

LSM을 이용한 연삭 슷돌 마모 모니터링

주광훈*, 김현수*, 홍성욱**, 박천홍***

Monitoring of Grinding Wheel Wear Using Laser Scanning Micrometer

K. H. Ju*, H. S Kim*, S. W. Hong**, and C. H. Park***

ABSTRACT

This paper deals with monitoring of grinding wheel wear in grinding process. A monitoring system is developed in which a laser scanning micrometer is used to measure the circumferential shape as well as the axial shape of grinding wheel. The monitoring system is applied to grinding machines. The experimental results show that the monitoring system is useful not only for monitoring the amount of wear in grinding wheel but also for measuring the apparent diameter of the grinding wheel.

Key Words : Grinding wheel wear(스틀 마모), Plunge grinding(플런지 연삭), Traverse grinding(트래버스 연삭), Laser Scanning Micrometer(레이저 스캐닝 마이크로미터)

1. 서론

연삭에서는 슷돌 입자와 공작물의 상호작용에 의해 가공이 이루어지므로 슷돌의 표면 상태가 가공물의 질을 결정하는 핵심적인 요소가 된다. 대체로 마무리 공정에 해당되는 연삭은 다른 절삭 공정에 비해 공구의 마모 진행정도가 빠르며, 가공중에 발생하는 슷돌의 마모는 기계적으로 인가된 겉보기 절입량(Depth of cut)보다 실 절입량을 작게 하여 연삭비를 감소시키므로 가공오차의 원인이 되고 있다^[1]. 따라서 연삭 효율을 높이고 연삭 정밀도 향상을 위해 슷돌 표면에 대한 기상(On machine)측정이 이루어지고 있다^[2-9]. 연삭 슷돌 대한 정확한 측정은 작업 효율을 증가시킬 뿐만 아니라 슷돌 마모량 보정에 의해 연삭 정밀도를 크게 개선할 수 있다. 또한 연삭 슷돌 마모량을 평가할 수 있다면 일반적으로 정확한 데이터 없이 이루어지는 드레싱 작업에 대해 적절한 작업시점을 설정해 줄 수 있다.

본 연구에서는 레이저 스캐닝 마이크로미터(Laser Scanning Micrometer, 이하 LSM)를 이용한 연삭 슷돌 마모 모니터링 방법을 제안하였다. 측정 시스템을 연삭 마모 모니터링에 적용하여 연삭 슷돌의 마모는 물론 슷돌의 형상도 효과적으로 측정할 수 있음을 보였다. 또한 측정된 데이터에 대한 평가로부터 슷돌 마모 모니터링을 통해 적절한 드레싱 시점을 판단할 수 있음을 확인하였다. 한편 두 가지 평면 연삭 공정에서의 슷돌 마모량 측정 실험에서 측정식으로 표면 거칠기 측정을 병행함으로써 각 연삭 공정에서의 슷돌 마모에 따른 표면 거칠기 변화도 분석하였다.

2. 연삭 슷돌 마모 측정 시스템

본 연구에서 사용한 레이저 스캐닝 마이크로미터(LSM)의 측정 정도는 수 마이크로에서 서브 마이크로까지 가능하므로 정밀도가 반영구적으로 유

* 회원, 금오공과대학교 대학원
** 회원, 금오공과대학교 기계공학부
*** 회원, 한국기계연구원

지될 수 있으며, 구조가 단순하여 연삭기에 장착하여 사용할 경우 다양한 목적으로 사용이 가능하다.

Fig. 1은 LSM의 측정원리를 나타낸 것으로서 반도체 레이저(Laser diode)에서 발생된 레이저빔이 다면경(Polygon mirror)에서 반사되고 환원렌즈(Collimation lens)에 의해 평행광으로 되어 측정물을 지나 수광부에 위치한 집속렌즈(Focusing lens)에 의해 광다이오드(Photodetector)에 집속된다. 회전하는 다면경의 회전각에 따라 스캔이 이루어지는데 다면경의 한 면에 대해서 한번의 스캔이 일어난다. 이때 측정물이 놓이면 스캔광의 일부가 가로막힘으로 인해 발생하는 펄스형태의 광다이오드의 신호와 스캐닝 속도를 이용하여 물체의 끝점(Edge)을 알 수 있다. 또한 LSM 제어기는 다른 장치와의 통신을 위해 RS232C, BCD, IO채널을 내장하고 있으므로 연삭기 주제어기(Main controller)와의 데이터 호환에 유리하다. Table 1은 LSM의 정도를 나타낸 것이다.

Fig. 2는 연삭 스톨 마모 측정장치의 개략도를 보인 것으로서 LSM에서 측정된 데이터를 AD 보드를 이용하여 획득하고 개발된 응용 프로그램에 의해 데이터 평가가 이루어지도록 구성하였다. LSM에 의해 측정된 스톨 표면에 대한 정보는 레이저빔이 일정한 폭을 가지므로 스톨 표면 입자들에 대한 평균적인 의미를 가진다.

3. 연삭 스톨 마모 모니터링

3.1 성형 연삭기용 스톨 형상 측정

개발된 연삭 스톨 마모 측정 시스템을 LM 가이드 레일 가공용 성형 연삭기의 형상 측정에 시험 적용하였다. Fig. 3은 성형 연삭 스톨을 드레싱한 후 축 방향으로 100 μ m씩 이동하면서 측정하는 것을 보인 것으로서 성형된 연삭 스톨의 형상을 그대로 재현할 수 있었다. 그러나 실험에 사용된 성형 연삭기에서의 스톨 마모 실험을 위해 매 가공마다 측정장치를 탈착해야 하므로 탈착에 따른 측정오차로 인하여 연삭 스톨 마모 측정에는 적합하지 않았다.

3.2 스톨 마모 모니터링: 평면연삭기 적용

연삭 스톨 마모 모니터링 장비의 유용성을 확인하기 위해 평면 연삭기에서 플런지(Plunge) 및 트래버스(Traverse) 연삭 공정에 대해 시험 적용하였다.

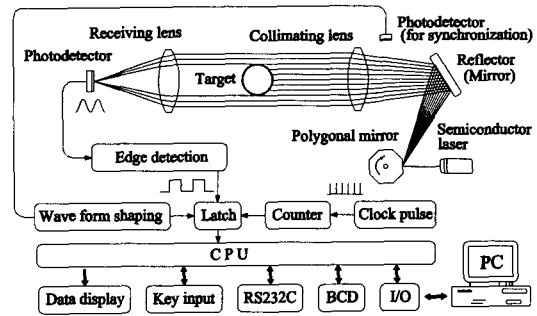


Fig. 1 Schematic for principle of LSM(Controller : LS-5500, Laser head : LS-5040)

Table 1 Specifications of LSM

측정범위	0.2 ~ 40mm
순간 측정정도	$\pm 2\mu\text{m}$ 이하
평균 측정정도	$\pm 0.3\mu\text{m}$ 이하
레이저 스캔 회수	1200 scans/s
레이저 스캔 속도	121m/s
레이저 스캔 범위	46mm
투광부 수광부간 거리	160 \pm 40mm
광원	0.8mW, 670nm

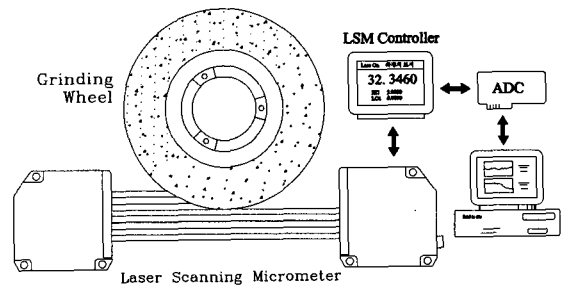


Fig. 2 Schematic diagram for measurement of wheel wear using laser scanning micrometer

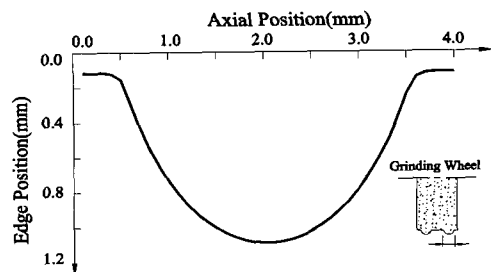


Fig. 3 Measured shape of shaped grinding wheel

3.2.1 측정 장치 셋업

Fig. 4는 평면 연삭기에 적용한 측정 장치의 예를 보인 것으로 테이블 중간에 가공물을 놓아서 연삭 후 숫돌의 수직 이동 없이 측정이 가능하도록 테이블 가장자리에 LSM를 두었다. 이때 LSM의 헤드 받침과 연삭 테이블의 각을 일치시켜 정렬하였다. 한편, 연삭기의 주축 회전수는 1700rpm으로 고정되어 있다. 그러므로 LSM의 스캔속도를 고려하여 AD보드 샘플링 속도(Sample rate) 500Hz에서 회전당 1000개의 원주 데이터가 얻어지도록 스핀들 뒤편에 회전수 조정이 가능한 별도의 보조 모터를 장착하여 주축 회전수를 30rpm 정도로 하여 측정하였다. 그리고, 숫돌 축방향으로 100 μ m씩 이동하면서 측정을 반복하였다. Table 2는 본 연구에서 적용한 평면 연삭기의 기본 실험조건을 보인 것이다.

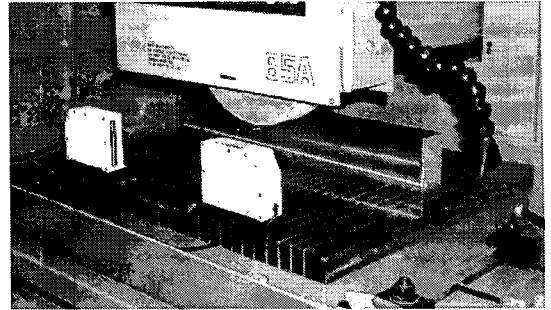


Fig. 4 Experimental setup for monitoring of grinding wheel wear in surface grinding machine

Table 2 Basic grinding conditions

Grinding wheel	WA90JmV
Width of wheel	38mm
Cutting speed	$\varnothing 240\text{mm} \times 1700\text{rpm}$
Table feeding speed	0.154m/s
Grinding method	Up-Grinding
Workpiece	SCM4

3.2.2 테이블 이송 오차 측정 및 활용

연삭 숫돌 마모 측정 시스템에 의해 측정된 데이터는 비교적 일정하게 유지되는 기율기 성분을 포함하고 있었다. 이는 숫돌 마모 측정 시에 측정 장치가 놓인 연삭 테이블의 횡방향(숫돌 축방향) 이동에 대해서 드레싱 장치의 이동 축이 평행을 이루지 못한 것으로 사료된다. 따라서 기율기 오차를 보정하기 위해 레이저 간섭계(Laser Interferometer, HP5529A)를 이용하여 Fig. 5에 보인 것처럼 연삭 테이블에 대한 각오차를 측정하였다. 피치오차(Pitch error)의 경우 가공물이 놓이는 부분(200mm)과 LSM 헤드가 놓이는 부분(480mm)의 기율기 변화가 있음을 알 수 있다. 획득된 데이터의 기율기 오차는 주로 테이블 피치오차에 기인하기 때문에 실제 해석 과정에서는 기율기 성분을 제거하여 표현하였다. 본 연구에서 제안한 연삭 숫돌 마모 모니터링 측정 장치는 숫돌 마모는 물론 연삭기 자체의 정도 측정에도 유용함을 알 수 있다. 연삭 테이블의 Yaw error의 경우 오차 범위가 작게 나타나며 측정에 크게 영향을 주지 않으므로 데이터 해석 시에 고려하지 않았다.

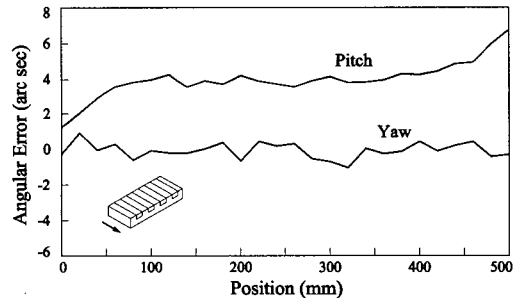


Fig. 5 Angular motion errors of feeding table for grinding machine

3.3 플런지 연삭에서의 숫돌 마모 모니터링

플런지 연삭 공정에서 숫돌 마모 측정을 위해 가공물(250mm \times 26mm)의 폭을 숫돌 폭보다 작게 하여 연삭 시에 참여되지 않는 숫돌의 일부를 실제 절입량 계산을 위한 기준으로 하였다. 그리고, 드레싱 후 가공물 표면에 숫돌을 접촉시킨 후 가공하여

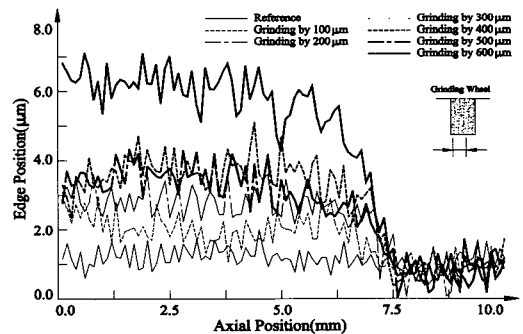


Fig. 6 Wear of grinding wheel in plunge grinding process

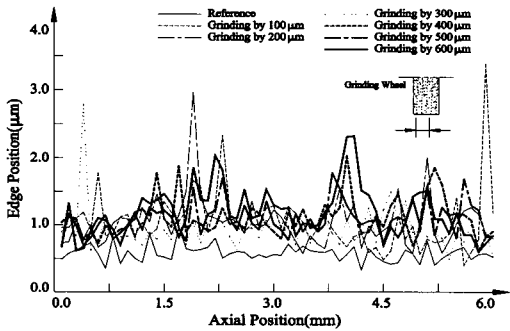


Fig. 7 Standard deviation of grinding wheel prominence in plunge grinding process

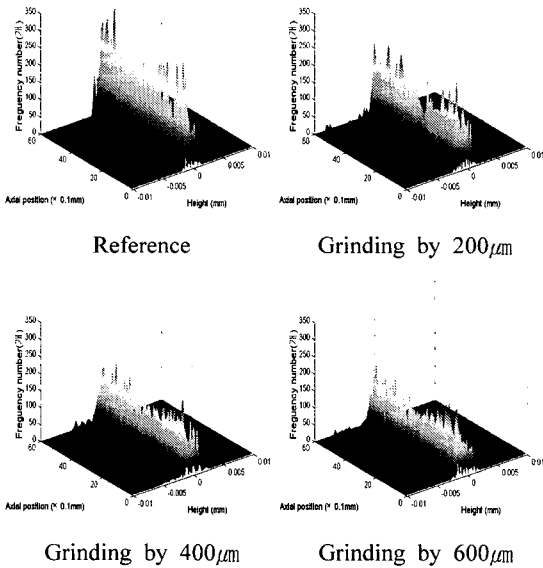


Fig. 8 Change in histogram of grinding wheel prominence along axial direction due to grinding wheel wear in plunge grinding process

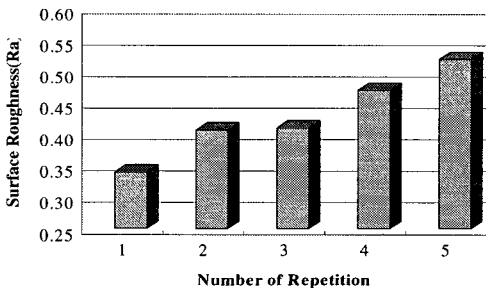


Fig. 9 Change of surface roughness in plunge grinding process

측정한 위치를 기준으로 1회 절입량을 $10\mu\text{m}$ 로 하여 10회 반복 가공을 수행, $100\mu\text{m}$ 절입한 후 슷돌의 마모 상태를 측정하였다. Fig. 6은 절입량과 테이블 이송오차를 보정한 후 1000개의 슷돌 원주 데이터를 평균한 값으로 슷돌의 형상을 연삭 진행 순서에 따라 축방향에 대해서 나타낸 것이다. 축방향에서 7mm 이후는 연삭 시에 접촉되지 않은 기준면을 의미한다. 연삭이 진행됨에 따라 슷돌 마모 정도가 잘 나타나고 있는데 이 마모량은 실제 가공물 정밀도에 관계하므로 보정될 필요가 있다. 또한 연삭 초기에는 반복 가공에 의해 마모량이 점차 작아지다가 특정 조건에서 갑자기 큰 마모가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이것은 초기에는 연삭 입자의 마모에 의한 소규모의 마모가 발생되나 연삭 진행 정도에 따라 슷돌 눈막힘(Loading)이 커지거나, 연삭 입자 마모면이 증가하면서 누적된 마모면 증가에 의해 연삭력이 커지면서 입자의 탈락이 쉬워지게 되어 입자가 탈락/신출하는 과정에서 큰 마모가 나타나는 것으로 사료된다^[9-11]. 이와 같이 슷돌 마모의 진행이 급격히 변화되는 정보를 활용할 경우 적절한 드레싱 시점을 결정할 수 있다^[1]. Fig. 7은 측정된 원주 데이터의 표준 편차를 나타낸 것으로 기준 시점과 초기 연삭 후에 큰 변화가 관측되나 연삭이 진행되면서 그 변화 폭이 작아짐을 알 수 있다. Fig. 8은 연삭 진행에 따른 높이-빈도수 히스토그램의 변화이다. 기준면의 경우 중앙에 집중되고 비교적 안정적인 형태를 유지하는 반면, 연삭이 진행되면서 산포되면서 변화도 심해지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7과 8로부터 시편의 표면 상태를 예측할 수 있는데 표준 편차가 커지거나 히스토그램이 넓은 영역으로 산포되면 표면 거칠기는 상대적으로 크게 나타남을 알 수 있다. 한편, 슷돌 마모 모니터링 실험과 병행하여 다이아몬드 축침식으로 가공물의 표면 거칠기를 측정하였다. 표면 거칠기는 시편 표면 특정 지점의 값을 표면 전체에 대한 대표 값으로 하는 것이 곤란하므로 연삭 면에 대해 랜덤하게 6곳을 측정하여 평균한 것을 대표 값으로 하였다^[7].

Fig. 9는 플런지 연삭 과정에서의 슷돌 마모 모니터링과 병행하여 측정된 표면 거칠기를 나타낸 것이다. 플런지 연삭의 경우 슷돌 모든 면이 동시에 연삭에 참여하므로 연삭이 진행되면서 발생하는 슷돌 마모에 의해 가공물 표면이 거칠어지는 것을 알 수 있다.

3.4 트래버스연삭에서의 슷돌 마모 모니터링

연삭 가공에는 가공물의 형상과 정밀도에 따라 다양한 방법들이 있다. 여기서는 가공물의 폭이 연삭 슷돌 폭보다 큰 경우 행해지는 트래버스 연삭에 대해서 슷돌 마모 모니터링 실험을 수행하였다. 500mm × 50mm의 가공물에 대해서 테이블 횡 이송량을 2.5mm로 하고 매 가공 시마다 절입량을 10 μ m로 하였다. 측정은 플런지 연삭에서와 같이 드레싱 후 슷돌과 가공물의 초기 접촉 가공 후 측정된 것을 기준으로 절입량 10 μ m간격으로 슷돌 마모 실험을 하였다. 플런지 연삭의 경우 연삭 슷돌의 폭보다 가공물의 폭이 작은 관계로 연삭에 참여하지 않는 슷돌 부위를 실 절입량 계산의 기준으로 하였으나 트래버스 연삭에서는 슷돌의 전체 표면이 가공에 사용되므로 인위적으로 슷돌 앞면에 단을 만들어 절입량 계산의 기준으로 하였다. 트래버스 연삭의 경우 슷돌의 앞쪽 입자들에 의해 연삭이 일어나고 뒤따르는 입자들에 의해 표면이 다듬질되므로 상대적으로 앞쪽 입자들의 마모 및 탈락이 크고 뒤따르

는 입자들은 탈락보다는 주로 마모가 일어난다.

Fig. 10은 초기 접촉 가공을 기준으로 10 μ m씩 절입 연삭마다 측정된 슷돌의 마모 상태를 보인 것이다. 슷돌의 마모는 연삭 시작 시점부터 지속적으로 가공에 참여되는 슷돌의 앞면에서 크게 일어나고 있다. 연삭이 진행되면서 점차 마모량이 증가하고 마모 부분이 확산되면서 경사진 형태의 마모형상을 보이고 있다. Fig. 11은 원주데이터에 대한 표준편차를 나타낸 것으로서 슷돌의 마모정도가 클수록 크게 나타남을 알 수 있다. Fig. 12은 높이-빈도수에 대한 히스토그램을 나타낸 것이다. 가공의 진행에 따라 표준편차가 커지며 특히 슷돌의 앞면 부분에 있어서 빈도수가 넓게 분포하면서 표준편차가 점차 커짐을 알 수 있다. 한편, 신뢰구간 95%에서 표준편차 3 μ m에 대한 평균치 참값이 평균값 \pm 0.18 μ m이므로 계산된 평균값에 큰 영향을 주지 않는다. 트래버스 연삭에서 슷돌의 앞면은 입자의 마모보다 파쇄 및 탈락에 의한 슷돌의 마모이며, 뒷부분은 입자들의 탈락이 희박하여 입자 마모에 의한 슷돌 마모로 볼 수 있음을 히스토그램에서 확인할 수 있다. 그러므로 표준 편차나 히스토그램을 이용하여 가공물의 표면 거칠기 정도를 예상할 수 있다.

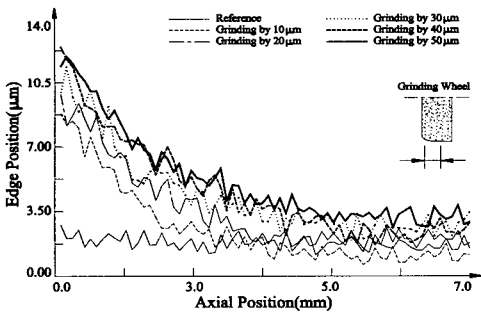


Fig. 10 Wear of grinding wheel in traverse grinding process

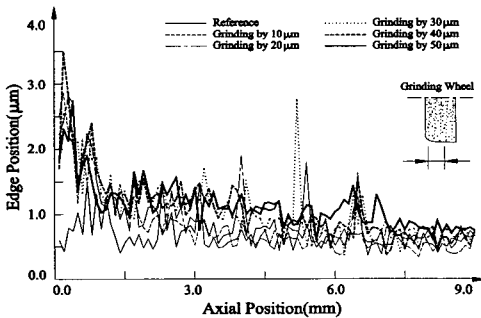


Fig. 11 Standard deviation of grinding wheel prominence in traverse grinding process

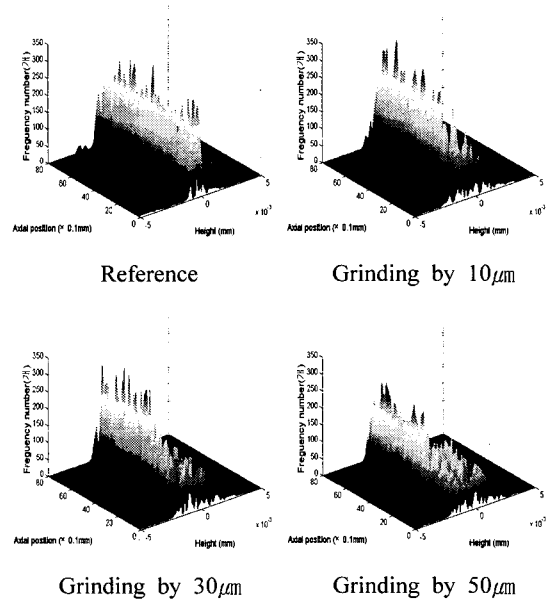


Fig. 12 Change in histograms of grinding wheel prominence along the axial direction due to grinding wheel wear in traverse grinding process

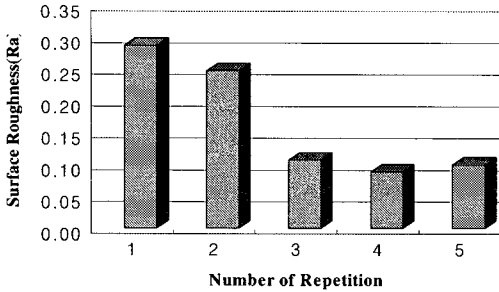


Fig. 13 Change of surface roughness in traverse grinding process

Fig. 13은 트래버스 연삭 과정에서의 숫돌 마모 모니터링과 병행하여 측정식으로 측정된 표면 거칠기 변화를 나타낸 것인데 일정 값에 수렴되는 특징을 보이고 있다. 이는 가공물이 미소하게 마모된 숫돌 뒷부분 입자들에 의해 최종 마무리 가공되는 특성에 기인한 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 숫돌 마모량을 측정하여 가공 시에 보정할 목적으로 LSM을 이용하여 연삭 숫돌 마모 모니터링 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템을 성형 연삭기용 LM 가이드 레일 가공 숫돌의 형상 측정에 시험 적용하여 숫돌의 형상 측정이 가능함을 보였다. 또한 범용으로 사용하고 있는 평면 연삭기에서 플런지 및 트래버스 연삭에서의 연삭 숫돌 마모 모니터링에 적용한 결과 숫돌 형상 재현 및 마모량 측정이 가능하였다. 그리고 숫돌 마모량 측정 결과에 대한 분석을 통해 마모량 측정이 드레싱 시기 선정에 활용될 수 있음을 확인하였다. 또한, 측정된 데이터 평가에서 얻은 표준편차, 히스토그램 및 숫돌 마모 모니터링과 병행하여 측정된 표면 거칠기로부터 숫돌 마모의 변화 및 숫돌 마모와 표면 거칠기 변화의 관련성을 파악할 수 있었다.

후기

본 연구는 과학기술부에서 지원하는 “첨단기계류·부품개발사업”의 “연삭 메카니즘의 일류화 제품 기술 개발” 과제로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Malkin, S., Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives, John Wiley & Sons, pp. 197-221, 1988.
2. Brinksmeier, E. and Werner, F., “Monitoring of Grinding Wheel Wear,” Annals of the CIRP, Vol. 41, No. 1, pp. 373-376, 1992.
3. Blunt, L. and Ebdon, S., “The Application of Three-dimensional Surface Measurement Techniques to Characterizing Grinding Wheel Topography,” Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 36, No. 11, pp. 1207-1226, 1996.
4. Gotou, E. and Touge, M., “Monitoring of Wear of Abrasive Grains,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 62, pp. 408-414, 1996.
5. 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, 1997.
6. 홍성욱, 남경모, 김현수, “연삭 숫돌 직경 및 회전오차의 비접촉 측정 방법,” 한국정밀공학회지, Vol. 12, No. 13, pp. 175-181, 1995.
7. 김현수, 홍성욱, “기상에서의 표면 거칠기 측정에 의한 연삭 공정 모니터링,” 한국정밀공학회지, Vol. 16, No. 1, pp. 167-173, 1999.
8. 주광훈, 김현수, 홍성욱, 박천홍, “평면 연삭에서의 연삭 숫돌 마모 모니터링,” 한국정밀공학회 춘계학술대회, 부산대학교, 2000.
9. 김선호, 안중환, “연삭 가공에 있어 비가공 시간 단축에 관한 연구,” 한국정밀공학회지, Vol. 14, No. 8, pp. 101-107, 1997.
10. Babu, N. R. and Radhakrishnan, V., “Influence of Dressing Feed on The Performance of Laser Dressed Al₂O₃ Wheel in Wet Grinding,” Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 35, No. 5, pp. 661-671, 1995.
11. 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, 1996.