

기상에서의 표면 거칠기 측정에 의한 연삭 공정 모니터링

김현수*, 홍성욱**

Monitoring of Grinding Processes by Using On-the-machine Measurement of Surface Roughness

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

ABSTRACT

This paper presents results of monitoring grinding processes with on-the-machine measurement of surface roughness by using flux ratios of scattered lights. A compact, on-the-machine surface roughness sensor, which consists of a diodelaser and several optic units, is developed. The control unit is also developed. The developed sensor together with the controller is applied for monitoring grinding processes of two different grinding machines. Experimental results show that the flux ratios and their standard deviations measured by the developed sensor over the entire ground surface are useful for monitoring grinding conditions. In particular, the sensor and the control unit are proved to be useful for monitoring grinding processes in order to detect abnormal grinding conditions and dressing time.

Key Words : Monitoring of grinding process(연삭 공정 모니터링), On-the-machine measurement(기상 계측), Surface roughness(표면 거칠기), Light flux ratio(광속비)

1. 서론

연삭 공정에서의 정밀도는 제품의 질을 결정하는 중요한 요소가 되며 연삭 표면의 정밀도를 평가하기 위해 일반적으로 표면 거칠기를 측정하고 있다. 표면 거칠기 측정은 보편적으로 연삭 공정 종료 후 시행하여 제품에 대한 합격·불합격 판정만을 하고 불합격품은 폐기하거나 재가공에 들어간다. 따라서 연삭 가공물을 연삭기에서 이탈시키지 않고 표면을 측정할 수 있는 기상(On-the-machine)측정과 가공 중 측정의 필요성이 꾸준히 제기되어 왔으며 많은 연구가 계속되어 왔다^{1),2)}. 가공 중 공작물의 표면 거칠기 측정은 원리와 구조 그리고 설계 상 많은 제약을 받으나 생산성을 향상시키는 장점을 가지고 있다. 그러나 기존에 사용되고 있는 촉침식(Stylus)은 접촉식이므로

표면에 대해서 국부적으로 정확한 측정과 단면 곡선을 재현할 수는 있으나 긴 측정 시간이 요구되고 특히 재질이 연한 가공물의 경우 표면에 결함을 남기는 단점이 있다. 또, 가공 중에 발생할 수 있는 진동이나 연삭 눌음(Burning) 같은 표면 이상 정보는 감지할 수가 없어서 가공 중 연삭 공정을 모니터링하기에는 부적합하다. 이와 같은 문제점을 극복하기 위해 비접촉 측정이 가능한 많은 광학적 방법이 개발되었으며¹⁾ 그 중에서도 측정 장치 구성의 간편성이나 효율성을 고려할 때 광산란법이 기상 계측에 가장 적합한 방법으로 평가되고 있다.¹⁾⁻³⁾

본 연구에서는 연삭 공정 모니터링을 위해 표면 거칠기의 기상 계측을 목적으로 개발된 광속비 측정 방식을 이용하였다. 이 방법은 이론적인 검토와 실험을 통해 구현하기 쉽고 정규 분포 표면에

* 회원, 금오공과대학교 대학원

** 회원, 금오공과대학교 기계공학부

대해 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있음이 확인된바 있다.¹⁴⁻⁶⁾ 광속비 측정 방식을 활용하여 실용화가 가능한 기상 계측용 표면 거칠기 측정 센서를 개발하였으며, 실제 평면 연삭 공정에서의 표면 거칠기 기상 계측에 의한 연삭 공정 모니터링에 적용하였다. 센서의 제작은 활용성을 높일 수 있도록 간결하게 구성하였다. 이론 및 실험으로부터 얻어진 적당한 입사각(20°)에서 광원을 고정시켜 표면 거칠기 영역에서의 범용성을 확보하도록 하였다. 또한, 센서를 효율적으로 운용하기 위하여 센서 제어 장치를 병행하여 개발하였다.

개발된 센서를 범용 평면 연삭기 및 연삭 센터에서의 연삭 공정 모니터링에 시험 적용하였다. 연삭 공정을 모니터링 하는데 있어 제작된 센서와 제어장치는 기상에서 짧은 시간내의 측정을 가능하게 한다. 또, 기존의 측정 장비에 비해 월등히 저렴하게 제작이 가능하므로 연삭 공정 모니터링에 효과적으로 활용이 가능할 것으로 기대된다. 연삭 공정 모니터링 실험 결과, 개발된 측정 센서가 표면 거칠기 측정은 물론, 드레싱이 필요한 시기나 연삭 늪음 등 표면 상태의 변화를 효과적으로 감지할 수 있었다. 개발 센서와의 비교를 위해 측정 방식의 측정도 병행하였는데 유사한 경향을 확인할 수 있었다. 또한 실험을 통해 연삭 공정 모니터링을 위해서는 가공 표면 전체에 대해 여러 위치에서 표면 거칠기 값을 측정하여 그 표면 거칠기 평균값을 이용하는 것이 바람직하며 이때, 표면 거칠기의 표준편차도 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다.

2. 측정 시스템의 개발

2.1 산란 광속 측정에 의한 표면 거칠기 측정 방법

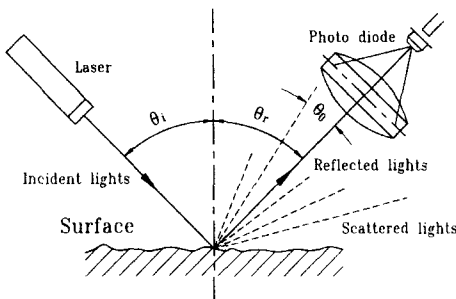


Fig. 1 The conceptual diagram for measurement of flux of scattered light

Fig. 1은 산란 광속을 측정하기 위한 기본 개념을 설명하고 있다. 표면에 입사된 광은 표면의 형상으로 인해 산란되는데 표면이 고올수록 정반사 방향(Specularly reflected direction)으로 집중되고 표면이 거칠수록 난반사 방향(Diffusely reflected direction)으로 분산된다. 이때 정반사 방향에 집광 렌즈를 두면 렌즈의 유효 수광각(θ_0)안으로 반사하는 광은 렌즈를 통해 집중되어 광속(Light flux)을 측정하게 된다. 이때 렌즈에 포착되는 반사광을 적분하는 효과가 있으므로 장치나 표면의 미소한 변화 등 기계적인 오차에 둔감한 특성을 갖게 된다.¹⁴⁾

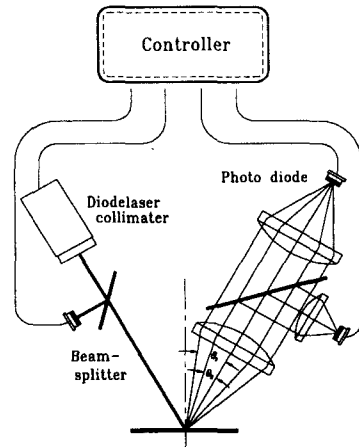


Fig. 2 The schematic diagram for the sensor unit

Fig. 2는 사용된 광속비 측정 방식을 보여 주고 있다. 다이오드 레이저 광원 앞에 광 분할기를 두어 분할된 입사광의 일부를 집중하여 입사 광속을 측정한다. 수광부에서는 표면에서 산란된 광을 크기가 같은 두 개의 평면-볼록 렌즈로 집중하여 반사 광속을 얻는다. 또한, 수광부의 두 렌즈 사이에 광 분할기를 두어 반사 광속을 분할하고 구경을 달리하는 평면-볼록 렌즈로 집중하여 또 다른 반사 광속을 측정한다. 구경이 서로 다른 두 수광 렌즈의 유효 수광각은 θ_1, θ_2 로 표시되어 있다. 이렇게 하여 입사 광속과 구경을 달리하는 2개의 산란 광속을 측정하여 이들간의 관계로부터 측정 매개 변수인 광속비(Flux ratio)를 얻을 수 있다. 반사 광속을 입사 광속으로 나누어서 얻어지는 광속비를 FR_1 으로 표현하고, 정반사 방향에 놓인 서로 다른 구경을 갖는 렌즈를 통해 집중한 광속간의 비를 FR_2 로 표현한다.

광속비 FR_1 은 입사 광속에 무관하지만 측정

장치나 외적인 조건의 영향으로 광속비와 표면 거칠기 관계를 표면 반사율 등에 따라 보정을 해야 하므로 일반적인 측정에는 다소의 문제점을 가진다. 그러나 동일 공정에서는 문제가 되지 않으며 특히 표면의 반사율에 크게 의존하므로 연삭 표면의 이상 상태인 연삭 높음 등을 감지하는 데에는 오히려 효과가 있어서 연삭 공정 감시에 유용하게 활용될 수 있다. 한편, FR_2 는 측정장치나 외부 변동 조건 등에 무관하므로 표면 거칠기 측정에 보다 효과적일 수 있다⁴⁾. 그러나 이 경우에도 측정 매개 변수가 표면 거칠기에 간접적으로 대응되므로 표면 거칠기를 얻고자 할 때에는 최소 2개의 실제 측정된 값으로 보정하여야 한다. 그러나 연삭 공정 모니터링 등, 정량적인 표면 거칠기 값보다는 경향성이 중요한 경우에는 보정 없이 광속비를 직접 활용할 수 있다. 광속비 FR_2 는 표면이 극단적인 경우로서 표면 거칠기가 0일 때 1이 되고, 표면이 아주 거친 경우에는 두 렌즈의 구경 비로 나타난다. 따라서 측정하고자 하는 표면 거칠기 영역에 따라 구경 비의 설정에 따른 감도의 차이를 얻을 수 있다. 즉, 사용자의 측정영역에 적합하도록 적절한 렌즈 구경 비를 갖는 센서의 설계가 가능하다¹³⁾.

2.2 센서의 구성

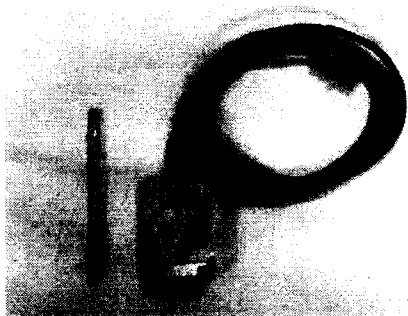


Fig. 3 The developed surface roughness sensor

Fig. 3은 실제 개발된 표면 거칠기 측정 센서를 보이고 있다. 센서의 크기는 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 소형으로서 $73 \times 34.5 \times 20\text{mm}$ 이다. 광원으로 사용된 다이오드 레이저 콜리메이터는 4mW 급으로 $\phi 1.5 \times 2.2\text{mm}$ 의 타원형 빔직경을 갖고 있으며, 파장(λ)은 780nm 이고 외형 사이즈는 $\phi 10 \times \ell 15\text{mm}$ 정도이다. 광원 앞에 33%의 광 분할기를 두어 입사광을 분할하도록 하였다. 수광부 두 렌즈의 유효 수광각은 각각 $16.7^\circ, 7.6^\circ$ 로 구성되었

다. 이와 같은 설정은 제작된 센서가 연삭 공정 모니터링에 적합하도록 비교적 넓은 영역에서의 측정에 유리하도록 결정된 것이다. 광원에 필요한 전원은 제어 장치에서 공급되며, 3개의 광다이오드에서 얻어진 신호는 제어 장치에서 받아 처리를 하게 된다.

2.3 센서 제어 장치의 구성



Fig. 4 The sensor and controller unit

개발된 표면 거칠기 센서를 효율적으로 사용할 수 있도록 전용 제어 장치를 개발하였다. Fig. 4는 개발된 측정 센서와 제어 장치를 보이고 있다. 제어장치는 반도체 레이저 구동을 위해 필요한 전원을 공급하기 위한 전원 공급 장치와 광 다이오드에서 감지된 신호를 증폭하고 이를 A/D 변환 후 필요한 처리를 하여 LCD 디스플레이 하는 기능, 그리고 측정에 관련된 제반 사항을 설정하거나 다른 장비와의 인터페이스가 가능하게 하는 통신 기능이 포함되었다. 또한 표면을 스캐닝하면서 측정하기 위한 1축 구동 장치 및 데이터 획득 과정을 위한 하드웨어 및 소프트웨어가 포함되어 있다. 모든 입력은 제어 장치 전면에 있는 키보드를 이용할 수 있도록 제작되었고, 제어 장치에는 8096 프로세서가 이용되었으며 디스플레이하기 위한 화면은 2개의 채널로 구성되어 사용자로 하여금 동시에 두 가지의 정보를 얻을 수 있게 하였다. 각 채널에서는 입사 광속과 2개의 반사 광속, 광속비, 표면 거칠기(R_a, R_q ; [7]참조) 등을 표현할 수 있게 하였고, A/D 변환에서 얻어진 데이터에 대한 평균 값을 얻기 위해 적절한 샘플링 수를 설정할 수 있도록 하였다. 특히 가공물의 재질에 따른 반사율의 차이에 무관하게 사용할 수 있도록 2개의 기준 시편으로 감도를 보정할 수 있는 기능을 두어 재질이나 그 외 다른 환경에 따라 사용이 가능하도록 하였다.

2.4 가공 표면 스캐닝 장치의 구성

가공 표면 전체에 대한 표면 거칠기 평가가 가

능하게 하도록 AC 서보 모터와 LM 가이드로 구성된 1축 구동 장치를 제어기에 결합하였다. Fig. 5는 개발된 장치를 이용하여 시편 전체의 표면 거칠기를 스캐닝 하는 모습을 보여주고 있다. 가공 표면에 대한 올바른 표면 상태 평가를 위해서는 표면 전체에 대한 스캐닝이 바람직하므로 개발된 구동 장치는 연삭 공정 모니터링에 유용할 것으로 기대된다.



Fig. 5 The scanning unit for measuring surface roughness over the entire ground surface

3. 평면 연삭에서의 공정 모니터링 실험

3.1 센서 성능 평가 실험

개발된 센서의 특성을 살펴보기 위해 표준 시편에 대해 매개 변수를 측정하였다. Fig. 6은 표준시편에 대한 R_a 값과 개발된 측정 센서에서 표면 거칠기 측정 매개 변수로 하는 광속비 FR_2 와의 관계를 보이고 있다. 비교적 고운 표면에서 감도가 좋으며 고운 표면과 거친 표면을 포함하는 넓은 표면 거칠기 범위에서 충분한 변별력을 가지고 있으므로 표면 거칠기 모니터링 센서로서 적합함을 알 수 있다.

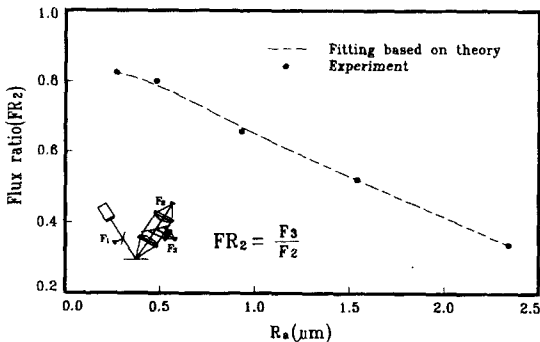


Fig. 6 Measured flux ratio FR_2 versus surface roughness for standard samples

3.2 실험 조건 설정

개발된 측정 센서를 이용하여 실제 기상에서 표면 거칠기 측정에 의한 공정 모니터링 실험을 하기 위한 제반 조건들을 다음과 같이 설정하였다. 연삭 스톨은 WA90JmV를 사용하였다. 연삭기 주 속도는 $\phi 110\text{mm} \times 1800\text{rpm}$, 테이블 이송 속도는 0.15m/s 으로 하고 절입량을 $10\mu\text{m}$, 횡 이송량을 0.6mm 로 하여 상향 연삭(Up-Grinding) 하였다. 측정 시점은 초기 드래싱한 후부터 1회씩 연삭 완료 후 연삭 입자가 완전히 탈락될 때까지로 하여 반복 측정하였다. 실험에 사용된 가공물은 정도가 HrC62이고 $28 \times 70\text{mm}$ 의 면적을 갖는 SCM415-H이다. 측정 데이터를 얻는 방식으로는 전체 표면에 대한 대표 값으로의 신뢰도를 높이기 위해 한 번의 연삭 가공이 완료된 후 A/D 샘플수를 100으로 하여 평균을 취하는 방식으로 전 면적에 대해서 30개의 위치에서 측정을 하였다.

3.3 평면 연삭기에서의 기초 실험

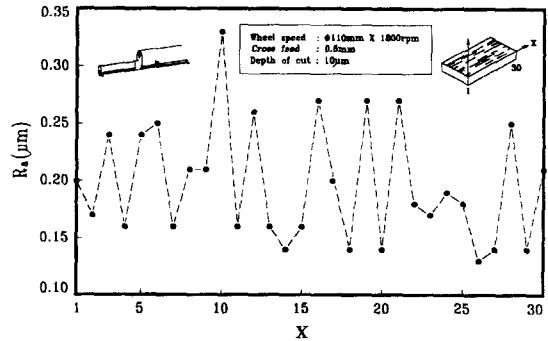


Fig. 7 Variation of surface roughness R_a along X

Fig. 7은 측정식에 의해 측정된 가공 표면에서의 가공 방향(X)으로의 표면 거칠기(R_a) 산포도를 보이고 있다. 인접한 두 위치간에도 상당한 편차를 보이고 있음을 알 수 있다. Fig. 8은 같은 시편에 대해 개발된 센서에 의해 측정된 가공 표면에서의 가공 방향으로의 측정 매개 변수 FR_2 산포도를 보이고 있다. 이 결과로부터 가공된 연삭 표면에 대해 어느 한 점에서의 표면 거칠기 값을 그 표면에 대한 대표 값으로 인정하기에는 다소의 문제점이 있음을 알 수 있다. 따라서 가능한 범위 내에서 많은 측정 위치에 대해 표면 거칠기를 측정하여 통계적인 처리를 통해 가공 표면의 대표적인 거칠기 값을 얻는 것이 바람직하다. 특히 측정식의 경우 아주 작은 거리에 대해서 라인 스캐닝

방식으로 표면 거칠기 값을 산출하므로 표면 전체에 대한 대표 값으로의 신뢰도가 낮다고 할 수 있겠다. 본 연구에서 개발한 센서는 측정시 일정한 면적을 포함하므로 신뢰도가 향상되며, 특히 측정값에 대한 평균을 고려하고자 하는 경우는 연삭 표면에 대해 여러 위치에서 표면 거칠기를 측정해야 하는 데 개발된 센서는 기존의 측정 방식과는 비교할 수 없을 정도의 측정 시간 단축 효과를 가져온다. 가공 표면에 대해 대표 값을 얻기 위해서는 인위적으로 선정된 다수의 측정점에 대해 표면 거칠기를 측정하여 평균하거나 Fig. 5에 도시된 것과 같은 구동 장치를 이용하여 표면에 대한 스캐닝을 실시하는 것이 바람직하다. Fig. 9는 Fig. 5에 나타낸 것처럼 개발된 센서를 스캐닝 구동 장치에 결합시켜 표면 전체에 대해 스캐닝한 결과를 3차원으로 보여 주고 있다.

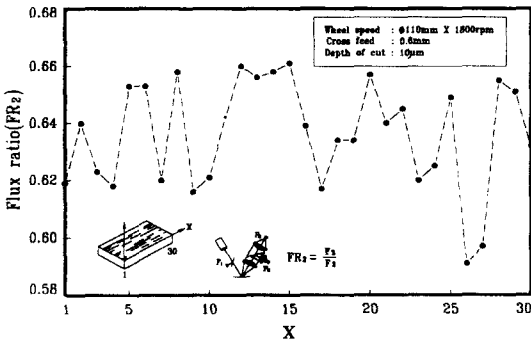


Fig. 8 Variation of flux ratio FR_2 along X

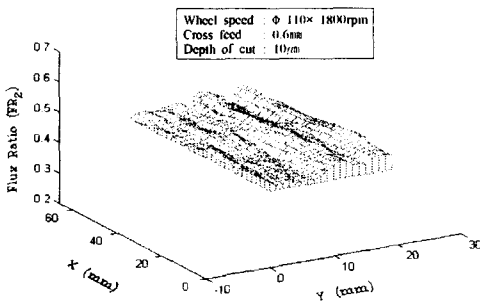


Fig. 9 A typical 3-D plot of FR_2 for a ground surface measured by the sensor and the scanning unit

3.4 평면 연삭기 공정 모니터링

Fig. 10은 여러 번의 연삭 공정이 진행되면서

측정 시점에 대해서 다이아몬드 측정 방식으로 측정된 표면 거칠기 값을 보이고 있다. 이미 언급한 바와 같이 가공 표면에서 30개의 위치에서 측정된 표면 거칠기의 평균값을 구하여 나타내었다. 초기 연삭 시점으로부터 비교적 일정하게 유지되던 표면 거칠기 값이 가공이 진행되면서 증가하는 것을 확인 할 수가 있다. 표면 거칠기 값이 증가하는 B_1 점은 연삭 표면에 국부적으로 약한 연삭 높음 현상이 발생된 때의 값이고, B_2 점은 연삭 높음 상태가 아주 심각하게 발생했을 때를 나타낸 것이며, E점은 연삭 스톨의 입자가 완전히 탈락되고 있을 때의 표면 거칠기 값에 해당된다. 한편 Fig. 11은 30개 위치에서 측정된 표면 거칠기의 표준편차를 보여 주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 매 공정마다 표면 전체에 대한 표준편차의 결과로부터 표면 어느 한 위치에서의 표면 거칠기 값으로 표면 전체에 대한 대표 값을 택하는 것은 어려움이 있다는 것을 파악할 수 있다. 또한 표면이 거칠어질수록 표면 거칠기의 표준편차도 커지는 경향이 있음을 확인할 수 있다.

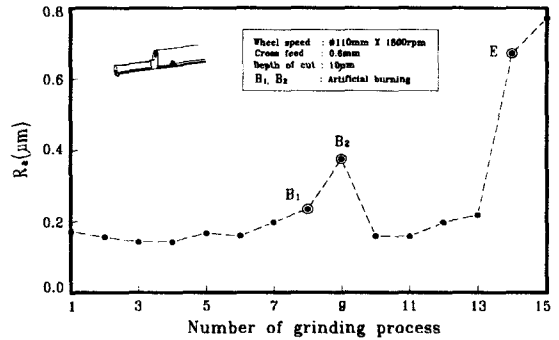


Fig. 10 Surface roughness R_a averaged over the entire ground surface

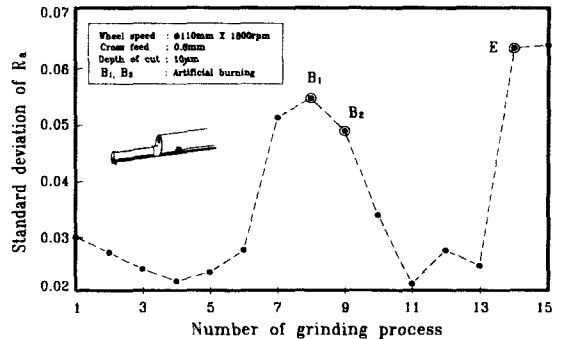


Fig. 11 Standard deviation of R_a over the entire ground surface

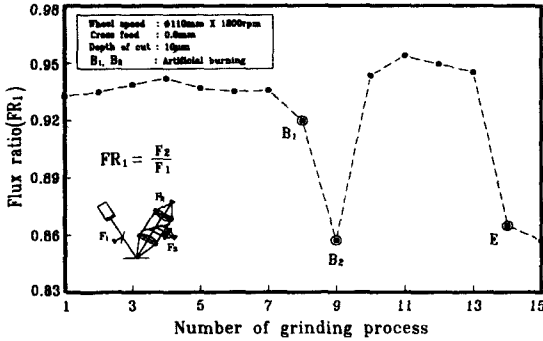


Fig. 12 Flux ratio FR_1 averaged over the entire ground surface

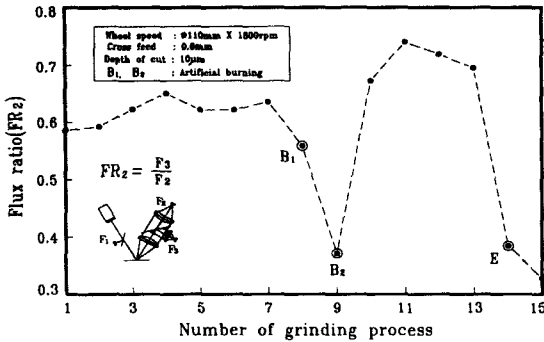


Fig. 13 Flux ratio FR_2 averaged over the entire ground surface

Figs. 12 와 13은 동일한 조건에서 측정된 광속 비 FR_1, FR_2 를 보이고 있다. Fig. 10에서와 마찬가지로 광속비가 떨어지기 시작하는 B_1 점은 연삭 표면에 국부적으로 약한 연삭 높음 현상이 발생한 것을 감지한 것이고, B_2 점은 연삭 높음 상태가 아주 심각하게 발생했을 때를 나타낸 것이며, E점은 연삭 슛들의 입자가 완전히 탈락되고 있음을 의미하므로, E점에서 드래싱 시기를 결정할 수 있다. Fig. 10과 비교해 보면 표면 거칠기가 고울수록 FR_1, FR_2 는 높게 나타나고 표면 거칠기가 거칠수록 낮게 나타나는 역의 관계를 고려한다면 경향이 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 연삭 가공이 진행되면서 각 공정마다 측정된 값이 조금씩 차이를 보이는 것은 본 실험에서 비교 대상으로 삼은 다이아몬드 측정식의 결과인 Fig. 10에서 보듯이 실제 표면의 거칠기가 다르기 때문이다. 한편 측정된 광속비로부터 광속비와 표면 거칠기 관계식^[5]에 적용하여 대응되는 표면 거칠기 값을 산

출할 수가 있다.

연삭 높음이 발생했을 때와 연삭 슛들 입자가 완전히 탈락한 것으로 파악된 E점에서 연삭 표면이 매우 거칠다는 것을 확인할 수 있으며 이때 측정식으로 측정된 결과에서와 마찬가지로 두 광속비 FR_1, FR_2 모두 큰 변화를 보이게 되므로 연삭 공정에서의 상태 변화 감지에 유용하게 사용할 수 있음을 알 수 있다. 특히 Fig. 12의 결과로부터 비록 센서의 설계 특성상 광속비 FR_1 의 값 변화 영역은 비교적 적지만, 표면의 연소가 나타난 B_1, B_2 에서 큰 폭의 상대 변화가 관측이 됨을 확인할 수 있다. 이것은 표면의 연소 상태 변화에 민감한 특성을 보이므로 연삭 공정 모니터링에 유용하게 활용될 수 있음을 보여 주고 있다.

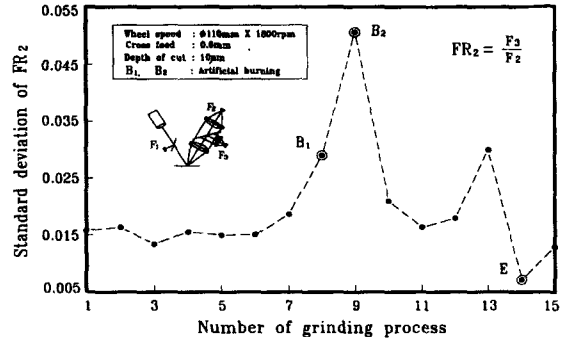


Fig. 14 Standard deviation of FR_2 over the entire ground surface

Fig. 14에서는 광속비에 대한 표준편차의 변화를 보이고 있다. 연삭 높음이 발생했을 때를 포함하여 대체로 표면 거칠기와 유사한 경향을 보이다가 입자가 탈락했을 때를 전후하여 매우 낮은 값을 보이고 있다. 이는 입자가 탈락된 상태에서의 연삭에 의해 표면 전체의 거칠기가 전반적으로 나빠지게 되나 연삭 높음에 의해서는 연삭 표면이 불균일한 표면 거칠기를 갖게 됨을 의미한다. 이와 같이 광속비에 대한 표준편차에 대한 정보도 연삭 특성 분석에 유용하므로 연삭 공정의 모니터링에 하나의 측정 매개 변수로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

3.5 연삭 센터에서의 연삭 공정 모니터링

개발된 측정 시스템을 연삭 센터^[8]에서의 연삭 공정 모니터링에 대해서도 적용하였다. 연삭 센터에서의 실험 조건으로는 주축의 회전수를 9550

rpm으로 하고, 가공 재료로는 경도가 H_RC55인 합금공구강(SKD11)을 사용하여 절입량과 이송 속도를 바꾸면서 실험을 하였다. 여기서는 앞에서의 실험과는 달리 동일한 조건의 가공을 반복 시행한 것이 아니라 가공 조건의 변화에 따른 특성 변화를 모니터링할 수 있는지를 검토하기 위해 실험이 진행되었다. Fig. 15는 실험 결과로, 절삭 속도, 절입량 및 이송 속도를 변화시키면서 연삭 공정별로 각 측정 변수들을 측정하였다. 예측되었던 바와 마찬가지로 이송 속도와 절입량을 증가시키면 따라 표면 거칠기는 증가하고 광속비들은 감소하는 경향이 일관되게 나타나고 있다. 따라서 개발된 측정 장치를 이용하여 표면 거칠기를 기상 계측하여 연삭 상태를 모니터링할 수 있을 것으로 기대된다. 한편 연삭 공정에 있어 표면 거칠기를 일정하게 유지하기 위한 제어에 개발된 센서에서 얻어지는 광속비 값을 연삭기 제어 장치에 피드백(Feedback)하여 이송속도나 절입량을 변경시키는 방법의 활용도 가능할 것으로 기대된다.

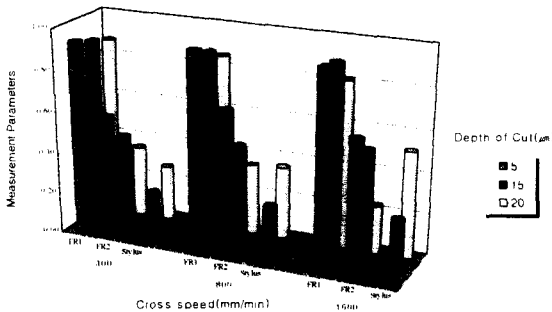


Fig. 15 Roughness parameters with respect to depth of cut and cross feed for the grinding center

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 연삭 공정 모니터링을 위한 산란 광속비 측정 방식의 표면 거칠기 측정 센서 및 제어 장치를 개발하였고, 이를 실제 연삭 공정에 적용하였다. 개발된 센서는 두 가지 광속비를 동시 측정할 수 있도록 구성되어 표면 거칠기 자체뿐만 아니라 연삭 높음 등의 비정상적인 연삭 상태를 감지할 수 있도록 하였다. 실제 평면 연삭기에서 동일한 조건에서의 반복 공정에 따른 표면 상태의 모니터링 실험을 수행하였으며 연삭 센터에서 연삭 공정 중 가공 조건의 변화에 따른 표면 거칠기 상태를 기상 계측하여 연삭 공정 모니터링 가능성을 평가하였다. 향후 이와 같은 센서를 반복적인

연삭 공정이 필요한 현장에서 표면 상태의 균질화를 목적으로 한 기상 계측에 활용하거나 피드백 제어를 위해 활용한다면 매우 유용할 것으로 기대된다. 센서의 개발 및 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 개발된 센서가 연삭 공정의 모니터링에 매우 유용하다. 특히 가공 표면 전체에 대해 기상에서 표면 거칠기를 평가해야 하는 모니터링 과정에 매우 유리하다.
- (2) 여러 위치에서 측정된 표면 거칠기에 대한 통계 처리 결과에서 얻어지는 표준 편차 정보도 연삭 공정의 모니터링에 부가적인 정보를 제공한다.
- (3) 개발된 센서는 기상에서의 계측이 가능할 뿐만 아니라 다른 측정 장치에 비해 월등히 저렴한 가격으로 제작이 가능하다.
- (4) 측정 대상에 따른 광학계 설계 변경을 통해 공정에 적합한 센서의 제작이 가능하므로 특성에 맞는 센서의 활용이 가능하다.

참고문헌

1. Thomas, T.R., "Surface roughness : The next ten years," Surface Topography, Vol.1, pp.3-9, 1988.
2. Sherrington, I. and Smith, E. H., "Modern measurement techniques in surface metrology: part II: optical instruments," Wear, Vol.125, pp. 289-308, 1988.
3. Teaque, E.C., Vorburger, T.V. and Maystre, D., "Light scattering from manufactured surface," Annals of the CIRP, Vol.30, No.2, pp. 563-569, 1981.
4. 김현수, 홍성욱, "기상 계측을 위한 광학적 표면 거칠기 측정 센서의 개발," 한국정밀공학회지 제11권 6호, pp. 168-178, 1994.
5. 홍성욱, 김현수, "산란 광속 측정에 의한 연삭 가공 표면 거칠기 측정 방법," 한국정밀공학회지, 제12권 4호, pp. 46-54, 1995.
6. Kim, Hyun-Soo and Hong, Seong-Wook, "A method for monitoring roughness of ground surface by using flux ratios of scattered lights," Progress of Cutting and Grinding (Published by Japan Society of Precision Engineering), Vol. III, pp. 354-359, 1996.
7. KS B0161, Surface Roughness.
8. 박광삼 외, CNC 그라인딩 센터 개발에 관한 연구, G7 과제 연구보고서, 1996.