

연삭 가공면의 표면조도와 형상정밀도의 비접촉식 인프로세스 측정기술

임 동열*, 김 승우**

An In-Process Measurement Technique for Non-contact Monitoring of Surface Roughness and Form Accuracy of Ground Surfaces

Yim, Dong-Yeol and Kim, Seung Woo

ABSTRACT

An optical technique using laser for non-contact measurement of surface roughness and form accuracy of ground surfaces is presented.

It is found that, when a ground surface is illuminated by a beam of laser light, the roughness height and slope distribution has significant influence on the pattern of reflection and it maintains an unique Gaussian distribution relationship with the surface roughness. The principle idea of the optical measurement system is therefore monitor the radiation, and then calibrate it in process against surface roughness by means of necessary digital data processing.

On the other hand, measuring the form accuracy of a ground surface is accomplished by using a triangular method, which is based on observing the movement of an image of a spot of light projected onto the surface. The image is focused, through a series of lenses for magnification, on a photodetector array of line configuration. Then the relative movement of image and consequently the form accuracy of the surface can be obtained through appropriate calibration procedures.

* 한국과학기술원 생산공학과(정회원)

** 한국과학기술원 생산공학과 조교수(정회원)

Experimental test showed that the optical roughness measurement technique suggested in this work is very efficient for most industrial applications being capable of monitoring the roughness heights ranging 0.1 to 0.6 μm CLA values. And form accuracy can be measured in process with a resolution of 10 μm .

Key Words

Grinding process (연삭가공 공정), Surface texture (표면형태),
 Form accuracy (형상정밀도), Specular reflection (정반사),
 Surface roughness (표면조도), Scattered reflection (난반사),
 In-process measurement (인프로세스 측정),
 Roughness height and slope distribution (표면거칠기 높이 및 경사도분포)

1. 서 론

연삭가공 공정은 정밀 기계부품에 요구되는 고도의 형상정밀도 (Form accuracy)와 표면조도 (Surface roughness)를 얻기 위해 현존하는 여러 가공방법들 중에서도 생산원가 및 생산성 면에서 우수하기 때문에 널리 사용되고 있다. 이러한 연삭공정은 어느 한 기계부품의 여러 생산가공 단계중 일반적으로 마무리 단계로 적용되게 되므로 완성부품의 정밀성, 신뢰성, 생산성 및 제조원가에 미치는 영향이 초기가공 공정이나 중간가공 공정보다 훨씬 더 크다. 그러므로 연삭가공 공정의 품질관리는 매우 중요한 문제이며 그런만큼 효율성을 높이기 위한 연구의 필요성이 제기되고 있다.

현재 산업계에서 사용되는 품질관리 방식은 후가공 (Post-process) 방식으로 가공이 완료된 제품에 대해 재래식 축침법 (Stylus method)이나 접촉식 측정기들을 사용하여 표면조도나 형상정밀도를 측정하는 방식이다. 따라서 완성제품의 제품정밀도에 대한 확인에 그치고 있는 실정이며 기계부품의 가공과 측정이 직접적으로 연계되지 못하고 있다. 이러한 문제점들을 극복하기 위한 방법으로 능동제어 (Active control) 방식이 제안되고 있으며 최근에는 적응

제어 (Adaptive control)의 응용 및 도입에 대해 많은 연구가 행하여지고 있다 [1-5].

이제까지 연구개발 되어온 연삭가공 공정의 적응제어 방법에는 구체적인 사항에 있어서는 여러가지 차이점이 있으나 일반적으로 하드웨어의 기본구성은 그림 1과 같이 요약될수 있다. 이들 기본구성은 그림에 도시된 바와 같이 연삭공정부, 서보 (Servo) 제어부, 적응제어부, 인프로세스 (In-process) 측정장치의 4 가지 주구성요소로 이루어진다. 연삭공정부는 실제 연삭가공이 행하여지는 부분을 총칭하는 것으로 가공물, 연삭숫돌 및 이들에게 연삭에 필요한 제반운동을 부여하기 위한 기계장치들을 포함한다. 서보제어부는 연삭공정부의 구동장치의 제어를 담당하는데 최적 연삭가공 조건의 유지에 필요한 속도 및 위치를 제어한다. 인프로세스 측정장치는 가공중 (In process)에 연속적으로 형상정밀도, 표면조도, 가공력등을 측정하여 진행중인 가공상태에 대해 점검함과 동시에 가공조건 최적화에 필요한 자료를 적응제어부에 공급하는 역할을 하게된다. 적응제어부는 인프로세스 측정장치로 부터 공급되는 측정자료를 정해진 적응제어 알고리즘 (Algorithm)을 이용하여 분석 및 처리하고 최적의 가공변수의 조합

을 결정하게 된다. 적응제어부에서 결정된 최적의 가공조건은 가공중에 직접적으로 서보제어부에 전달되며 서보제어부는 적절한 제어를 통해 연삭기가 항상 최적의 가공상태를 유지하게 한다. 따라서 연삭공정이 최적의 가공조건 하에서 진행되며 가공공정의 정지없이 가공물의 가공상태를 알 수 있기 때문에 적응제어의 도입은 결과적으로 능동적인 품질관리를 가능하게 한다.

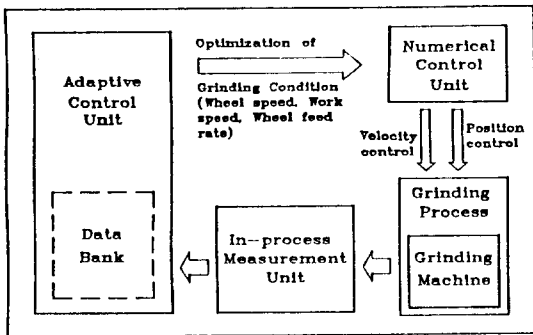


Fig. 1 Layout of the adaptive CNC system

이러한 적응제어 방법의 도입가능성이 많은 연구를 통해 입증되었으나 실제 현장에서는 아직 성공적으로 실행되지 못하고 있는 실정이다. 그 이유는 여러가지가 있으나 가장 큰 문제점은 적절한 인프로세스 측정장치가 개발되지 못하고 있다는 점이다. 연삭가공 공정에서 요구되는 인프로세스 측정은 크게 나누어서 가공면의 표면조도 및 형상정밀도의 측정, 가공중에 발생하는 연삭력 및 연삭에너지의 측정, 열변형에 의해 가공부품내에 잔존하게 되는 잔유응력 및 크랙(Crack) 측정의 3가지로 대별된다. 이 중에서도 가장 빈번히 요구되는 기본적인 측정항목이 형상정밀도와 표면조도의 측정이며 현재 인프로세스 측정의 주관심 대상이 되어 연구개발이 진행되고 있다.

본 연구에서는 연삭가공중 가공부품에 요구되는 형상정밀도와 표면조도의 능동적인 측정과 적응제어 방법의 도입에 필수불가결한 인프로세스 측정기술 개발을 목표로 하여 다음과

같은 연구를 수행하였다.

- 1) 레이저 및 광전자(Opto-electronics) 기술을 이용한 비접촉방식의 표면조도 및 형상정밀도 측정원리 제안
- 2) 제안된 원리를 기본으로 하는 실제가공에 적용가능한 측정장치 시스템의 개발
- 3) 측정장치를 이용한 실험 및 실험결과에 대한 토의

2. 광학적 측정 시스템의 설계

평행 단색광속(Monochromatic light beam)을 연삭가공면에 수직경면상에서 θ 의 각도로 입사시키면 연삭면으로 부터의 반사광은 그림 2(a)에 도시된 바와 같이 정반사방향을 중심으로 하여 산란하게 된다. 이때 발생하는 산란의 형태는 연삭면의 표면형태(Surface texture)에 따라 크게 달라지게 되며 두가지의 광학적 반사현상인 정반사(Specular reflection)와 난반사(Diffuse reflection)의 조합으로 이루어지게 된다. 여기서 이 두가지 형태의 반사는 서로 독립적이며 표면이 갖고있는 제반 통계학적 성질들의 서로 다른 인자들에 의해 영향을 받는 것으로 알려지고 있다.

반사와 연삭가공면의 표면형태 사이의 관계 규명이 여러해에 걸쳐 가공면에서의 반사광선을 통계학적으로 처리하는 방법을 통해 시도되었으며 그에 관한 많은 연구가 진행되어온 결과 정반사와 난반사에 관한 다음과 같은 사실들이 밝혀졌다 [6-8].

그림 2(b)는 중심선(Mean level)에서 부터 높이 h 만큼 떨어진 곳에 위치하는 거칠기요소(Roughness element)에서 발생되고 있는 정반사를 나타내고 있다. 표면의 높이변화 h 에 의해 발생하게 되는 광선의 위상차(Phase difference)는 $4\pi(h/\lambda)\cos\theta$ 이며, h 의 확률분포(Probability distribution)를 $W(h)$ 라 하면 정반사광선의 전체 광량은 확률밀도 분포의 푸리에변환(Fourier transform)인

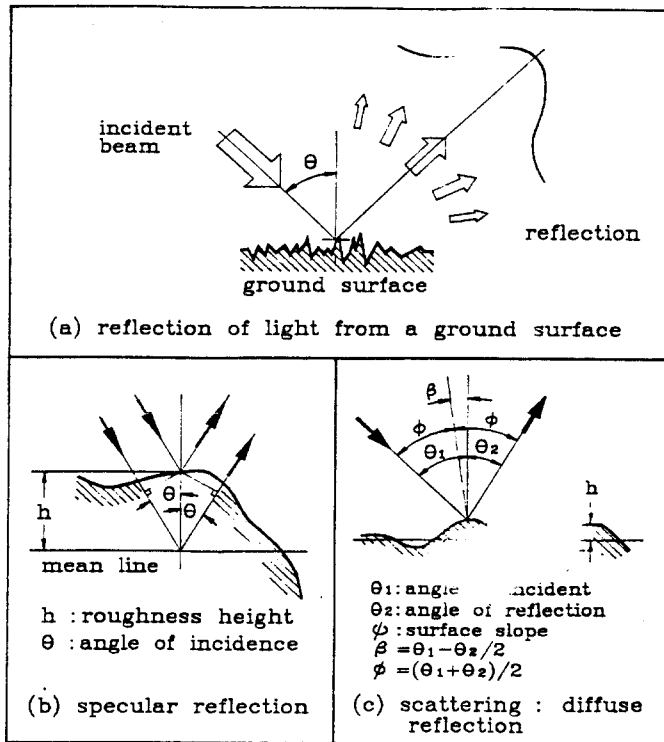


Fig. 2 Reflection of light from a ground surface : specular reflection and scattering

$$\int_{-\infty}^{\infty} W(h) \text{Exp}(j 4 \pi h \cos \theta / \lambda) dh \dots\dots\dots(1)$$

에 비례하게 된다. 여기서 λ 는 입사광선의 파장이다.

그림 2(c)는 거칠기요소에서 발생되고 있는 난반사를 보여준다. 이 경우 반사의 영향은 기하광학에 의해 결정되는데 표면경사각이 ψ 이면 반사방향은 정반사 방향으로 부터 2ψ 만큼 벗어나게 된다. 따라서 이 방향으로 반사된 반사광선의 광강도는 표면경사각 분포의 확률밀도

(Probability density of the surface slope distribution)에 비례하게 될 것이며, 표면경사각의 확률분포는 반사광선들의 광강도분포상태 측정을 통해 직접적으로 얻을수 있게 된다. 난반사에 관한 전체이론이 그림 2(c)와 같은 거칠기요소를 이용하여 Beckmann[6]에 의해 제시되었는데 그해가 $G = [4 \pi (\sigma_h / \lambda) \cos \phi \cos \beta]^2$ 으로 주어졌다. 이와같은 기하광학

적인 접근방법이 아주 고운 연삭가공면을 제외한 대부분의 연삭가공면의 난반사 문제를 취급하는데 있어서 유효한 것으로 알려지고 있다. 여기서 σ_h 는 h 의 표준편차이다.

이상과 같이 연삭가공 표면의 통계학적 변수와 광반응 사이의 관계규명을 위한 많은 연구가 행해져 왔음에도 불구하고, 아직까지도 명확한 이론적인 해석방법이 정립되지 못하고 있는 실정인데 그 주된 이유들은 다음과 같이 요약될수 있다.

가) 연삭가공면의 표면형태는 연삭방향과 수직방향이 서로다른 2차원적이기 때문에 비교적 다루기 쉬운 확률함수를 사용한 통계학적 처리가 용이하지 않다.

나) 대부분의 연삭표면에서는 표면의 제반 통계학적 특성에 의해 정반사와 난반사가 동시에 복잡한 형태로 혼합되어 발생된다.

이러한 이유로 명확한 이론적인 규명은 이루

어지지 못하고 있지만 인간의 눈이 명백하게 서로 다른 표면조도를 갖는 연삭가공면에 대한 광반응을 명확히 구분할수 있음이 경험을 통해 알려지고 있다. 매우 숙련된 연삭 작업자들이 목적에 의해 연삭가공면의 표면조도를 비교적 잘 추측할수 있음은 잘 알려진 사실이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 사실에 입각하여 서로 다른 표면조도를 갖는 표면에 대한 광반응의 변화를 효율적인 광전장치 (Opto-electronic instrument)와 디지털자료 처리기술 (Digital data processing technique)을 이용하여 좀더 객관적으로 정량화 하는데 중점을 두고 측정시스템을 설계 하였다.

이러한 목적으로 본 연구에서 개발된 측정시스템은 크게 나누어서 그림 3에 도시된 바와 같이 레이저광 발광부 (Laser beam emitting unit), 영상감지부 (Image sensing unit), 디지털자료 처리부 (Digital data processor)의 3 가지로 구성된다.

레이저광 발광부에는 출력 1 mW의 헬륨네온 (HeNe) 레이저헤드 (Laser head)가 사용되어 파장이 632.8 nm 인 TEM₀₀ 형태의 평행 레이저 광속을 발생시킨다. 이때 발생하는 광속의 직경은 0.69mm이며 광섬유케이블 (Flexible optic fiber cable)을 통해 다수의 렌즈들로 구성된 광속축소부에 전달되고 이들을 통과한 레이저광속은 직경 0.4mm의 평행속으로 축소되어 연삭가공면에 입사된다. 여기서 광섬유 케이블은 가공중에 있는 조악한 환경의 연삭가공면 근처에 레이저 발생장치 (Laser generator)를 위치시키는 것이 위험하기 때문에 사용되었다. 발생된 레이저는 작업환경에서 발생되는 잡광 (Noise light)에 의한 영향을 무시할 수 있을만큼 강하며, 고도의 단색성 (Monochromaticity)을 유지하고 반사후 측정대상 범위의 연삭표면상에서 균일한 광반응을 나타낸다.

영상감지부는 일련의 집광렌즈 (Condensing lens), 광분할기 (Beam splitter), 2개의 C-

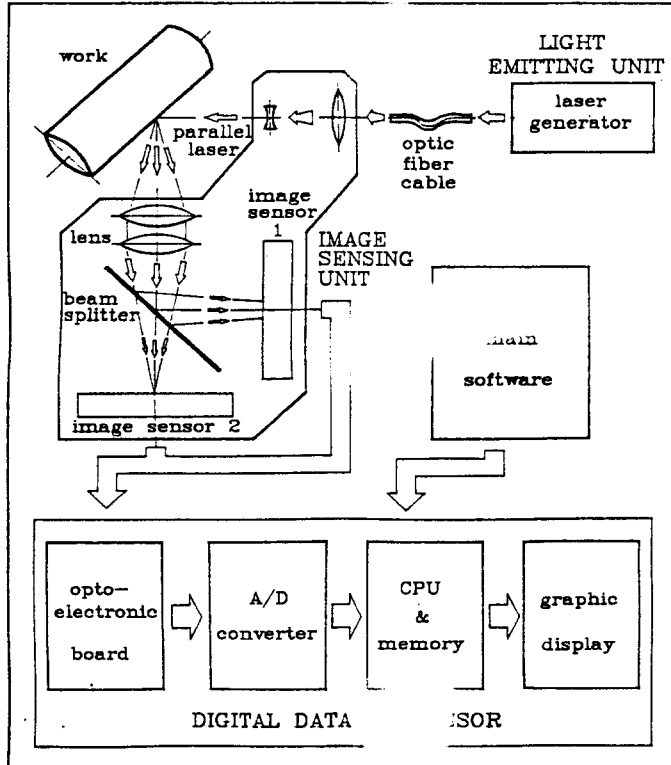


Fig. 3 Optical measurement system for surface roughness and form accuracy

CD 영상센서 (Charge coupled device image sensor)로 구성되어 있다. 한개의 영상센서는 집광렌즈 시스템의 영상점에 위치되어 형상정밀도의 측정에 사용되며, 또 다른 영상센서는 이론적인 영상점으로 부터 일정한 거리만큼 벗어난 곳에 위치되어 표면조도를 측정하기 위해 사용된다. 가공면으로 부터 반사된 반사광선들은 집광렌즈를 거쳐 모아진후 광분할기에서 양분되어 두개의 영상센서에 입사되고 영상센서의 수광소자 (Photodiode element)에 영상을 형성한다. 영상센서는 4096 개의 1 차원 수광소자 배열로 구성되어 있는데 각 소자들은 7 μm 의 배열피치를 갖고 배열방향으로 균일하게 분포되어 있으며 입사광량에 비례하는 전압을 발생시킨다.

디지털자료 처리부는 광전회로판 (Opto-electronic board) 및 A/D 변환기, 중앙처리 및 기억장치, 그래픽스크린 (Graphic screen)으로 구성된다. 자료처리의 모든 과정은 Intel 8088 CPU에 의해 통제되며 Intel 8087 산술 코프로세서 (Math-coprocessor)가 그의 기능을 첨가한다. 모든 측정은 자료처리를 통해 이루어지며 자료처리의 초기단계에서 광전회로판은 8088 CPU의 통제하에 영상센서의 매 소자에서 발생하는 전압신호를 모두 모아서 2 MHz의 비데오신호 (Video signal)를 형성시킨다. 이신호는 A/D 변환기를 통해 8 bit의 디지털 형태로 변환된후 직접 자료전달 (Direct Data Transfer) 방법을 통해 8 K RAM에 순차적으로 저장되는데 개개의 영상센서에 할당된 기억용량은 4 K 바이트 (Byte)이다. 소프트웨어는 RAM에 저장된 자료를 분석 및 처리하여 측정결과를 산출하며 산출된 결과를 그래픽 모니터 스크린에 표시한다.

3. 표면조도 (Surface roughness) 측정원리

본 연구에서 제안된 표면조도 측정원리는 다음과 같은 기본가정을 중심으로 하고 있다.

가) 연삭가공면의 표면거칠기의 높이 (Rough-

ness height)와 경사 (Roughness slope)도 분포는 통계학적으로 모두 가우스분포 (Gaussian distribution)의 형태를 유지한다.

나) 공학적으로 흔히 사용되는 중심선평균거칠기 (CLA) (또는 평균제곱근 거칠기 : RMS)와 표면의 통계학적 성질 (Statistical properties) 사이에는 유일한 상관관계가 존재한다.

상기의 가정들에 대한 정당성이 아직은 증명되어 있지 않지만 본 연구의 결과는 물론 이제까지 발표된 실험결과들은 위의 가정들이 타당하다는 것을 보여주고 있다 [9].

그림 4는 제안된 표면조도 측정원리를 나타내고 있다. 레이저 발생장치로 부터 발생된 평행 레이저광속이 45도의 각도로 측정면에 입사되고 반사된후 집광렌즈를 통해 모아져서 영상센서에 입사된다. 영상센서가 영상점으로 부터 일정거리만큼 떨어진 곳에 위치하기 때문에 입사광선들은 필연적으로 다수의 수광소자에 걸쳐서 입사하게 되며 그 결과 반사광선들의 공간상 광강도 분포상태는 그대로 수광소자 배열의 출력전압에 사상 (Mapping)된다. 반사광선들의 공간상 광분포상태는 측정표면의 거칠기 높이분포와 경사분포에 따라 달라지기 때문에 수광소자 배열로부터 발생하는 전압분포는 해당 측정표면의 거칠기 높이분포와 경사도분포의 산출을 가능하게 한다.

레이저 발생장치로 부터 발생된 레이저광이 TEM₀₀ 형태로 가우스 횡단면조도 (Gaussian transverse irradiance profile)를 갖으며, 연삭가공면의 거칠기 경사도분포가 가우스분포 형태로 가정되었기 때문에 가우스분포 곡선의 특

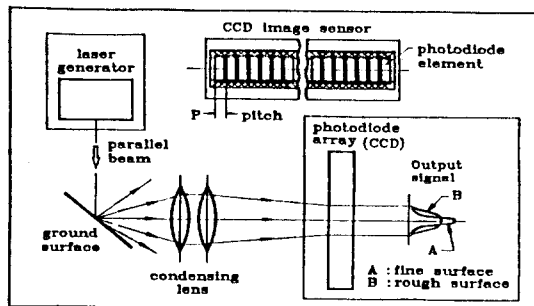


Fig. 4 Principle of surface roughness measurement

성에 의해 반사광선들의 광강도분포는 정반사 방향에 최고치 (Peak value)를 갖는 가우스분포를 하게되며 광강도분포 I는 다음과 같은식으로 근사되어 진다.

$$I = I_0 \text{Exp} \left\{ -\frac{(Y - Y_m)^2}{2 \sigma^2} \right\} \dots\dots (2)$$

여기서 Y : 수광소자의 배열번호 (Y = 1, 2, 3 ... , 4096)
 Y_m : 정반사방향의 수광소자 번호
 I₀ : 정반사방향의 최대 광강도
 σ : 수광소자들에 입사되는 광강도 분포의 표준편차

변수 I₀는 정반사에 의해 결정되는 사항이며 표면의 거칠기높이의 함수이다. 거칠기높이의 확률분포가 평균값이 0인 표준 가우스분포일 경우 표면에 따른 I₀의 변화는 표면조도의 표준편차에만 의존한다 [6]. 이론적인 해석에 의하면 식(1)의 푸리에변환이 가우스형태이기 때문에 정반사광의 광강도 I₀는 다음과 같이 주어진다.

$$I_0 = k \text{Exp} (-16 \pi^2 \sigma_h^2 \cos^2 \theta / \lambda^2) \dots\dots (3)$$

여기서 σ_h : 거칠기 높이의 표준편차
 θ : 레이저광의 입사각
 λ : 레이저광의 파장
 k : 비례상수

이며, 거칠기 높이의 표준편차 σ_h는 통상 RMS 값으로 불리우고 비례상수 k는 표면의 광전도도(Light conductivity)에 관계되는 수치로 측정물의 재질에 따라 변화한다.

식(2)의 표준편차 σ는 그의 변화가 주로 표면의 경사분포에 의존하는 난반사의 정도를 나타낸다. 비록 경사분포와 σ의 이론적인 관계가 아직까지는 명확하게 밝혀지지 않았지만 어떤 재질의 경우에는 난반사가 두드러지게 나타나는 영역에서는 표면조도 수치와 유일한 상관관계를 이루면서 증가한다. 현실적인 측면에 있어서 표면조도에 관한 σ가 I₀보다 더 유용한 변수로 밝혀지고 있는데 그 이유는 I₀가

단지 정반사방향의 광반응만을 나타내는데 반해 σ는 광반응 전체의 통계적 성질을 대변하기 때문이다. 그림 5는 측정자료의 적절한 처리를 통해 얻은 대표적인 분포곡선을 도시한다.

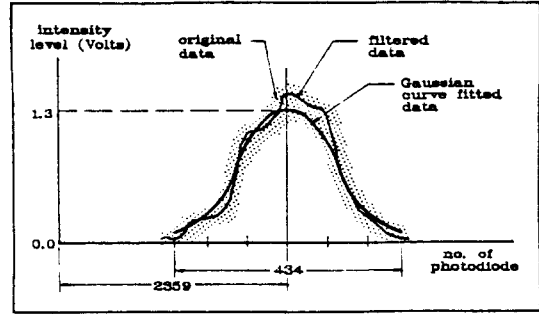


Fig. 5 A typical data processing for surface foughness measurement

4. 형상정밀도(Form accuracy) 측정원리

형상정밀도는 그림 6에 도시된 바와 같이 기하광학을 이용한 삼각법(Triangulation method)에 의해 측정되는데 그 원리는 다음과 같다. 평행 레이저광속이 측정표면에 입사되고 반사된 후 집광렌즈에 의해 모아져서 집광렌즈 시스템의 영상점에 위치한 영상센서의 수광소자 배열에 영상을 형성한다. 가공이 진행됨에 따라 가공물의 치수가 달라지게 되고(원통형 가공물의 경우에는 가공물의 직경)입사광속의 반사점(측정점)이 입사방향을 따라 이동하게 된다. 반사점이 이동하게 되면 영상점은 수광소자 배열상에서 집광렌즈 시스템이 갖는 배율만큼 확대된 거리를 이동하게 된다. 소자배열 상에서의 영상점의 위치는 개개의 소자에서 출력되는 전압을 검출하여 적절한 자료처리 과정을 통해 산출되며 이 영상점의 이동거리를 구하여 반사점의 이동거리를 역산한다.

그림 6에서 기준축에 대한 가공물의 직경의 상대적인 변화 D는 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$D = (Y / M) \cos \theta \dots\dots\dots (4)$$

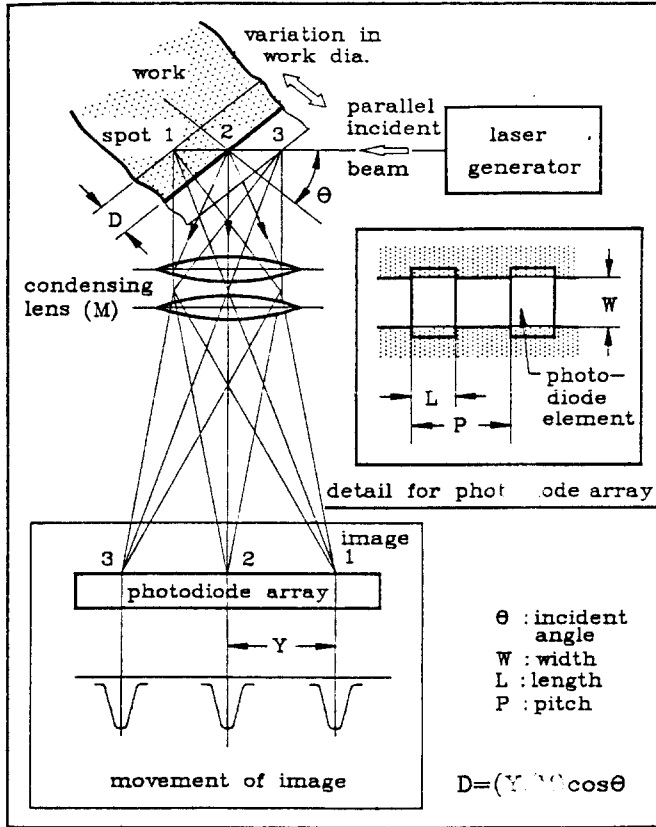


Fig. 6 Principle of form accuracy measurement

여기서 Y : 수광소자 배열상에서의 영상점의 이동거리

M : 집광렌즈 시스템의 배율

θ : 입사 레이저광축의 입사각

이다.

분해능 (Resolution) R 은 가공물의 감지가능한 최소의 변화를 의미하는데 이 측정 시스템의 분해능은 다음과 같이 주어진다.

$$R = P \cos \theta / M \dots\dots\dots (5)$$

여기서 P는 수광소자 배열의 피치이다.

상기의 측정원리가 연삭가공중에 적용되어 적절히 설정된 축(Machine axis)과 함께 사용

될 경우, 가공물의 평균직경 뿐만 아니라 그림 7에 도시된 바와 같이 다양한 형상오차(Form error)를 인프로세스로 측정가능 하다. 그림7은 원통연삭의 경우에 존재하게 되는 최대및 최소직경, 진원도(Roundness), 원통도(Cylindricity) 등을 측정하는 방법을 보여준다. 그외에도 이 측정시스템은 플런지연삭(Plunge type grinding)에 있어서 비생산적인 공기절삭(Air cutting) 시간을 최소화하기 위해 연삭숫돌과 가공물의 접촉을 감지하는 센서로도 활용가능 하다. 이경우 숫돌이 가공물을 향하여 접근함에 따라 발생하게 되는 가공물의 직경의 갑작스런 초기감소를 센싱(Sensing) 하므로써 감지될수 있다.

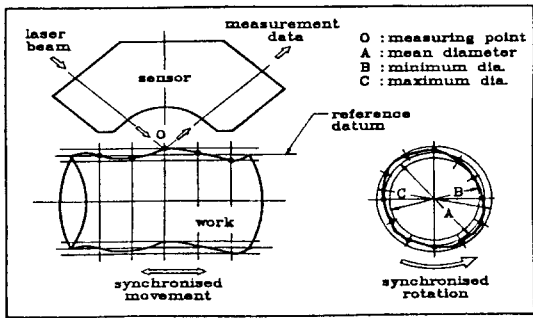


Fig. 7 Form accuracy measurement of a cylindrical component

5. 실험결과

그림 8은 제작된 실험장치의 정밀도보정을 위한 실험장면을 보여주고 있다. 정밀도보정은 레이저 인터페로미터를 이용하여 행해지는데 시편 (Specimen)과 반사경 (Reflector)을 안내기구를 따라 이동시키면서, 레이저 인터페로미터와 실험장치를 이용하여 동시에 이동거리를 측정 한후 인터페로미터의 측정치를 기준으로 하여 실험장치의 측정치를 보정하므로써 행해진다.

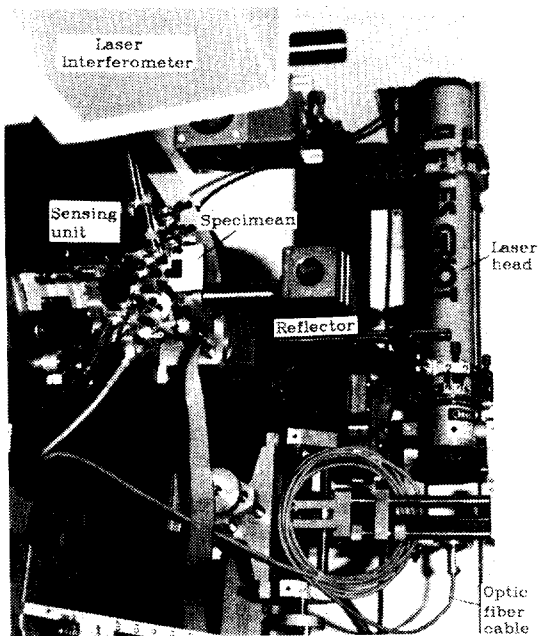


Fig. 8 Calibration of displacement accuracy using Laser Interferometer

그림 5는 표면조도 측정에서 나타나는 전형적인 측정자료를 도시한 것으로 정반사 방향을 중심으로 반사각을 따라 존재하는 광강도 분포를 보여준다. 그림에서 원래의 측정자료 (Original data)는 A / D 변환과정을 거쳐 영상센서로 부터 직접 얻은 자료를 나타낸다. 이 자료는 표면형상의 불균일과 광전회로로부터 야기되는 다양한 고주파 성분의 잡신호 (Noise signal)를 포함하고 있으므로 디지털 여과 (Digital filtering) 과정을 통해 바람직하지 못한 잡신호를 제거시킨다. 이때 사용되는 디지털 여과는 소프트웨어적인 저주파여과 (Low pass filter)로써 다음식에 의해 정의되는 이동평균 (Moving average) 방법이 사용되었다.

$$Y_n = \sum_{k=1}^M H_k (X_{n+k} + X_{n-k}) \dots\dots\dots (6)$$

- 여기서 n : 1, 2, 3, ..., N
- H : Weighting function, $H_k = H_{-k}$
- X : 입력 (Input)
- Y : 출력 (Output)

이 과정을 통해 얻어지는 여과자료 (Filtered data)를 근거로 하여 최소 제곱오차 방법 (Least-square error method)을 이용하여 다음과 같이 최적의 가우스분포 곡선으로 커브피팅 (Curve fitting) 시킨다. 여과자료 F(y)에 자연로그 (Natural logarithm)를 취한다음,

$$\ln [F(y)] = C_0 + C_1 y + C_2 y^2 \dots\dots\dots (7)$$

(여기서 C_0, C_1, C_2 는 상수)로 놓을수가 있는데 이식은 식(2)를 변형시킨후 자연로그를 취한것과 동일한 형태이다. 최소 제곱오차 방법을 이용하여 식(7)로 부터 상수 C_0, C_1, C_2 를 구하여 수광소자 배열을 따라 커브피팅 시키고, 식(2)를 사용하여 커브피팅된 가우스분포 곡선으로부터 정반사 광강도 I_0 와 표준편차 σ 를 계산한다.

표면조도에 따른 광반응의 변화에 대한 실험 결과가 그림 9에 요약 되었다. 실험은 6개의

서로 다른 표면조도를 갖는 평면연삭 시편에 대해 행해졌으며, 시편의 CLA 및 RMS 값은 Talysurf 10 측정형 표면조도 측정장치를 사용하여 측정되었다. 그림 9의 표에 있는 측정결과는 0.1 μm CLA표면(시편 2)의 광반응에 대한 상대적인 값으로 표현되었다. 측정된 I₀, σ, s의 반복정확도를 검사하기 위해서 각 시편에 대해 20번씩 실험을 행한결과 모든 시편에 있어서 95% 신뢰구간이 평균값(Average value)의 10% 이내에 존재하였다.

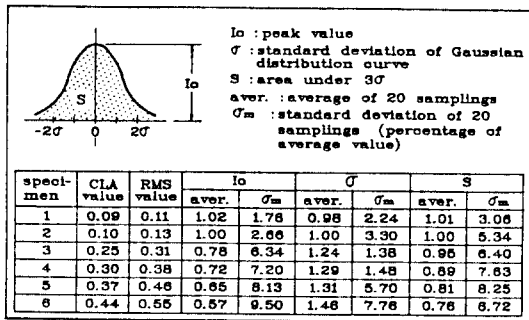


Fig. 9 Calibration data for surface roughness measurement

그림 10은 형상정밀도 측정의 반복도를 검사하기 위하여 행해진 실험결과를 제시한다. 측정시편이 선형 안내기구(Linear guide)를 따라 매 0.1 mm 씩 전체 3 mm 를 이동하면서 기준 위치에 대한 측정시편의 상대위치가 측정되었고, 동시에 HP 5528A Laser Measurement System(Laser Interferometer)이 보정의 목적으로 사용되었다. 그림에서 수평축은 인터페로미터에 의해 측정된 거리를 나타내며 수직축은 개발된 측정장치를 사용하여 측정된 경우의 오차를 나타낸다. 실선은 15번씩 측정된 경우의 평균값을 나타내며 점선은 95% 신뢰도 구간을 나타내는 데 전자는 측정시스템의 “시스템오차(Systematic error)”를 의미하며 후자는 “랜덤오차(Random error)”를 의미한다. 그림에서 최대오차는 E_{max}로 약 30 μm 정도인데 실제의 측정에서는 “소프트웨어 보정(Software calibration)”을 통해 시스템오차를 제거시키게 되므로 최대오차는 랜덤오차

인 R_{max} 이 된다. 랜덤오차는 측정시스템의 반복정확도를 나타내는 것으로 시스템의 측정정밀도에 가장 큰 영향을 주는 오차이다.

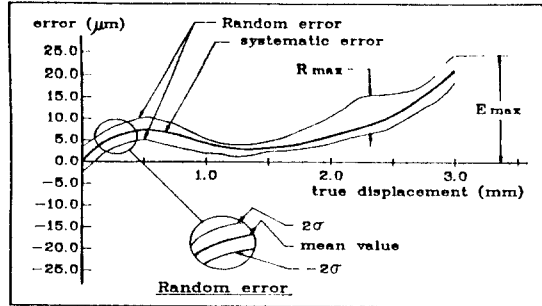


Fig. 10 Total displacement error of form accuracy measurement system

실험결과 R_{max}에 가장 결정적인 영향을 주는 변수는 측정면에 입사되는 입사 레이저광속의 직경인 것으로 밝혀졌다. 입사광속의 직경이 작을수록 랜덤오차의 범위가 작아지게 되는데 집광렌즈를 통해 모아진 측정면으로 부터의 반사광선이 형성하게 되는 영상점이 1개의 수광소자에 사상(Mapping)될만큼 입사광속을 작게 만드는 것은 실제적인 이유에서 매우 어려운 일이다. 따라서 영상점은 그림 11에 도시된 바와 같이 수십개의 수광소자에 걸쳐서 형

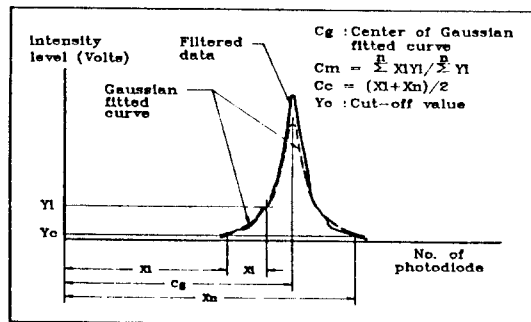


Fig. 11 A method of pinpointing the center of image for form accuracy measurement

성되게 되고 반사점의 실제 이동거리를 나타내는 영상점의 중심을 정확히 구하기는 매우 어려운 일이다. 이것이 측정 시스템의 측정정밀도를 저해하는 랜덤오차 R_{max}를 증가시키는 주

된 원인이다. 영상점의 중심을 구하기 위해 여러가지 방법이 제안되었는데 그결과 그림에서 나타난 바와 같이 여과된 자료의 면적중심과 가우스 커브핏팅된 곡선의 중심을 이용하는 방법이 가장 신뢰도가 높은 것으로 밝혀졌다 [10].

6. 결 론

연삭가공면의 표면조도와 형상정밀도를 광학을 이용하여 비접촉식 인프로세스로 측정하는 측정기술이 제안되었는데, 연삭공정에 적절한 적응제어 방법을 도입하기 위해 [11] 가공물의 가공상태를 측정하는 측정장치 개발에 주안점이 주어졌다. 표면조도의 측정은 평행 입사광속에 대한 반사의 형태를 통계적인 방법으로 해석하므로써 이루어지며 형상정밀도의 측정은 기하광학에 따른 삼각법의 이용에 의해 행해진다. 이러한 원리에 따른 측정장치 시제품(Prototype)이 현대의 광학 및 광전소자를 이용하여 개발제작 되었으며 시제품을 이용한 실험이 행해졌다.

실험결과 본 연구에서 제안된 광학적인 표면조도 측정방법이 0.1에서 0.5 μm CLA 범위의 표면조도를 갖는 연삭가공면에 대해 산업적인 응용의 측면에서 매우 유용한 것으로 기대된다. 현재 제작된 시제품의 경우 원통연삭 부품의 형상정밀도를 약 10 μm 의 분해능으로 측정 가능한 것으로 밝혀졌다.

7. 참 고 문 헌

1. Thomas, T.R., "Surface Roughness Measurement : Alternatives to the Stylus.", 19th Proc. of the Machine Tool Design & Research, P.383-389, 1979.
2. Lonardo, P.M. "Testing a New Optical Sensor for In-Process Detection of Surface Roughness", Annals of the CIRP, p.531-534, Vol.27/1, 1978
3. Tanner, L.H., Fahoum, "A Study of the Surface Parameters of Ground and Lapped Metal Surface, Using Specular and Diffuse Reflection of Laser Light", Wear, p.299-316, Vol.36, 1976
4. Inasaki, I., "Development of In-Process Sensor for Surface Roughness Measurement", 23rd Proc. of the Machine Tool Design & Research, p.109-113, 1983
5. Church, EL., "The Measurement of Surface Texture and Topography by Differential Light Scattering". Wear, p.93-105, Vol.57, 1979
6. Beckmann, P., Spizichino, A., "The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces", Pergamon Press, Oxford, 1963
7. Tanner, L.H., "The Use of Laser Light in the Study of Metal Surfaces", Optics and Laser Technology, p.113-116, June, 1976
8. Bennett, H.E., Porteus, J.O., "Relation Between Surface", J. of the Optical Society of America, p.123-129, Vol.51, 1961
9. Tanner, L.H., "A Comparison between Tallysurf 10 and Optical Measurements of Roughness and Surface Slope", Wear, p. 81-91, Measurements of Roughness and 81-91, Vol.57, 1979
10. Yim, D.Y., "An In-Process Measurement Technique for Non-Contact Monitoring of Surface Roughness and Form Accuracy of Ground Surfaces", MSc Thesis, Dept. of Production Eng., Korea Advanced Inst. of Sci. & Tech., 1987
11. Kim, S.W., "Adaptive Computerised Numerical control of the Grinding Process", PhD Thesis, DDMS, Cranfield Inst. of Tech., 1985