

Si₃N₄ 구조용세라믹재의 연삭가공시 슛돌마멸에 따른 가공특성

왕덕현*, 김원일⁺, 신경오⁺⁺
(논문접수일 2003. 3. 26, 심사완료일 2003. 6. 23)

Machining Characteristics According to the Wheel Wear in Surface Grinding for Structural Ceramics of Si₃N₄

Duck Hyun Wang*, Won Il Kim⁺, Kyong Oh Shin⁺⁺

Abstract

In this study, the decision of dressing time for diamond wheel was analyzed by observing with acoustic emission signals and surface roughness, and also obtained the machining characteristics by weibull distribution plot for the values of bending strength. From the experimental study, it was possible to predict the time of re-dressing for the diamond grinding wheel with the analysis of acoustic emission signals and surface roughness values, and following conclusions were obtained. The root-mean-square values of acoustic emission signals were obtained low as the increased of table speed for different abrasive grain size. This is caused by the lack of grinding power which is not able to get rid of all real grinding mass of depth as the table speed is increased. The values of bending strength for ground Si₃N₄ specimens were decreased for grain size of #400 than that of #60, but it was found that the surface roughness values for grain size of #60 were better than that of #400. As compared the shape parameter of weibull distribution plot for the values of bending strength, it was found that the reliability of bending strength for grain size of #60 increased than that of #400.

Key Words : Acoustic Emission(음향방출), Bending Stress(굽힘응력), Weibull Plot(와이블 플롯), Structural Ceramics of Si₃N₄(Si₃N₄ 구조용세라믹)

1. 서론

구조용 세라믹스는 고경도와 취성을 갖고있는 대표적인

난삭재이며 소결 공정에 따른 비틀림, 굽힘 및 수축 등의 변형들을 제어하여 고정밀도의 부품으로 제작하기 위해서는 기계적인 형상가공이 반드시 필요하다.

* 주저자, 경남대학교 기계자동화공학부 (dhwang@kyungnam.ac.kr)
주소: 631-701 경남 마산시 월영동 449
+ 경남대학교 기계자동화공학부
++ 경남대학교 대학원 기계공학과

특히 Si₃N₄는 경취성으로 인하여 최종부품으로 가공이 쉽지 않으며, 가공비가 전체 제품비용의 많은 양을 차지하고 있다. 일반적으로 기존의 가공 방식에 의해서는 높은 가공성을 기대하기 어려우므로 가공 결함을 억제하고 가공 능력을 향상시키기 위한 새로운 노력이 필요하다.

일반적으로 연삭가공시 슷들의 마멸이 시작되면 절삭저항이 증가하고 어느 한계치를 넘으면 제품의 정밀도가 급격히 떨어지므로, 적당한 시기에 슷들을 드레싱하여 정밀도를 높이고 또한 생산성을 높여준다. 이러한 가공면의 품질에 영향을 미치는 슷들상태를 검출하기 위한 연구가 진행되어 왔는데, 간접적인 슷들마멸 검출방법은 연삭력 변화 및 가공물의 표면거칠기 상태를 이용하여 측정하였고, 또한 칩의 모양과 크기의 변화, 드레싱시 발생하는 AE값으로 슷들의 손상상태를 추정하였다^(1,2). 그리고 직접적인 검출방법으로 Inasaki⁽³⁾는 광학을 이용하였고, Murray⁽⁴⁾와 Matsu⁽⁵⁾는 레이저의 반사강도를 이용하여 슷들마멸을 측정하였으며, 또한 Kim⁽⁶⁾은 세라믹 재료의 연삭특성에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 경취성의 구조용 세라믹재료인 Si₃N₄의 연삭가공시 슷들의 마멸상태를 예측하기 위하여 피삭재 밑면에 센서를 부착하여 음향방출신호를 측정하고자 하였다. 또한 음향방출신호의 특성 비교와 함께 간접적으로 연삭 슷들의 마멸상태를 예측할 수 있는 방안으로 입도에 따른 표면거칠기와 굽힘응력측정으로 그 특성을 파악하고자 하였다.

2. 관련이론

2.1 음향방출신호의 특성

음향방출신호는 일반적으로 재료의 내부 구조의 동적 거동인 소성변형이나 파괴가 일어날 때 탄성에너지가 방출되면서 발생하는 신호이며, 일반적으로 매우 높은 주파수(100 Hz ~ 1MHz) 영역을 갖는다. 측정된 음향방출신호들의 값으로부터 의미 있는 정보를 얻기 위해서는 적절한 신호해석 방법이 필요하다. 해석방법으로는 크게 통계적 해석방법과 스펙트럼 해석방법이 있으며, 통계적 해석방법으로는 실효치 전압, 피크값의 count수 등이 있다. 본 연구에서는 음향방출신호의 실효치 전압으로 해석하였으며, 그 이론은 다음과 같다.

음향방출신호 크기를 해석하는 가장 일반적인 방법은 실효치 전압값이며, 이 값은 AE신호의 에너지량을 표시한다. 실효치 전압은 AE신호의 에너지량을 AE 발생원의 에너지

량으로 해석하는 것으로 수식적으로는 다음과 같다.

$$RMS_{AE} = \left[\frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} V^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

여기서, V(t)는 신호 함수이며, ΔT는 시간이다. 식 (1)로부터 AE신호에 대한 에너지 변화율 $\frac{dE}{dt}$ 는 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{dE}{dt} \propto [RMS_{AE}]^2 \quad (2)$$

2.2 굽힘응력시험

굽힘응력은 시험편을 일정 거리로 배치한 두 지점 위에 놓고 지점 사이의 중앙으로부터 좌우로 일정 거리로 두 점으로 나누어 하중을 가하여 꺾여질 때의 최대 굽힘응력을 말한다. 또한 굽힘응력 분포 분석을 여러 가지 방법으로 사용하지 않지만, 세라믹재료의 굽힘응력 시험은 와이블 플롯(Weibull plot) 분포의 분석을 사용한다. 와이블 활률의 분포도는 고장시간 σ와 누적확률 F(σ)가 직선 관계가 되도록 용지의 가로축과 세로축의 척도를 조정해 놓은 것이다. 와이블분포의 누적분포함수 식 (3)에서 로그값을 취하면 식 (4)를 구할 수 있다.

$$F(\sigma) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{\sigma}{\eta}\right)^m\right\} \quad (3)$$

$$\log(-\ln(1-F(\sigma))) = -m \log(\eta) + m \log(\sigma) \quad (4)$$

식 (4)에서 보면, log(-ln(1-F(σ)))와 log(σ)는 서로 직선 관계임을 알 수 있고, m은 이 직선의 기울기이다. 이 사실을 이용하여 와이블 확률지는 고장시간의 위치가 log(σ)이 되고, 누적확률 F(σ)의 위치가 log(-ln(1-F(σ)))가 되도록 X축과 Y축을 조정해 놓았다. 첫 번째로 n개의 자료가 있을 때 이를 크기순으로 나열하고, σ_(i)를 i번째 순위의 자료라 하며, 자료 σ_(i)에 대응하는 누적확률 F(σ_(i))를 다음 식으로 계산한다.

$$F(\sigma_{(i)}) = \frac{i-0.5}{n}, \quad \text{중간순위} \quad (5)$$

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험 장치

본 실험을 위하여 다이아몬드 슷들을 장착한 범용 수평축

평면연삭(유일공업(주), Korea)를 사용하였다. 슛들의 마멸을 간접적으로 측정하기 위하여 음향방출센서와 측정장치(Physical Acoustics Corp., USA)를 사용하였다. 또한 음향방출센서를 고정용 치구에 장착할 수 있도록 하였으며 그 위에 피삭재를 고정하였다. 음향방출센서에서 나온 신호는 AE mein system과 DAQ board(STR*825)를 거쳐 Sonix 프로그램에 의하여 PC에 저장하였으며 Fig. 1은 본 실험 시스템의 개략도를 나타낸 것이다.

연삭가공면의 가공정밀도를 파악하기 위하여 표면거칠기 측정장치(Mitutoyo, Japan)를 사용하였다. 표면거칠기 측정은 연삭방향으로 3번, 연삭방향의 수직방향으로 3번씩 측정하여 최대표면거칠기(R_{max})값들을 얻었다. 본 실험에서 사용된 평면연삭기 및 측정장치의 제원을 Table 1에 나타내었다.

스들의 마멸상태는 간접적인 방법으로 AE센서를 피삭재

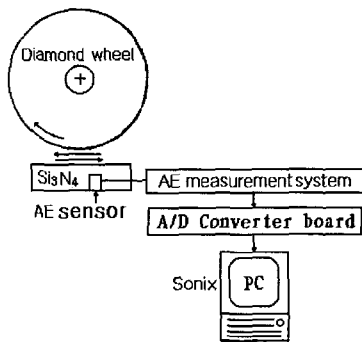


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup with AE measuring system

Table 1 Specifications of surface grinding machine and measuring equipments

Equipment	Model	Manufacturer
Vertical surface grinding Machine	YGS-52A	Youil Machine (Korea)
AE signal measuring system	1200A	Physical Acoustics Corp. (USA)
AE sensor	Micro-100	Physical Acoustics Corp. (USA)
DAQ board	STR*825	Physical Acoustics Corp. (USA)
Surface roughness	Surftest-501	Mitutoyo(Japan)

Table 2 Measuring condition of AE signal

Condition	Value
Sampling rate [Mhz]	3.125
Vertical [V/Div]	0.25
Horizontal [V/Div]	32
Gate length [μ s]	2000
Number of waveform	201

의 밀면에 부착하여 측정하였다. 음향실험장치의 AE센서로 300kHz이상에서 민감한 반응을 보이고 있는 Micro-100을 사용하였다. 연삭가공중 발생하는 AE신호를 주중폭 부에서 약 600배로 증폭하여 PC에 저장하였으며, Table 2는 본 연구에서사용한 AE신호의 측정조건을 나타내었다.

굽힘응력시험은 한국산업규격(KS L1591-1994)의 고기능 요업제품의 굽힘응력 시험방법에 의하여 수행하였으며, 굽힘응력시험을 위한 시편가공은 테이블 이송속도를 10m/min하였으며, 순차적으로 절입깊이를 5 μ m로 연삭가공한 후 최종연삭으로 2 μ m의 절입깊이로 5회 반복가공하여 spark out 하였다. 이러한 방법으로 연삭가공하여 시편의 크기를 3.0 × 4.0 × 38mm로 일정하게 갖도록 시험편들을 제작하였다. 연삭스들 입도를 #60, #200, #400의 다이아몬드스들로 변화하며 실험을 진행하였으며, 각 시편의 모서리를 모떼기한 후 굽힘응력시험을 실행하였다.

3.2 연삭스들 및 피삭재

본 실험에서는 이화다이아몬드(주)에서 주문제작한 것으로 외경 200mm, 폭 10mm인 다이아몬드 슛들로서 입도 #60, 200, 400인 연삭 슛들을 사용하였다. 연삭가공실험을 수행하기 전에 슛들의 진원도를 맞추기 위해 탄화규소스들(GC60M)로 트루잉작업을 하였다. 또한 새로운 연삭입자 날들을 생성하기 위하여 알루미늄스들(WA240-G)로 드레싱 작업을 하였다. 본 실험에 사용한 피삭재들은 쌍용양회(주)에서 제작한 구조용 세라믹스인 Si₃N₄을 사용하였다. 본 실험에 사용한 구조용 세라믹스 Si₃N₄의 기계적인 물성치는 Table 3에 나타내었다.

3.3 실험방법

연삭액은 일반적으로 많이 사용하고 있는 수용성 연삭유(한국 캐스트롤(주), 수용성 2종 1호)를 물에 1/40 비율로 희석하여 사용하였다. 본 실험에서 연삭깊이량을 5 μ m로 일

Table 3 Mechanical properties of Si₃N₄

Workpiece	Si ₃ N ₄
Mechanical properties	
Density [g/cm ³]	3.26
Hardness [kg/mm ²]	1650
Toughness [MN/ m ^{3/2}]	6.0
Working temperature [°C]	1600

Table 4 Truing, dressing and experimental conditions

Truing condition	Grinding wheel	GC60M
	Depth of cut [μ m]	10
	Table speed [m/min]	5
Dressing condition	Grinding wheel	WA240
	Depth of cut [μ m]	30
	Table speed [m/min]	5
Experimental condition	Grinding wheel size(mm)	SDC60R100BG SDC200R100BG SDC400R100BG 200×10×50.8
	Grinding type	Down & up grinding
	Grinding speed [rpm]	3460
	Table speed [m/min]	5, 10, 15
	Depth of cut [μ m]	5

정하게 하여 총제거누적깊이량을 50에서 1000 μ m로 증가하는 트래버스 컷팅형 연삭가공을 수행하였다.

총제거누적깊이량의 변화에 따른 AE신호의 차이와 가공면의 표면거칠기값들을 측정과 비교하여 적절한 재드레싱 시기를 설정하고 다이아몬드 스톨의 형상 변화를 간접적으로 예측하고자 하였다. 스톨마멸에 따른 음향방출신호는 동일한 위치에서 측정되도록 하였으며, 스톨의 마멸에 따라 얻어지는 AE신호들의 RMS값을 구하여 그 평균값으로 특성을 파악하였다. 본 실험에 사용한 트루잉, 드레싱 및 연삭 조건들을 Table 4에 나타내었다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 음향방출신호 해석

테이블 이송속도와 스톨의 입도를 변화시키면서 세라믹

재인 Si₃N₄의 연삭가공실험으로 실시간으로 얻은 음향방출 신호는 전체적으로 고르게 분포하는 연속형의 신호가 얻을 수 있었다. Fig. 2에서 Fig. 6까지는 실시간으로 측정된 음향방출신호값들을 나타낸 것으로, 각각 스톨입도의 변화에 따른 AE신호값들이다. Fig. 2와 Fig. 3은 드레싱 직후 각각 테이블 이송속도가 5m/min와 10m/min인 경우 실시간 측정된 AE신호값들이다. 이 결과들은 드레싱을 실시한 직후

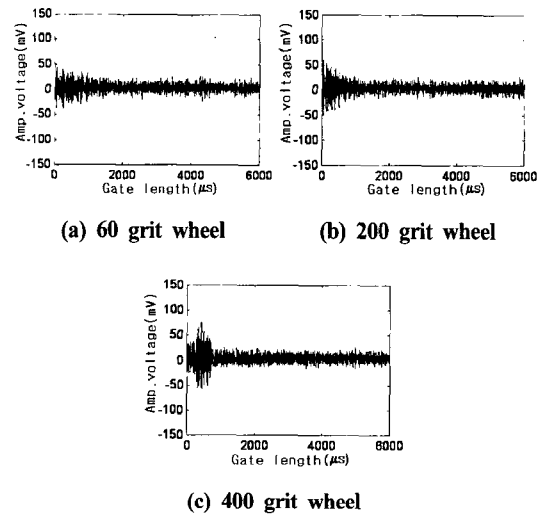


Fig. 2 Measured AE signals for table speed of 5m/min after dressing

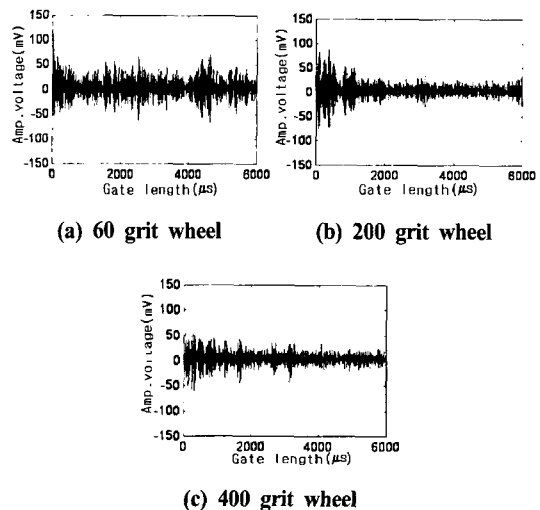


Fig. 3 Measured AE signals for table speed of 10m/min after dressing

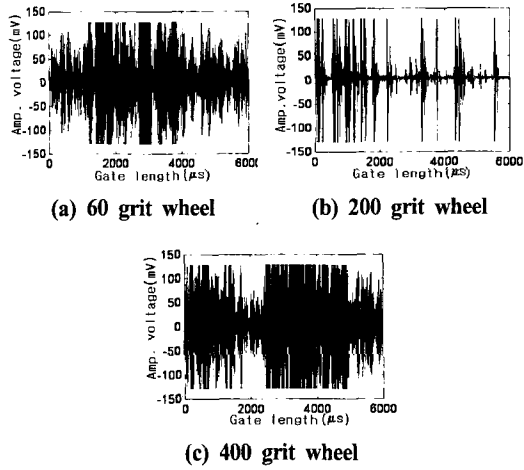


Fig. 4 Measured AE signals for table speed of 5m/min after 800µm

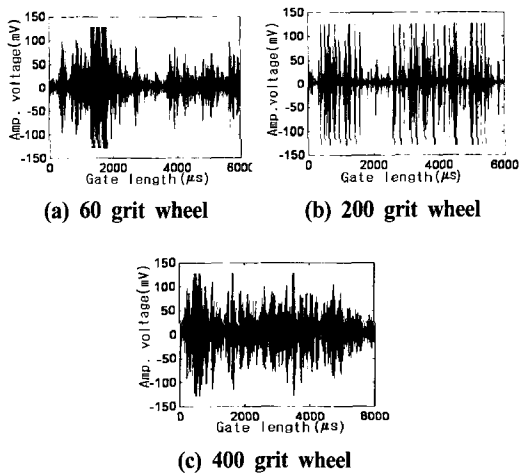


Fig. 5 Measured AE signals for table speed of 10m/min after 800µm

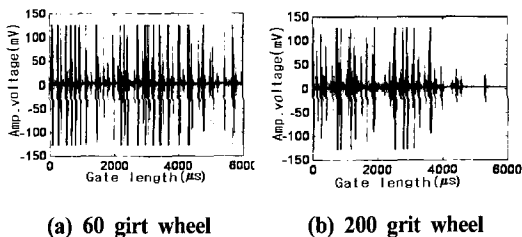


Fig. 6 Measured AE signals for table speed 15m/min after 800µm

연삭가공을 수행하여 얻은 AE신호로 검출된 신호형태가 모두 안정적으로 진폭의 큰 변화가 없는 신호를 나타내고 있었다. Fig. 4에서 Fig. 6까지는 총제거누적량이 800µm인 경우 테이블 이송속도를 5, 10, 15m/min로 변화시켜 연삭가공을 수행한 경우 실시간으로 얻은 AE신호들을 나타낸 것이다. 이들 결과에서는 검출된 AE신호의 진폭이 드레싱 직후보다는 불안정하게 크게 발생하고 있어 연삭가공이 진행함에 따라 슯돌마멸을 검출할 수 있으리라 생각된다. 이러한 현상은 연삭가공이 진행됨에 따라 비정상연삭의 눈막힘과 글레이징이 발생하게 되어 정상연삭상태를 상실하게 되었음을 알 수 있다.

4.2 음향방출신호의 통계적 분석

Fig. 7에서 Fig. 9까지는 음향방출센서로 측정된 AE신호의 RMS값을 총누적제거량에 따라 나타낸 결과들이다.

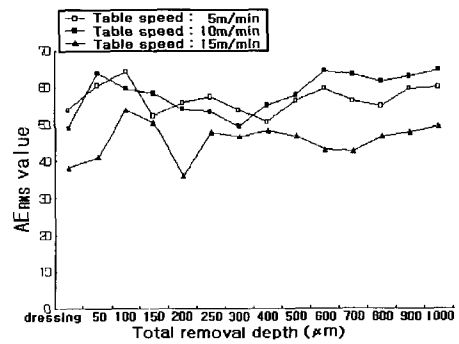


Fig. 7 RMS value of AE signals when 60 grit wheel grinding

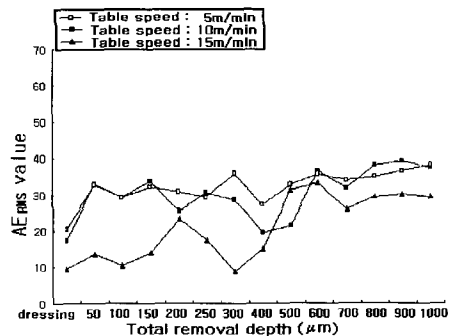


Fig. 8 RMS value of AE signals when 200 grit wheel grinding

Fig. 7은 다이아몬드 슷들의 입도가 #60인 경우 드레싱을 수행한 후 5 $\mu\text{m}/\text{pass}$ 의 연삭깊이로 트레버스 연삭방식으로 계속적으로 연삭가공한 결과 AE신호의 RMS값을 공작물 총누적제거량에 따라 나타난 결과이다. 테이블 이송속도가 5m/min와 10m/min일 때 초기 연삭구간에서 RMS값이 급증하는 경향을 볼 수 있는데, 이런 상태는 드레싱 직후의 불안정한 슷들입자들이 간섭현상에 의하여 탈락되어지기 때문이다. 또한 테이블 이송속도가 10m/min일 때 총제거누적량이 600 μm 에 달했을 때 초기 드레싱 직후의 경우보다 RMS값이 2배 정도 증가하여 재드레싱이 필요한 것으로 사료된다. 이러한 결과는 연삭가공을 계속 진행함에 따라 연삭스틀에 눈막힘이나 눈무덤이 발생하여 AE신호의 RMS값이 큰 변화 추이를 보이는 현상으로 테이블 이송속도가 5m/min의 경우 반드시 10m/min보다 드레싱 효과가 오래 지속될 수 있다는 것은 아니다. 그러나 경우에 따라서는 테이블 이송속도가 5m/min보다 10m/min으로 했을 경우 총제거누적량이 증가되어가도 RMS값의 상승폭이 적게도 나타났다. 이러한 결과는 다량의 연삭유와 주입으로 칩의 배출이 용이해지고 슷들의 눈막힘현상과 연삭늘음에 따른 다이아몬드 슷들의 열화작용이 억제되어 질 수 있기 때문인 것으로 생각된다.

스틀의 입도가 #200일 때 AE신호에 따른 RMS값을 Fig. 8에 나타내고 있다. 전체적으로 총제거누적량 250 μm 일 경우에 RMS값이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 연삭늘음과 칩 포켓에 과다하게 메워져 있던 칩들로 인하여 칩핑 작용보다는 과다하게 발생하는 미끄럼 작용으로 절삭작용이 거의 이루어지지 않는 경우로 생각된다. 또한 총제거누적량이 600 μm 이후에는 슷들전체에 마멸로 인해 RMS값이 계속 증가하는 경향을 나타내고 있었다.

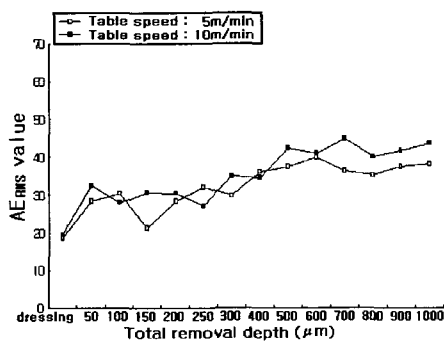


Fig. 9 RMS value of AE signals when 400 grit wheel grinding

Fig. 9는 슷들 입도가 #400일 때 AE신호의 RMS값을 총누적제거량으로 나타낸 것이다. 테이블 이송속도 5m/min에서는 총제거누적량이 150 μm 에서 칩핑작용으로 정상적인 연삭작용이 이루어지지 않으나, 250 μm 에서는 자생작용으로 인해 연삭스틀 가공면 전체에 걸쳐서 새로운 절삭날끝이 돌출되었으며, 총누적제거량이 400 μm 이후는 슷들 전체에 마멸이 이루어지면서 계속적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 한편 이송속도 15m/min에서는 연삭이 불가능하였다.

4.3 표면거칠기 측정

본 실험에서는 슷들마멸상태에 따른 표면거칠기를 측정하기 위해 절삭깊이량을 5 μm 씩 가하는 One-pass 연삭가공을 수행하였으며, 총절삭제거깊이량의 증대에 따른 표면거칠기는 연삭가공 방향의 수직방향으로 측정된 최대표면거칠기(R_{max})값을 Fig. 10에서 Fig. 12까지 나타내었다.

Fig. 10에서는 입도가 #400인 경우 가장 양호한 최대표

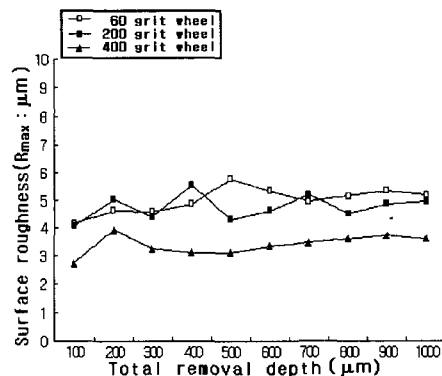


Fig. 10 Surface roughness with table speed 5m/min

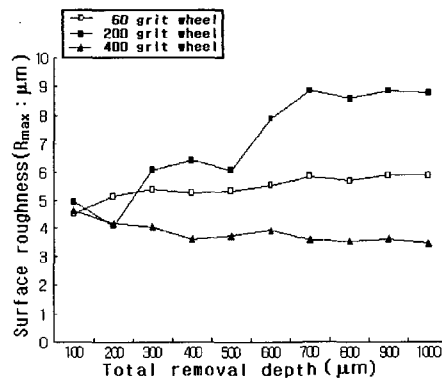


Fig. 11 Surface roughness when table speed 10m/min

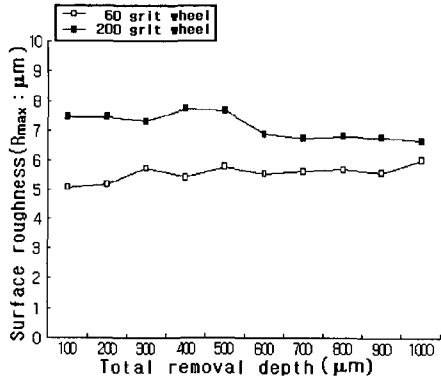


Fig. 12 Surface roughness when table speed 15m/min

면거칠기값을 나타내고 있으나, #60과 #200에서는 그 차이가 명확히 나타나고 있지 않고 있었다. Fig. 11과 Fig. 12에서는 입도 #200일 때가 상대적으로 #60인 경우 보다 최대 표면거칠기가 나쁘게 나오고 있었다. 이것은 공작물 이송속도를 증가시키면서 스톨입자의 연삭깊이가 크게 되어 칩 배출이 곤란하게 되어 일시적인 눈막힘현상이 일어나 연삭능률을 저하시키고, 이 때 연삭 잔재량이 많아지는 현상때문인 것으로 사료된다. 한편 Fig. 11에서는 입도 #400에서 최대 표면거칠기가 가장 양호한 상태로 나타나고 있으나, Fig. 12에서는 앞에서 언급한 것처럼 이송속도 15m/min인 경우 입도 #400인 경우 연삭이 불가능하였다.

4.4 굽힘응력 시험 및 와이블통계 분석

연삭스톨 입도가 높을수록 굽힘응력은 작게 나오고 있는데, 이것은 시편표면에 존재하는 미세균열 때문에 작게 나오고 있기 때문이라고 생각되어진다. 또한 #60보다 #400일 때 편차가 커짐은 신뢰도가 감소한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 앞서 측정값 굽힘응력값들을 와이블분포(Weibull distribution)으로 나타낸 것으로서, 무기재료 또는 분말 조직 즉, 파괴 모드(Fracture mode)에서 변형가공이 일어날 수 있는 것의 파괴 확률이나 다양한 가공 방법에 대한 우위성에 대해서는 평균강도와 표준편차에 및 와이블계수값(m) 등을 기준으로 평가할 수 있다.

입도에 따라 와이블계수값(m)이 #60일 때는 6.91, #200일 때는 5.21, #400일 때는 3.13으로 나타나고 있다. 여기서 입도가 클수록 강도가 작게 나오고 있었으며, 이 현상은 입자의 작은 것으로 가공한 후 입도가 큰 것으로 가공함으로써 기존에 큰 크랙등이 모두 제거하지 못하였기 때문에

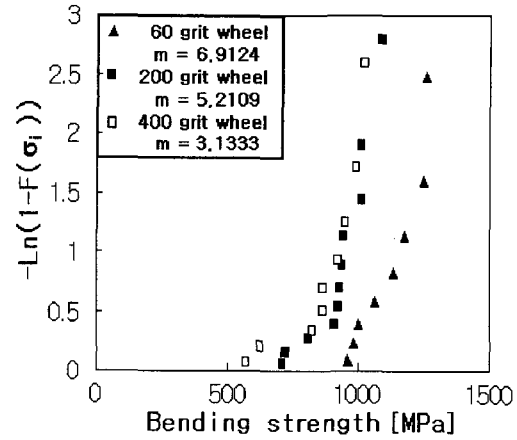


Fig. 13 Weibull plotting graph of bending strength value

재료의 강도가 저하되어진 것으로 사료되지만, 표면거칠기는 좋아짐을 알 수 있다. 이것으로 #400인것보다 #60이 강도와 신뢰도가 증가한다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 구조용세라믹재인 Si₃N₄를 다이아몬드스톨로 평면연삭가공을 수행하면서 실시간으로 음향방출신호를 검출하여 다이아몬드 스톨의 마멸에 따른 재드레싱 시기를 설정할 수 있는 방법을 파악하였으며 또한 스톨마멸에 따른 연삭가공면의 표면거칠기를 측정하여 음향방출신호와 비교함으로써 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 다이아몬드 연삭스톨 입도와 테이블 이송속도를 변화시켰을 경우 대체로 이송속도가 증가될수록 음향방출신호의 RMS값은 낮은 상태를 나타내고 있으며, 또한 입도가 400인 경우 최대표면거칠기도 가장 양호한 결과를 나타내고 있었으나, 입도가 400이고 이송속도가 15m/min인 경우 치핑작용으로 연삭이 잘 이루어지지 않았다.
- (2) 연삭가공한 면의 표면거칠기는 테이블 이송속도가 빠를수록 연삭 깊이가 크게 되어 스톨입자 지름이 작아짐으로써 칩 배출이 어려워 연삭 잔재량이 많아지는 현상으로 인하여 표면거칠기가 나쁘게 나타났다.
- (3) 굽힘응력값들은 스톨입도가 #60보다 #400인 경우 낮게 나타났으며, 표면거칠기는 좋아짐을 확인할 수 있었고, 또한 와이블분포의 형상모수를 비교해 볼 때 #400보다

#60로 연삭한 경우 굽힘응력의 신뢰도는 높게 나타났다.

후 기

본 연구는 2002학년도 경남대학교 학술논문게재연구비 지원으로 이루어졌음.

참 고 문 헌

- (1) Rajmohan, B. and Radhakarishan, V., 1994, "On the Possibility of Process Monitoring in Grinding by Spark Intensity Measurements", *Trans. of ASME*, Vol. 116, pp. 124 ~ 129.
- (2) Dornfeld, D. and Cai, H. G., 1984, "An Investigation of Grinding and Wheel Loading Using Acoustic Emission", *Trans. of ASME*, Vol. 106, pp. 28 ~ 33.
- (3) Inasaki, I., 1985, "Monitoring of Dressing and Grinding Processing with Acoustic Emission Signals", *Annals of CIRP*, Vol. 34, No. 1, pp. 277 ~ 286.
- (4) Murray, M., 1973, "Exploratory Investigation of Laser Methods for Grinding Research", *Annals of CIRP*, Vol. 22, No. 1, pp. 137 ~ 139.
- (5) Matsuo, T., Tonge, M. and Iwasaki, K., 1993, "In-Process Measurements of Progressive Variation of Grinding Characteristics in Constant-Load Heavy Grinding", *Annals of CIRP*, Vol. 42, No. 1, pp. 401 ~ 404.
- (6) Kim, S. C., Jeong, E. S., Kim, T. B., K. Lee, S. E. and So, Y., 2002, "A Study on the Grinding Characteristics of Ceramics", *Trans. of KSMTE*, Vol. 11, No. 3, pp. 86 ~ 92.