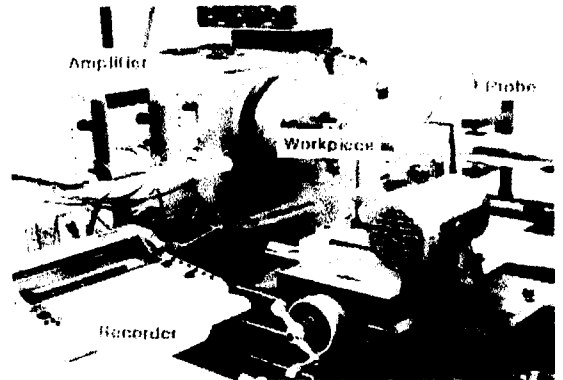


Photo 1 Straightness, roundness measurement system

4. 비접촉 형상측정시스템을 이용한 공작물의 진원도, 진직도 형상측정실험

4.1 진원도측정실험

본 실험에서의 진원도(Roundness)의 측정방법으로 2점측정법(Two-point method)을 적용하였다. 적용된 2점 측정법은 Fig. 5와 같이 일반적으로 두 개의 센서를 공작물의 단면에서 불 때 180° 사이를 두고 위치시켜 측정하는 방식이다. 회전하는 피측정물의 축에 수직을 이루는 단면에

서 회전하는 공작물의 가공형상을 비접촉 센서인 캐패시터로 검출하여 A/D변환 및 증폭을 거쳐 전용프린터로 출력하므로써 진원도를 측정할 수 있는 것이다.

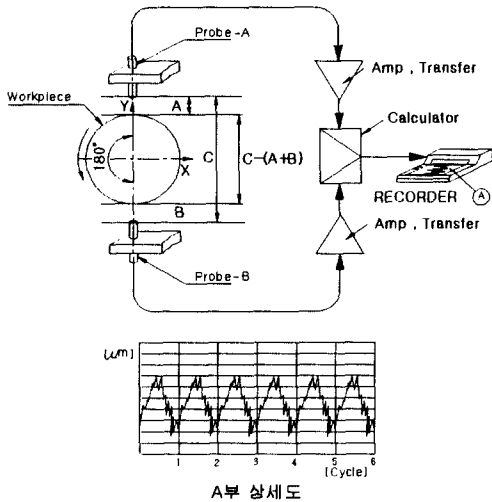


Fig. 5 Two-point method of workpiece

Fig. 5는 원통형상을 가진 손실표준기 전극의 측정을 위한 2점측정법을 나타내고 있다. 2점 측정방식은 선반자체축의 어느정도의 진원오차가 발생하더라도 Fig.5에 나타난 연산식을 통해 진원도측정에 오차요인으로 작용하지 않는다는 장점을 가지고 있어 온라인 계측에 가장 적합하다고 볼 수 있으며, 특히 원형가공측정시에 매우 적절하게 사용할 수 있다.

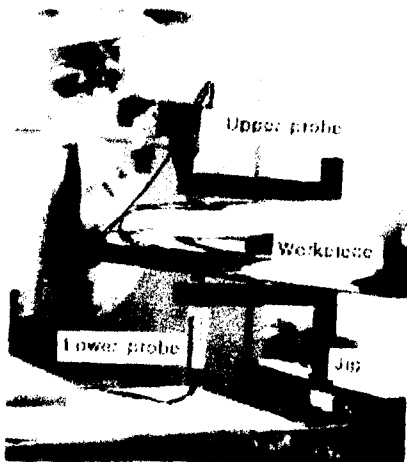


Photo 2 Probes(ST-0505) and Jig for measurement of workpiece

Photo 2는 피측정물 상하위치에 측정프로브(ST-0505)를 2자형 고정지그를 이용하여 실제 장착된 모습을 보여주고 있다. 앞서 보았던 Fig. 5와같이 피측정물의 상하점에 위치하도록 고안된 고정지그를 이용하여 프로브가 측정대상체에 수직으로 정확하게 자리잡을 수 있도록 하였고 공작물 표면과의 간격을 변동없이 유지할 수 있도록 3개의 고정볼트로 고정하였다. Table 3과 Fig. 6는 프로브(ST-0505)와 피측정물사이의 간격과 출력전압 및 메타표시치의 관계를 그래프와 표로 나타내고 있다.

Table 3 Relationship between probe gap and output voltage

Gap of probe and workpiece (D)	Output voltage	Display value
D=0.5mm	+5V ± 0.05V	+50 μA
D=1.0mm	0V ± 0.05V	0
D=1.5mm	-5V ± 0.05V	-50 μA

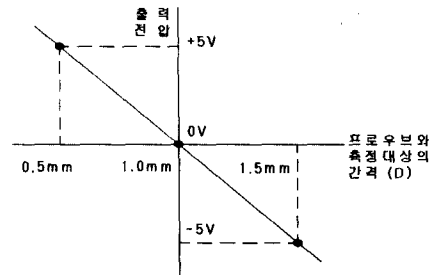


Fig. 6 Measured voltage vs. distance graph

이와같이 측정시스템의 셋팅이 끝나면 피측정물의 임의의(측정물의 길이를 100mm씩 나눈 위치)지점을 설정하여 진원도 측정을 실시한다. 피측정물의 측정위치에 프로브를 이송시켜 놓은후 선반을 저속(30rpm)으로 회전시켜 변위를 측정함으로써 피측정물의 진원도를 측정할 수 있다.

4.2 진직도 측정실험

본 시스템을 이용하여 2점을 차례로 측정하는 진직도(straightness)측정실험은 선반의 베드면에 진원도 측정과 같은 동일한 방법으로 두 개의 프로브를 설치하고 피측정물과의 상대변위를 두 변위계의 간격에서 왕복하여 2점씩 측정하고 그 결과를 데이터 처리하여 레코더 등의 출력기기로 출력함으로써 진직도를 측정할 수가 있다. 또한 이 측정방식은 진직도를 측정함에 있어 기

준으로 하는 직선의 정도를 필요로 하지 않는 특징이 있다. 즉 센서를 설치한 안내면에 이송오차가 있더라도 수직으로 위치한 프로브의 변위량이 상대적으로 작기 때문에 2점의 측정결과로부터 약간의 이송오차는 충분히 제거할 수 있다. 진직도 측정은 진원도 측정과는 달리 피 측정물인 공작물을 정지한 상태에서 프로브가 장착된 배드면만을 좌우로 이송하여 측정한다. 측정정도를 높이기 위해서 피측정물을 각각 X축과 Y축의 수직위치로 회

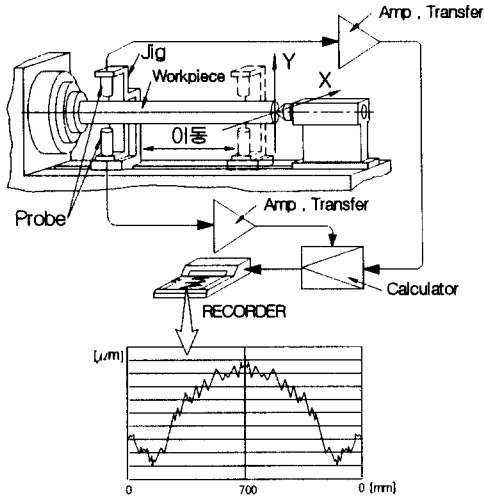


Fig. 7 Measurement of straightness by two-point method

전하여 1회 왕복측정하는 방식을 사용한다. Fig. 7은 이러한 진직도 측정방법 및 측정그래프를 나타내고 있다.

5. 결과 및 고찰

5.1 진원도 측정결과 및 고찰

손실각표준기 전극의 초정밀 가공을 위한 가공공정 및 시스템의 개발로 전극봉의 초정밀가공을 수행하였으며, 전극형상가공, 연삭가공 및 최종정면가공등의 3단계 가공공정을 거쳤다. 각 단계별로 설정된 요구정밀도를 측정시스템을 이용, 측정하여 목표치에 벗어나는 위치를 측정하여 자기전해연마(MEAP)를 1회에서 수회에 걸쳐 실시하여 요구정밀도 이내로 수정보완하도록 하였다. 그 결과, 각 시편마다 차이는 있지만, 시편 모두 보정전 후의 진원도개선 효과를 나타내고 있으며 요구정밀도이내의 진원도를 실현할 수 있

었다.

Table 4 Measurement results of roundness

Workpiece	Pos.(mm)	Roundness (μm)								
		0	100	200	300	400	500	600	700	Ave.
1	Before	4.2	3.1	3.1	4.7	4.4	3.5	1.8	1.5	3.28
	After	1.9	1.1	1.8	2.4	2.4	2.0	1.8	0.5	1.74
2	Before	10.2	8.3	6.1	6.2	4.5	4.0	5.5	8.5	6.66
	After	0.7	0.8	0.6	0.7	0.5	0.5	1.0	0.5	0.66
3	Before	7.3	9.5	11.7	9.8	9.5	10.7	8.6	5.5	9.07
	After	0.8	1.0	1.7	2.3	2.5	1.7	1.2	0.5	1.46
4	Before	9.5	7.5	5.5	5.5	4.0	3.5	4.5	8.0	6.00
	After	0.7	0.5	1.0	1.4	1.4	1.0	0.7	0.4	0.89
5	Before	4.5	5.8	5.4	4.3	4.0	5.6	7.3	6.4	5.41
	After	0.4	0.7	0.7	0.7	0.6	1.1	0.6	1.0	0.73
6	Before	2.9	2.8	4.5	4.7	6.6	5.8	2.8	2.2	4.03
	After	0.4	0.6	1.0	1.4	1.6	1.8	0.8	0.4	1.0
7	Before	1.3	1.8	3.8	4.8	4.8	2.5	4.0	3.5	3.31
	After	0.5	0.7	0.7	0.5	0.5	0.6	0.3	0.4	0.53
8	Before	1.6	2.3	3.9	5.1	5.2	3.1	4.6	4.0	3.72
	After	0.3	0.5	0.1	0.3	0.4	0.6	0.6	0.5	0.41
9	Before	7.6	7.6	9.7	10.3	10.4	10.3	10.3	8.4	9.32
	After	0.3	0.3	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.4	0.3
10	Before	2.5	2.0	3.5	3.5	5.0	4.0	2.0	1.7	3.02
	After	0.6	0.4	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.3	0.25

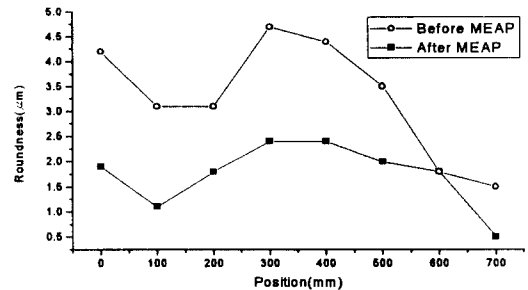


Fig.8 Comparison of roundness between before and after MEAP of workpiece no.1

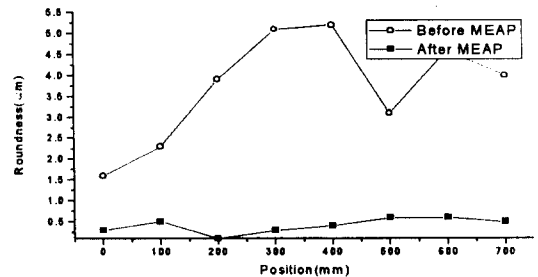


Fig.9 Comparison of roundness between before and after MEAP of workpiece no.6

Table 4는 각 전극봉시편의 보정전,후에 대한 진원도측정치이며, Fig.8, 9, 10는 각각 시편1, 6, 8번의 진원도 보정가공 상태를 그래프로 나타내고 있다.

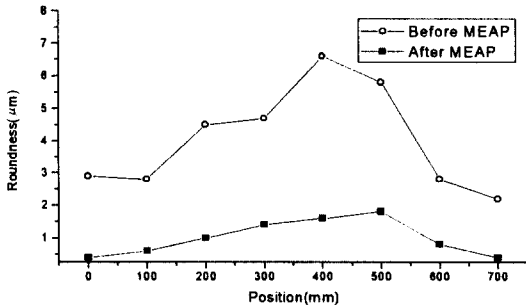


Fig.10 Comparison of roundness between before and after MEAP of workpiece no.8

5.2 직진도 측정 결과 및 고찰

진직도의 보정 또한, 자기전해연마법을 사용하여 각 단계별로 발생된 가공오차를 측정시스템을 이용하여 확인 후, 진원도 보정가공과 동일한 방법으로 수정하여 각 시편마다 최소 $0.2\mu\text{m}$ ~최대 $11\mu\text{m}$ 까지 직진도의 오차정도가 개선되어 시편의 총 길이에 대한 진원도 요구정밀도 $7\mu\text{m}$ 이내로 가공되는 것을 확인할 수 있었다.

Table 5 Measurement results of straightness

Workpiece Position											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Y	Before	7	7.5	15.6	9.8	6.8	11.2	5.8	8.7	6.6	11.8
	After	6	5.3	4.3	9.6	5.4	5	5.4	4.2	2.8	9.2
X	Before	7.2	7.5	13.5	9.2	7.0	11.0	9.0	8.2	6.6	11.2
	After	4	5.3	3.9	9.0	7.0	4.8	5.9	4.7	2.5	9.6
Ave.	Before	7.1	7.5	14.45	9.5	6.9	11.1	7.4	8.45	6.6	11.5
	After	5	5.3	4.1	9.3	6.2	4.9	5.65	4.45	2.65	9.4

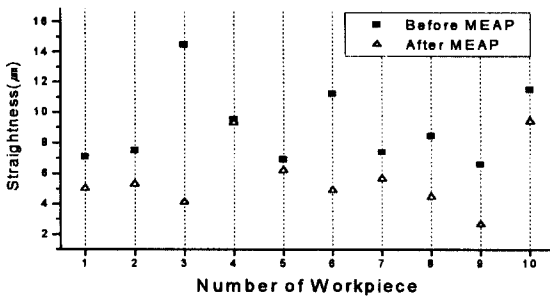


Fig.11 Comparison of straight between before and after MEAP of workpiece

Table 5와 Fig.11은 각 시편에 관한 직진도 보정에 따른 측정치변화와 그래프를 보여주고 있다.

6. 결 론

고정밀 형상정밀도 구현을위해 개발된 손실각 표준기 전극의 형상정밀도 측정시스템 개발결과 다음과 같은 효과를 얻었다.

- ① 진원도, 진직도 측정시 μm 단위의 요구정밀도의 정밀측정시스템 개발로 인한 가공정밀도 향상
- ② 가공작업중의 인프로세스 측정에따른 가공시간 및 공정의 감소
- ③ 초정밀가공작업중의 공작물의 오차보정 및 비접촉방식으로 인한 가공면 손상방지 등 공작물의 불량률 발생 최소화
- ④ 출력된 데이터를 통한 공작기계자체의 보정 및 수명예측 가능

참고문헌

- (1) 김정두, "손실각표준기 전극의 초정밀 가공시스템 개발", 한국표준과학연구원 주관 한국과학기술원 시행 위탁연구과제 최종보고서, (1996)
- (2) 김정두, "정밀로올러 형상정밀도 측정시스템 개발" 중소기업청 주관 한국과학기술원 시행 5차년도 산·학·연 지역 컨소시엄 최종보고서, pp.31-53, (1998)
- (3) J.D.KIM, "Development of Nonwoven Abrasive Pads and Characteristics of Magneto-Electrolytic-Abrasive Polishing", 5th International Conference on Deburring and Surface Finishing, San Francisco, California, U.S.A., pp.413-432, (1998)
- (4) Bryan.J.B., P.Vanherck, "Unification of Terminology Concerning the Error of Axis of Rotation.", Annals of the CIRP, Vol.24/2, pp.555-562, (1975)
- (5) Unification Document ME: "Axes of Rotation." Annals of the CIRP, Vol.25/2, pp.545-564, (1976)
- (6) L. Michelson, "Greater Precision for Non contact Sensor.", Machine Design, pp.117-121, (1979)
- (7) Wei Gao, Satoshi Kiyono, Tadatoshi Nomura, "A New Multiprobe Method of Roundness Measurements.", Precision Engineering, Vol.19, pp.37-45, (1996)