

◆특집◆ 기상측정

연삭기에서의 기상 측정

김현수*, 홍성욱**

On-machine Measurement for Grinding Machines

Hyun-Soo Kim*, Seong-Wook Hong**

Key Words : Surface Roughness(표면 거칠기), Flux of Scattered Light(산란광속), Light Flux Ratio(광속비), Grinding Wheel Wear(연삭 스톨 마모), On-machine Measurement(기상계측), LSM(레이저 스캔 마이크로미터), Grinding Force(연삭력), Straightness(진직도)

1. 서론

연삭은 대체로 정밀한 제품의 마무리 가공에 해당되므로 연삭 정밀도는 해당 제품의 질을 결정하는 중요한 요소가 된다. 연삭 가공물에 대한 일반적인 평가로서 표면 거칠기나 치수 정밀도 등을 측정한다. 그러나 이는 연삭 공정이 종료된 후 별도의 측정 설비에서 시행하여 제품에 대한 합격/불합격만을 판정한다. 제품 검사후 불합격품은 폐기하거나 재가공 되는데 이는 생산성 저하의 원인이 되고 있다. 따라서 가공물을 연삭기에서 이탈시키지 않고 제품을 평가할 수 있는 기상(On-machine) 측정의 필요성이 제기되어 왔으며 많은 연구가 계속되고 있다^[1-23]. 기상 측정은 원리와 구조 및 설계에 있어서 많은 제약을 받으나 생산성 향상에는 필수적이라 할 수 있을 것이다. 연삭기에서의 기상측정 대상은 가공물과 연삭 공구인 연삭 스톨이 있다.

본고에서는 공작물을 이탈시키지 않고 가공 중 연삭기에서의 기상계측 방법을 소개하고자한다. 연

삭 가공물 평가를 위한 기상 측정으로는 비접촉 표면 거칠기 센서와 진직도 측정장치, 그리고 공작물의 초기 높이 측정을 위한 단차 측정 방법을 소개한다. 연삭 공구인 연삭 스톨에 대한 측정으로는 LSM(Laser Scanning Micrometer)을 이용한 연삭 스톨 측정 시스템을 소개하고 연삭 스톨 측정 시스템을 이용한 연삭 스톨 마모 모니터링과 연삭 스톨의 회전오차 측정 방법을 설명한다. 그밖에도 공구 동력계(Tool Dynamometer)를 이용하여 가공 중 연삭력을 측정하는 방법과 그 예를 소개하였다.

2. 연삭 가공물 평가를 위한 기상 측정

2.1 광산란법을 이용한 표면 거칠기 센서

표면 거칠기는 연삭 가공물을 평가하기 위한 일반적인 측정 항목에 포함되는데 전통적인 방법으로 촉침식을 사용하고 있다. 그러나 촉침식은 측정 시간이 길고 연한 재질의 경우 표면이 손상될 수 있으므로 기상 측정에는 부적합하다. 따라서 광학적 방법에 의한 비 접촉 표면 거칠기 측정에 관한 연구가 이루어지고 있다^[1-13]. 그 중에서도 측정 장치 구성의 간편성이나 효율성을 고려할 때 광산란법이 기상계측에 가장 적합한 것으로 평가되고 있다^[1].

Fig. 1에서는 광산란법의 기본 원리를 설명하고 있는데, 측정물의 표면이 고울수록 산란이 적어 반사광이 정반사방향(Specularly Reflected Direction)으

* 금오공과대학교 대학원

Tel. 054-467-4219, Fax. 054-467-4472

Email: hyunsoo@kumoh.ac.kr

** 금오공과대학교 기계공학부

Tel. 054-467-4214, Fax. 054-467-4472

Email: swhong@kumoh.ac.kr

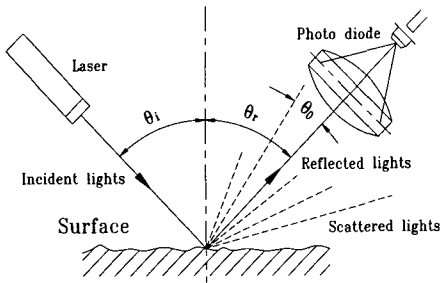


Fig. 1 Conceptual diagram for measurement of flux of scattered light

로 집중되고, 표면이 거칠수록 난반사방향(Diffusely Reflected Direction)으로 분산되는 현상을 이용한 것이다. 광산란법을 이용한 대표적인 방법으로 정반사광을 이용한 방법과 난반사광을 이용한 방법 그리고 산란각 분포를 이용한 방법 등이 있다.

Fig. 2는 정반사광의 광속을 측정하여 표면 거칠기와의 관계를 얻는 방법을 보인 것이다. 이 방법은 정규분포 표면과 유사한 형태의 비교적 고운 표면의 경우에 유용하나 실험적으로는 보다 거친 표면과 선삭 표면 등에도 유용함이 밝혀져 있다^[2]. Fig. 3에서는 광섬유 다발(Optic Fiber Bundle)을 사용하여 입사와 수광을 하였다^[3]. 표면에서 반사되는 정반사광과 특정 각도에서의 난반사광의 광속비 또는 두 개의 각도에서 측정된 난반사광의 광속비를 측정 매개변수로 사용하는 방법이다. 이 방법은 표면 연소 감지에는 효과적이거나 일반적으로 분해능이 낮아서 표면 거칠기 측정용으로는 부적합하다. Fig. 4에서 보인 산란각의 분포를 이용한 방법은 광산란에 의한 광속의 분포를 이용한 것으로 광속 분포 자체와 분포의 편차 등을 측정매개변수로 표면 거칠기를 산출한다^[4]. 이 방법은 표면 특성에 따라 편차를 보이므로 실제 적용에는 어려움이 있다.

Fig. 5는 산란광을 이용한 방법들을 병합하는 차원에서 정반사광의 광속과 난반사광의 광속비를 이용한 것으로 그 성능이 검증된바 있는^[12] 표면 거칠기 측정 센서의 구성도를 보인 것이다. 입사광속과 반사광속 그리고 구경을 달리한 렌즈로 집중되어 얻어진 또 다른 반사광속을 측정하여 이들 간의 관계로부터 측정매개변수인 광속비(Flux Ratio)를 얻는다. 반사광속을 입사광속으로 나누어서 얻어지는 광속비를 FR_1 으로 표현하고, 표면 반사에 의한 2개의 산란 광속비를 FR_2 로 표현하였다. Fig. 6은

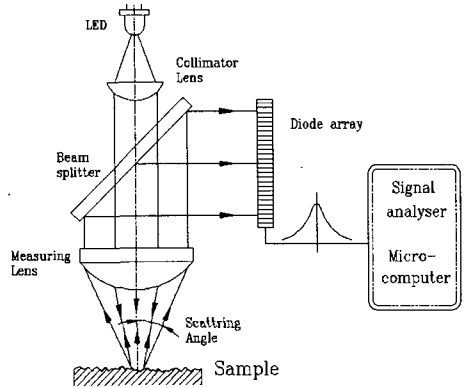


Fig. 2 Principle of light scattering sensor by small mirror facet model

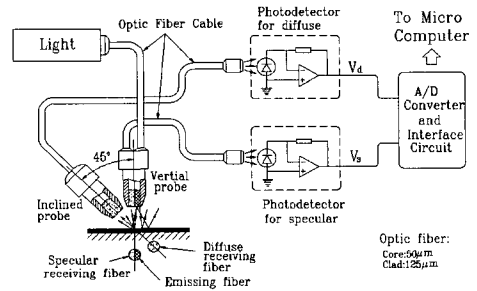


Fig. 3 Schematic diagram of fiber optical roughness sensor

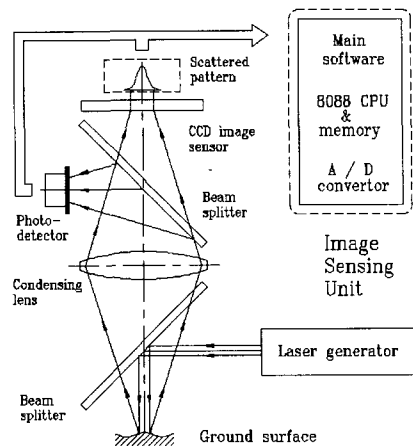


Fig. 4 Schematic diagram of roughness sensor by using scattered light pattern

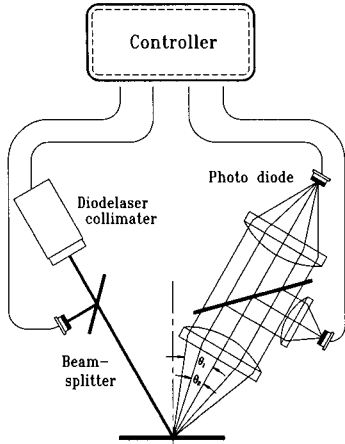


Fig. 5 Schematic of the sensor using the flux of scattered lights



Fig. 6 The sensor and controller unit

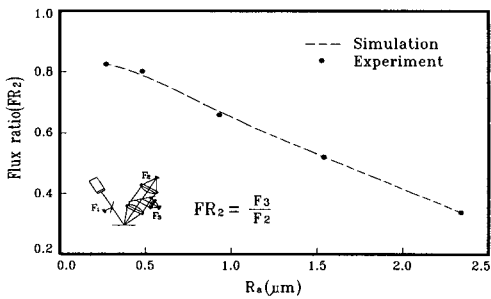


Fig. 7 Measured flux ratio FR_2 with respect to surface roughness (standard samples)

개발된 측정센서와 제어장치를 보인 것이다. Fig. 7은 표준시편의 R_a 와 광속비 FR_2 의 관계를 나타낸 것으로서 센서는 비교적 고운 표면에서 감도가 좋고 넓은 범위에서 충분한 변별력을 가지고 있다. FR_1 은 표면의 반사율에 의존하므로 연삭 표면의 이상 상태인 표면 연소 등을 감지하는 데 효과가

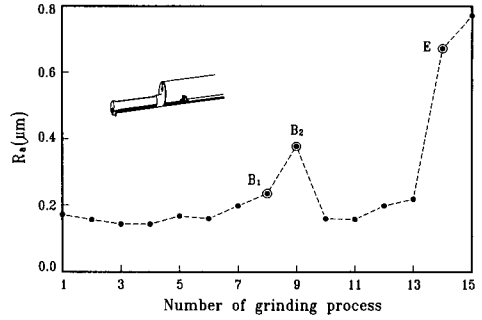


Fig. 8 Surface roughness R_a averaged over the ground surface

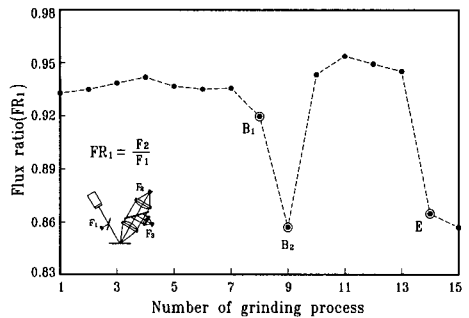


Fig. 9 Flux ratio FR_1 averaged over the ground surface

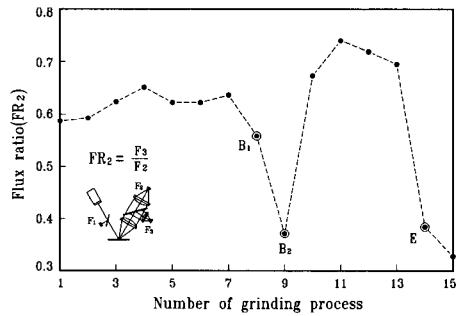


Fig. 10 Flux ratio FR_2 averaged over the ground surface

있어서 연삭 공정 감시에 유용하게 활용될 수 있다. FR_2 는 측정장치나 외부변동 조건 등에 무관하므로 표면 거칠기 측정에 보다 효과적이다.

표면 거칠기의 경우 가공물 표면 특정 점에서의 값을 그 표면에 대한 대표 값으로 인정하기에는 어려움이 있다. 따라서 가능한 여러 곳에서 측정하여

통계적인 처리를 통해 가공 표면의 대표적인 표면 거칠기 값을 얻는 것이 바람직하다. 측정값의 평균을 고려할 경우 연삭 표면에 대해 여러 위치에서 표면 거칠기를 측정해야 하는 데 개발된 표면 거칠기 센서를 사용할 경우 측정식에 비해 측정 시간을 현저히 단축할 수 있다. 또한 동일한 제품을 생산하는 연삭 공정에서 표면 거칠기는 정량적인 값보다 경향성이 더 중요시될 수 있다. 그러므로 개발된 센서는 반복되는 연삭 공정에서 가공물의 표면을 감시하고자할 경우 효율적으로 사용될 수 있다.

Fig. 8은 연삭 공정이 진행되면서 가공 면의 여러 위치에서 측정식으로 측정된 것을 평균하여 나타낸 것이다. 초기 연삭 시점으로부터 비교적 일정하게 유지되던 것이 가공이 진행되면서 증가하는 것을 볼 수 있다. B1점은 부분적으로 약한 표면 연삭 상태의 값이고, B2점은 표면 연삭이 아주 심한 것을 반영한다. E점은 연삭 스톨의 입자가 완전히 탈락되고 있을 때 측정된 표면 거칠기 값이다. Fig. 9와 10은 Fig. 8과 동일한 조건에서 측정된 광속비 FR_1 과 FR_2 의 변화를 나타낸 것으로서 표면의 상태 변화를 잘 반영하고 있다.

2.2 기상에서의 진직도 측정

고정밀 제품에서 진직도는 중요한 평가 항목이 될 수 있다. 대체로 작은 공작물의 경우 3차원 측정기와 같은 별도의 측정 설비에서 측정되고 있으나 측정영역의 제한이 있고 이송계 자체의 오차가 개입될 수 있다. 또한 슬라이드 레일(Slide Rail)과 같이 길이가 긴 가공물의 경우는 제품 전체에 대한 진직도 측정이 곤란하여 가공정도에 그 정밀도를 의존하고 있는 실정이다. 한편, 이송계 자체의 진직도 오차는 가공 정밀도에 영향을 미치므로 평가 및 보정이 필요하다. 이송계의 진직도 측정에 있어서 빛의 간섭방식을 많이 이용하고 있는데 이 방법은 측정 장비가 고가이고 측정 장비에 대한 숙련된 기능을 요구하고 있다. 참고문헌^[14]에서는 직접법을 이용하여 이송계의 진직도 측정방법을 소개하고 있는데 용량형 센서(Capacitive Type Sensor)로 피측정물을 측정하여 이송계의 운동오차를 제거함으로써 이송계의 진직도 오차를 정밀하게 측정하고 하고 있다. 그러나 이 방법의 경우 정밀한 측정은 가능하나 참조 면을 요구하므로 기상측정에는 구조상 어려움이 있다.

본고에서는 측정 영역에 크게 제한이 없고 기상

측정에 적합하도록 구성된 측정(Stylus) 및 광학계를 이용한 진직도 측정 장치를 설명하고자 한다^[15].

Fig. 11은 진직도 측정 개념도로서 측정물 위에 변위 센서가 부착된 측침이 위치한다. 이때 작은 직경을 갖는 레이저광이 변위 센서에 입사되고 측침이 측정물 표면을 이동함에 따라 진직 오차에 의해 수직 변위가 발생하게 되는데 레이저광은 고정되어 있으므로 변위 센서에서의 광 감지 위치가 변하게 된다. 따라서 변위 센서의 출력 변화에 의해 가공물의 진직도 오차를 측정할 수 있다. Fig. 12는 진직도 측정 장치의 구성을 나타낸 것이다. 측침(작은 강구) 위에 수직 변위 피드백용으로 사용된 역반사계가 부착되어 있다. 이러한 탐침부는 소형 이송장치에 의해 측정물 표면을 이동한다. 그러므로 기상에서 가공물 위에 탐침부를 놓고 진직도를 측정할 수 있다. 역반사계에 입사된 레이저광이 수직 변위 정보를 포함하여 되돌아오는 경로에 정당한 배율을 갖는 오목렌즈(Concave Lens)를 두어 진직도 오차를 확대하고 CCD로 측정한다. 측정장치의 정밀도는 레이저광의 직경을 충분히 줄이고 오목렌즈와 CCD 사이의 거리를 조절하는 것에 의해 결정할 수 있다. Fig. 13은 개발된 진직도 측정장치를 보인 것이다.

한편, 측정물의 진직도 오차 정보를 피드백 할 목적으로 사용된 역반사계는 항상 입사 광 축과 되돌아오는 광 축이 2차원 평행을 이루도록 고안되었다. 역반사계의 특성에 의해 광의 입사 축과 반사

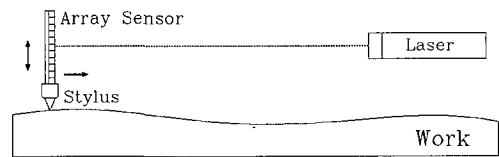


Fig. 11 Conceptual diagram of the straightness measurement system

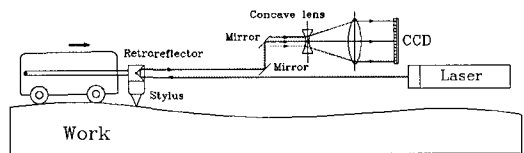


Fig. 12 Schematic of the straightness measurement system



Fig. 13 The developed straightness measurement system

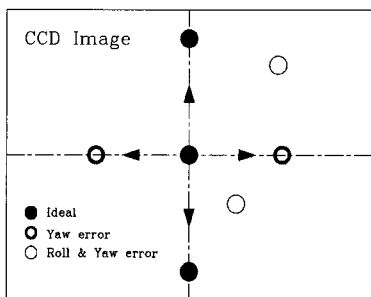


Fig. 14 Variation of measured image due to various errors

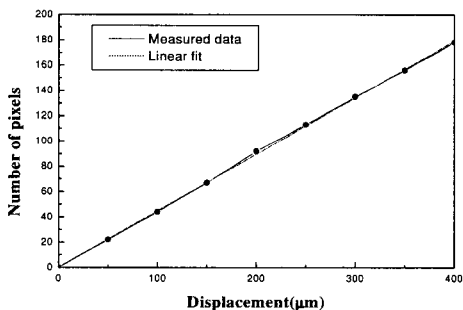


Fig. 15 Sensitivity of the developed straightness measurement system

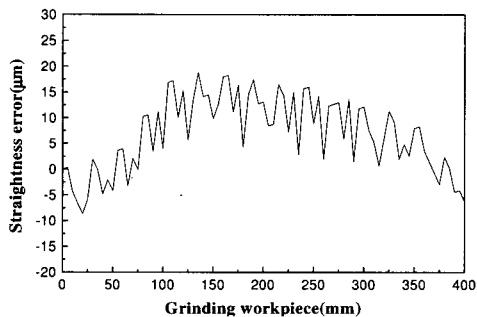


Fig. 16 Measured straightness error for the grinding workpiece

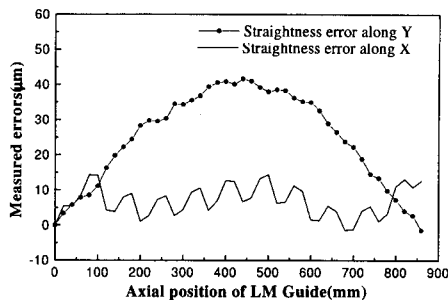


Fig. 17 Measured straightness errors for a linear motion(LM) guide unit

축간의 거리는 역반사계 정점에서의 회전에 영향을 받지 않으며, 역반사계의 수직 변화에 영향을 받는다. 또 역반사계의 수직 정렬 오차는 피드백 광에 영향을 주지 않으며 피드백 광은 실제 수직 변위를 2배 증폭하는 효과가 있다. Fig. 14는 측정시에 예상되는 CCD 영상의 중심점 변화를 나타낸 것으로서 이상적일 경우 영상의 중심은 수직선상에 나타나고, 순수한 Yaw만 있을 경우는 수평선상에 나타난다. 측정된 대부분의 영상은 공작물의 진직도 오차와 이송장치의 Yaw, Pitch, Roll 그리고 측정 장치의 정렬 오차 등이 혼합되어 나타나므로 사사분면에 위치하게 된다^[15]. Fig. 15는 진직도 측정 시스템의 감도를 나타낸 것이다. Fig. 16은 임의의 연삭 가공물에 대해 진직도를 측정한 결과이며, Fig. 17은 상용 LM 유닛의 진직도 오차를 측정된 결과이다. CCD 카메라는 2차원 측정이 가능하므로 동시에 두 방향의 진직도 오차를 측정할 수 있다.

2.3 공작물의 단차 측정

연삭 가공 전의 공작물은 가공 여유를 가지고 있으며, 공작물의 위치에 따라 차이를 보이는 것이 일반적이다. 그러므로 초기 연삭을 수행할 때 숫돌과 공작물의 거리를 알 수 없고 공작물의 부정확한 가공여유로 인하여 작업자는 연삭 숫돌을 가공물 근처에 위치시킨 후 공 연삭에 들어간다. 이는 작업시간을 늘리게 되어 생산성 저하로 이어지는데 연삭 초기에 공작물의 위치를 측정할 수 있다면 숫돌을 공작물의 가장 높은 위치로 이동하여 곧바로 가공을 수행할 수 있을 것이다. 또한 LM 블록과 같은 소형의 공작물은 여러 개가 동시에 연삭 테이블에 올려져서 가공이 이루어진다. 그러나 각 공작물은 다소의 높이 차를 가지므로 초기 측정에 의해

가장 높은 지점을 기준으로 연삭 가공이 이루어지는 것이 바람직하다.

거리를 측정하는 센서는 여러 종류가 있으나 공작물의 크기 변화를 어느 정도 무시할 수 있고 정밀 이송장치가 필요 없는 레이저 변위 센서가 가장 효율적인 것이다. Fig. 18은 삼각법을 이용한 레이저 변위 센서를 사용하여 공작물의 초기 높이를 측정하는 방법을 보인 것이다. Fig. 19는 연삭 테이블 위에 놓인 여러 개의 LM 블록을 놓고 단차를 측정한 결과인데 중간에 놓인 블록이 스톤과 가장 짧은 거리를 유지하므로 측정된 거리 정보를 활용할 경우 공 연삭 시간을 줄일 수 있다.

3. 연삭 스톤 기상 측정

3.1 연삭 스톤 기상 측정의 필요성 및 방법

연삭 스톤의 오차는 가공오차의 직접적인 원인이 되므로 반드시 측정되고 보정되어야 한다. 연삭 스톤의 오차를 보면 스톤 형상 자체의 직경이나 폭의 오차가 있고 결합상태에 따라 회전오차를 갖는다. 또한 가공에 의한 스톤 마모 등을 들 수 있다. 스톤 장착 오차는 초기 트루잉/드레싱에 의해 어느 정도 보정이 가능하나 주축의 회전오차나 드레싱 장치 등의 오차 개입으로 스톤의 진원오차나 기울어짐 등이 발생할 수 있다. 회전오차가 있을 때 연삭은 스톤의 겉보기 직경(Apparent Diameter)으로 이루어지므로 가공 정밀도에 영향을 미치게 된다. 가공 중에 발생하는 스톤의 마모 또한 가공 정밀도를 저하시키는 요인이 된다.

이러한 스톤 오차에 의한 가공오차를 줄이기 위해 많은 연구가 이루어지고 있는데 Brinksmeier 등은 삼각법을 이용한 레이저 변위 센서를 사용하여 절인(Cutting Edge)의 마모를 측정함과 동시에 측정방향으로의 스톤 형상의 변화와 회전오차 그리고 스톤의 타원정도를 측정하는 방법을 제시하고 있다^[7]. Gotou 와 Touge은 연삭 스톤 표면에 레이저광을 입사시키고 반사되는 광의 강도를 측정하여 절인의 위치 및 마모를 측정하고 있다^[8]. 또한, 垣野義昭, 松原 厚 등은 광 측정법을 스톤 표면에 적용하여 연삭 가공에 따른 절인의 밀도 변화를 측정하는 방법을 보이고 있다^[9]. 後藤英, 峠睦 등은 영상 처리 기법으로 절인의 마모를 측정하고 있는데 측정된 영상을 이진화 하여 건조 상태의 절인과 연삭 유가 묻어 있을 때의 절인을 비교하여 연삭 가공

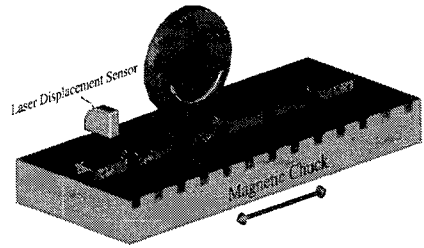


Fig. 18 Setup for determining the initial position of grinding wheel

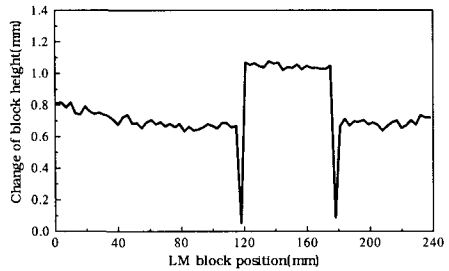


Fig. 19 height of LM blocks

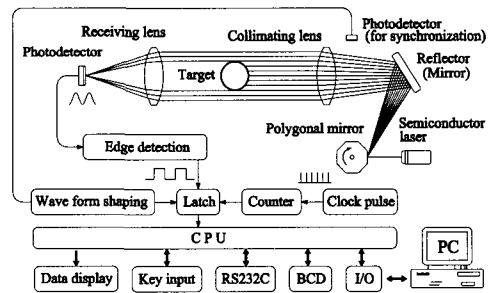


Fig. 20 Schematic for principle of laser scanning micrometer (LSM)

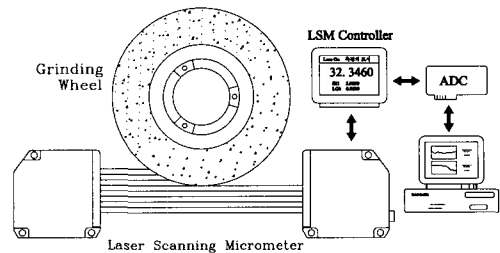


Fig. 21 Schematic diagram for measurement of wheel wear by using the LSM

진행에 따른 절인 밀도변화를 측정하는 방법을 보이고 있다^[20]. 김선호, 안중환은 잦은 드레싱에 의한 비 가공 시간을 줄일 목적으로 삼각법을 이용한 레이저 변위 센서와 와전류 센서(Eddy Current Sensor)를 연삭 스톨 표면 측정에 적용하여 드레싱 시기 및 드레싱량을 결정하는 방법을 보이고 있다^[21].

Fig. 20은 연삭기에 장착하여 연삭 스톨의 오차를 효과적으로 측정할 수 있는 레이저 스캔 마이크로미터(LSM)의 측정원리를 나타낸 것이다. 반도체 레이저(Laser Diode)에서 발생된 레이저빔이 다면경(Polygon Mirror)에서 반사되고 환원 렌즈(Collimation Lens)에 의해 평행 광으로 된다. 평행 광은 측정 영역을 지나 수광부에 위치한 집속렌즈에 의해 광 다이오드(Photodetector)에 모아진다. 회전하는 다면경의 한 면에 대해서 한번의 스캔이 일어나며, 측정물에 의해 스캔광의 일부가 가로막힘으로 인해 변화되는 광다이오드 신호와 스캐닝이 시작되는 시점, 그리고 레이저빔의 스캐닝 속도를 이용하여 물체의 끝점을 알 수 있다^[22].

3.2 연삭 스톨 마모 모니터링

연삭은 스톨 입자와 공작물의 상호작용에 의해 절삭되므로 스톨 표면 상태는 가공 정밀도와 밀접한 관계를 갖는다. 비교적 공구의 마모 정도가 빠르게 진행되는 연삭에서 스톨 마모측정은 가공 정밀도 향상을 위한 정보로 활용될 수 있다.

Fig. 21은 LSM을 이용하여 연삭 스톨의 마모 모니터링을 위한 측정장치의 구성도를 보인 것이다. Fig. 22는 연삭 스톨 마모 측정 장치를 이용하여 LM 가이드 성형 연삭 스톨을 드레싱 한 후 측정 방향으로 이동하면서 측정된 것을 보인 것인데 연삭 스톨의 형상이 그대로 재현됨을 알 수 있다.

Fig. 23은 절입량 10 μ m로 가공한 임의의 플런지 연삭에서 스톨 형상을 축방향에 대해서 나타낸 것이다. 축방향 7mm이후는 연삭 시에 접촉되지 않은 스톨면을 의미한다. 연삭이 진행됨에 따라 스톨 마모 정도가 잘 나타나고 있는데 이 마모량은 실제 가공물 정밀도에 관계하므로 보정될 필요가 있다.

Fig. 24는 Fig. 23을 높이-빈도수 히스토그램으로 나타낸 것인데 기준면에서 중앙으로 집중되고 비교적 안정적인 형태를 유지하는 반면, 연삭이 진행되면서 산포되는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 히스토그램이 넓은 영역으로 산포되면 표면 거칠기는 상대적으로 크게 됨을 예측할 수 있다.

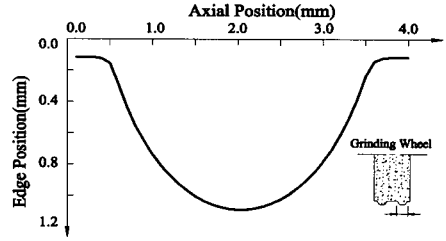


Fig. 22 Measured shape of profiled grinding wheel

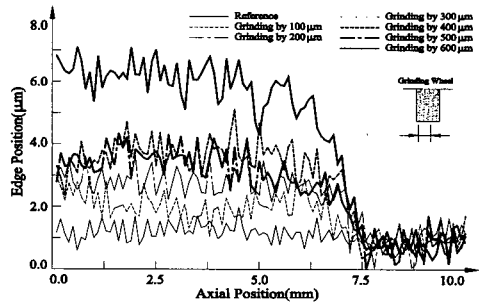


Fig. 23 Wear of grinding wheel in surface plunge grinding process

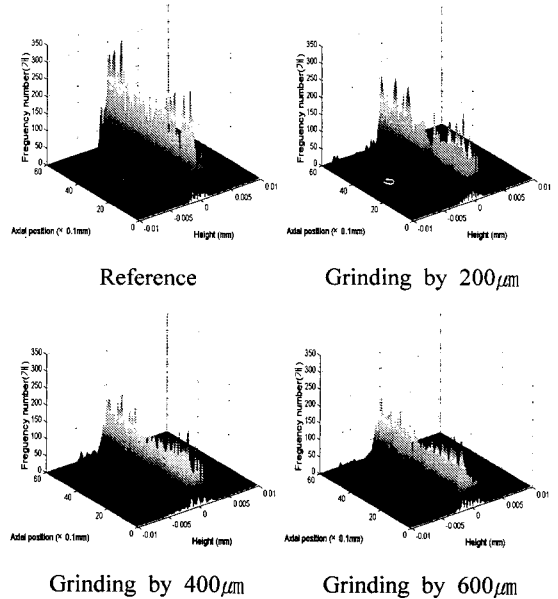


Fig. 24 Change in histogram of grinding wheel prominence along axial direction due to grinding wheel wear in surface plunge grinding process

3.3 연삭 스톨 직경 및 회전 오차 측정

연삭 스톨 자체의 오차는 가공에 있어서 직접적인 오차성분이 되므로 반드시 측정해야함은 물론 기계 위에 탑재할 수 있는 간접한 측정 장비가 요구된다. 그러므로 LSM은 연삭 주축 및 스톨의 오차 측정에 적합한 장비로 판단된다. LSM은 한 개의 제어기에 4개의 측정 헤드를 사용할 수 있으므로 연삭 스톨의 직경이 클 경우 2개의 헤드를 이용할 수 있다. 스톨의 회전오차 정보는 과도한 트루잉을 방지하고 연삭 스톨의 겉보기 직경을 결정하여 결합불량에 의한 가공오차를 줄이는데 사용될 수 있다. 또한, 측정된 연삭 스톨의 직경은 가공 정보나 트루잉/드레싱장치에 대한 적절한 절입량을 결정하는데 사용될 수 있다^[23]. Fig. 25는 내면 연삭이나 연삭 센터에서 사용되는 비교적 작은 직경을 갖는 연삭 스톨에서 오차성분을 나타낸 것이며, Fig. 26은 평면 및 외경 연삭기에서 사용되는 스톨의 오차성분을 나타낸 것이다. 예상되는 오차로는 주축과 연삭 스톨간의 편심(Offset Misalignment)에 의한 오차와 각 어긋남(Angular Misalignment)에 기인한 회전속도 동조성분 등이 있다.

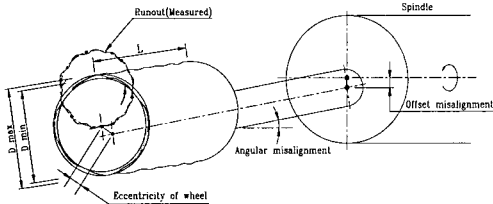


Fig. 25 Conceptual diagram of runout errors in grinding wheel

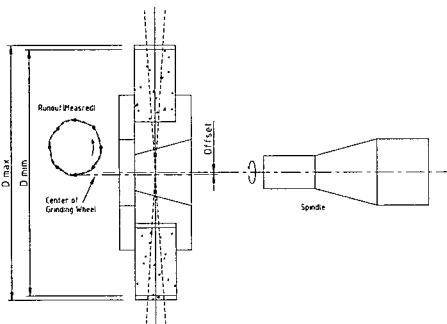


Fig. 26 Conceptual diagram of errors in grinding wheel assembly

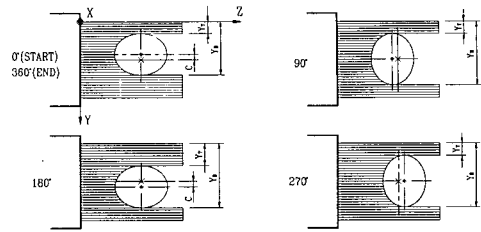


Fig. 27 Non-contact measurement of grinding wheel error by using the LSM

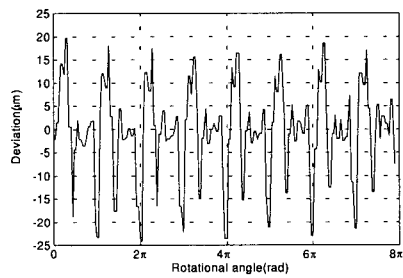


Fig. 28 Variation of measured diameter with respect to rotational angle

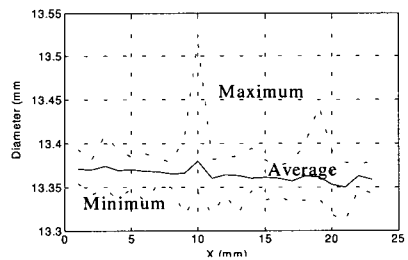


Fig. 29 Diameters measured over various axial position

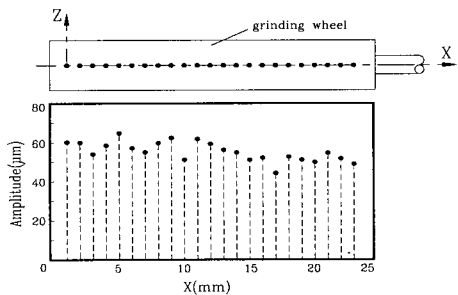


Fig. 30 Error component synchronous to rotational speed residing in runout

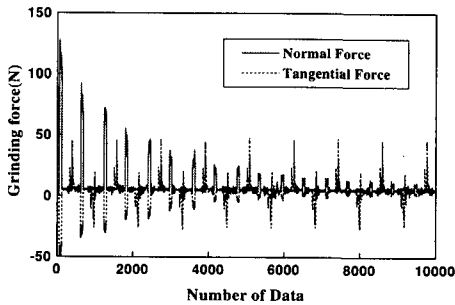


Fig. 31 Change of grinding force after once depth of cut

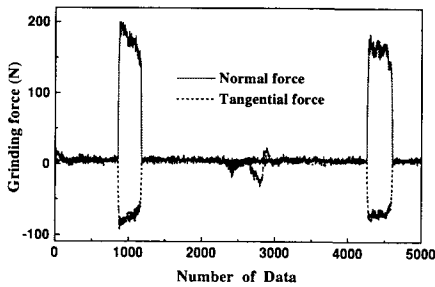


Fig. 32 Grinding force for one cycle of table

Fig. 27은 LSM을 이용할 경우 연삭 슷돌 오차 측정 방법을 개념적으로 보인 것이다. 진원이 아닌 연삭 슷돌이 저속으로 회전할 때 슷돌의 직경은 두 끝점의 차로 정의되고 회전각에 따른 직경의 변화를 측정할 수 있다. 슷돌의 회전오차는 두 끝점을 평균하여 회전 중심을 계산하는 것으로서 얻어진다. 이는 슷돌 자체의 기하학적 중심과 회전 중심의 차이에 의한 성분과 결합 오차 등에 의한 회전 오차에 영향을 받는다. 또한 두 끝점의 위치로부터 실제 공작물과 접촉하게 되는 위치와 겹보기 직경을 구할 수 있다. Fig. 28은 회전각 변화에 따른 연삭 슷돌의 직경 변화를 4회전 동안 측정한 것으로서 1회전에 2번 주기로 변화됨을 알 수 있다. Fig. 29는 연삭 슷돌의 축방향으로 직경의 최대치와 최소치를 보인 것이며, Fig. 30은 회전오차 변화를 회전속도와 동조되는 성분만 보인 것인데 이러한 회전 오차는 기하중심의 어긋남과 축 편심, 각 어긋남에 기인한 것으로 생각할 수 있다. 축 방향으로의 큰 변화는 없어서 각 어긋남은 크지 않으나 축 편심이 매우 크게 나타나고 있다.

4. 연삭력 측정

연삭에서 필연적으로 발생하는 연삭력은 슷돌의 종류나 공작물의 종류, 절입량, 횡 이송량 그리고 연삭유 등의 연삭 조건에 영향을 받는다^[6]. 또한 연삭력은 가공 중에 슷돌 입자의 마모나 탈락에 의해 변화될 수 있다. 과도한 연삭력은 연삭기의 내구성을 떨어뜨리고 표면 연소나 표면 거칠기를 크게 하여 제품의 질을 떨어뜨리는 원인이 되므로 적절한 수준에서 유지되는 것이 바람직하다.

연삭력을 측정하는 방법으로는 주축 모터의 전류나 소모전력을 이용한 방법과 같은 간접 측정 방법들이 있으나 직접적인 방법으로 힘 센서를 많이 사용하고 있다. 단품을 생산하는 연삭 공정에서는 한 사이클에 대해서 연삭력을 측정하여 연삭 조건을 설정하는 것이 가능하므로 계속적으로 측정할 필요는 없을 것이다. Fig. 31은 공구 동력계를 이용하여 평면 플런지 연삭에서 한번의 절입만을 주고 가공하여 테이블을 왕복 시켜서 측정한 연삭력의 변화를 보인 것이다. 접선력보다 법선력이 더 크게 나타나고 있으며, 테이블이 수 회 왕복하는 동안 연삭력이 잔존함을 알 수 있다. Fig. 32는 연속적인 일정 절입량으로 가공하여 측정한 연삭력을 연삭 테이블이 1회 왕복하는 동안의 것을 나타낸 것이다. 하향연삭(Down-grinding)을 먼저 하였는데 상향연삭(Up-grinding) 보다는 하향연삭에서 더 큰 연삭력을 보인다.

5. 요약

본고에서는 고정도 제품을 생산하는 연삭기에 대해 가공물 및 연삭 공구인 연삭 슷돌을 기상에서 측정하기 위한 여러 가지 방법들을 소개하였고 일부의 적용 예를 기술하였다. 소개된 기상 측정 장치들은 특히 반복 공정이 필요한 연삭 현장에서 생산성 향상을 위해 유용하게 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 관련 연구가 지속된다면 연삭기의 작업조건 자동 설정, 연삭 상태 진단 등, 연삭기의 지능화에도 적극적으로 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Sherrington, I. and Smith, E. H., "Modern Measurement Techniques in Surface Metrology: Part II: optical instruments," *Wear*, Vol. 125, pp. 289-308, 1988.
2. Brodmann, R. and Thurn, G., "Roughness Measurement of Ground, Turned and Shot Peened Surfaces by the Light Scattering Method," *Wear*, Vol. 109, pp. 1-13, 1986.
3. 塚田忠夫, 谷村吉久, 非接觸式による精密加工表面の性状評價 : 基礎と光學方式の應用, 日本精機學會 光を用いた工學表面の性状評價分科會, 1985.
4. Yim, D.Y. and Kim, S.W., "Optical Roughness Measurement of Ground Surfaces by Light Scattering," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 30, No. 2, pp. 283-289, 1990.
5. Shiraishi, M., "A Consideration of Surface Roughness Measurement by Optical Method," *Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol. 109, pp. 100-105, 1987.
6. Church, E.L., "The Measurement of Surface Texture and Topography by Differential Light Scattering," *Wear*, Vol. 57, pp. 93-105, 1979.
7. Tanner, L.H. and Fahoum, M., "A Study of the Surface Parameters of Ground and Lapped Metal Surfaces using Specular and Diffuse Reflection of Laser Light," *Wear*, Vol. 36, pp. 299-316, 1979.
8. Teague, E.C., Vorburger, T.V. and Maystre, D., "Light-Scattering from Manufactured Surfaces," *Annals of the CIRP*, Vol. 30, No. 2, pp. 563-569, 1981.
9. Bennett, H.E., "Scattering Characteristics of Optical Materials," *Optics Engineering*, Vol. 17, pp. 480-488, 1978.
10. Beckmann, P. and Spizzichino, A., *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*, Pergamon press, Oxford, 1963.
11. 김승우, "반도체 생산에서 초정밀 길이 측정," 대한기계학회지, 제33권 제2호, pp. 152-160, 1993.
12. 김현수, 홍성욱, "기상(機上) 측정을 위한 광학 적 표면 거칠기 측정센서 개발," 한국정밀공학회지, 제11권 제6호, pp. 168-178, 1994.
13. 김현수, 홍성욱, "기상에서의 표면 거칠기 측정에 의한 연삭 공정 모니터링," 한국정밀공학회지, 제16권 제1호, pp.167-173, 1999.
14. 박천홍, 정재훈, 김수태, 이후상, "서브미크론 진직도 측정장치 개발," 한국정밀공학회지, 제17권 제5호, pp. 124-130, 2000.
15. 김현수, 조명동, 장문주, 홍성욱, 박천홍, "평면 공작물의 진직도 측정 시스템 개발," 한국정밀 공학회 춘계학술대회, 전남대학교, 2001.
16. Malkin, S., *Grinding Technology : Theory and Application of Machining with Abrasives*, John Wiley & Sons, pp. 197-221, 1988.
17. Brinksmeier, E. and Werner, F., "Monitoring of Grinding Wheel Wear," *Annals of the CIRP*, Vol. 41, No. 1, pp. 373-376, 1992.
18. Gotou, E. and Touge, M., "Monitoring of Wear of Abrasive Grains," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 62, pp. 408-414, 1996.
19. 垣野義昭, 松原 厚, 山路伊和夫, 松田健嗣, 中用平三郎, 廣垣俊樹, 菅田義宏, "砥石作業面トポグラフィのオン・ザ・マシン計測に関する研究(第1報) : レーザスタイラスを用いた計測システムの開発," 精密工學會誌, Vol. 63, No. 2, pp. 228-232, 1997.
20. 後藤英, 峠陸, 大淵慶史, "砥粒摩耗のインプロセス測定(第3報) : 濕式條件下で取り込まれた畫像の評価," 精密工學會誌, Vol. 62, No. 9, pp.1320-1324, 1996.
21. 김선호, 안중환, "연삭가공에 있어 비가공 시간 단축에 관한 연구(II) : 슷돌면의 직접관찰에 의한 드레싱 시기 및 드레싱량 결정," 한국정밀공학회지, 제14권 제8호, pp. 101-107, 1997.
22. Ju, K.H., Kim, H.S., Hong, S.W. and Park, C.H., "Monitoring of Grinding Wheel Wear in Surface Grinding Process by Using Laser Scanning Micrometer," *International Journal of KSPE*, Vol. 2, No. 1, pp. 81-86, April 2001.
23. 홍성욱, 남경모, 김현수, "연삭 슷돌 직경 및 회전오차의 비접촉 측정방법," 한국정밀공학회지, 제12권 제13호, pp. 175-181, 1995.