

이트리아(Y_2O_3) 세라믹 래핑가공의 AE 신호 분석

차지완*, 황성철*, 신태희*, 이은상⁺
(논문접수일 2008. 11. 06, 심사완료일 2009. 12. 14)

AE Signal Analysis of Yttria(Y_2O_3) Ceramic Lapping Process

Ji-Wan Cha*, Sung-Chul Hwang*, Tae-Hee Shin*, Eun-Sang Lee⁺

Abstract

AE(acoustic emission) sensor has been used for a state monitoring and observation during a ultra-precision machining because AE signal, which has high frequency range, is sensitive enough. In case of ceramic fabrication, a monitoring of machining state is important because of its hard and brittle nature. A machining characteristic of ceramic is susceptibly different in accordance with variable machining conditions. In this study, Yttria(Y_2O_3) ceramic was fabricated using the ultra-precision lapping process with in-process electrolytic dressing(IED) method. And the surface machining characteristic and AE sensor signal were compared and analyzed.

Key Words : Yttria(Y_2O_3), Lapping(래핑), In-process electrolytic dressing(IED, 연속 전해드레싱), AE(acoustic emission, 음향방출)

1. 서론

AE(acoustic emission, 음향방출)는 재료의 응력상태 변화에 따라 재료 자체가 발생시키는 탄성파이며, 가공 중 발생하는 AE 신호를 이용하여 가공 상태 감시 및 관측이 가능하다. AE를 이용한 센서는 자연발생적인 신호나 기계 진동과 같은 신호보다 높은 100kHz ~ 1MHz 주파수 영역대의 신호를 대상으로 하고 있으며, 감도(sensitivity)가 뛰어나 여러 응용환경에서 널리 사용되고 있다.^(1,2)

미세한 재료제거 과정이 일어나는 초정밀 미세입자 가공

에서는 가공 조건에 따라 가공 특성이 민감하게 차이를 보인다. 특히 고경도 취성재료를 가공할 때, 가공 조건에 따른 가공 결과는 재료의 경도 및 인성에 더욱더 민감하게 차이를 보이게 된다.

본 연구에서는 이트리아(Yttria, Y_2O_3) 세라믹의 표면 래핑가공을 실시하였다. 이트리아는 광학, 전자, 반도체 산업에서 사용이 증가하고 있는 세라믹이다. Y_2O_3 는 고온 환경에서도 빛의 투과율이 높고 굴절률도 상대적으로 높아 렌즈, 프리즘의 재료로 응용되고 있으며, Si와의 격자 부적합이 적으며 높은 화학적 안정성으로 인해 단일 트랜지스터 강유전

* 인하대학교 기계공학과 대학원
+ 교신저자, 인하대학교 기계공학과 (leees@inha.ac.kr)
주소: 402-751 인천시 남구 용현동 253

체 메모리(FeRAM)의 MFIS(Metal Ferroelectric Insulator Structure) 구조에서의 버퍼층으로서 주목받고 있다.^(3,4)

이트리아(Y_2O_3)의 표면 래핑가공을 진행하였으며, 특히 고정지립을 이용한 표면가공 중 발생하는 슛들의 결합(loading, glazing)을 방지하고 지속적이고 안정된 가공을 위해 연속 전해드레싱(IED)을 적용한 세라믹 래핑가공을 진행하였다. 주요 가공변수인 작용 하중, 래핑스톨 회전 속도를 변화시켜 가면서 가공특성 및 경향을 분석하였으며, 각각의 가공 조건에 따른 AE 신호를 검출하여 가공 후 표면 특성과 비교 분석하였다.

2. IED 래핑 메커니즘

고경도 취성 재료의 초정밀 표면 경면 가공을 위해 입도 #1000이상의 초지립을 이용한 래핑가공이 널리 쓰이고 있다. 하지만 지속적이고 안정적인 가공을 위해서는 가공시간 증가에 따른 래핑 슛들의 결합을 극복해야 한다. 대표적인 가공 중의 래핑 슛들의 결합은 눈매움(loading)과 날무덤(glazing) 현상이다. 눈매움(loading)은 가공 중 발생하는 칩의 저장 및 배출 장소인 기공에 칩이 막혀서 슛들 표면의 입자 날을 칩이 감싸 버리는 현상으로서 입자 날에 의한 정상적인 제거 가공이 가능하지 못하게 되어 공작물 표면 품질을 떨어뜨리는 현상이다. 또한 날무덤(glazing)은 마모된 입자가 탈락하지 못하고 새로운 입자의 돌출을 방해하여 고속도로 공작물 표면을 마찰시키는 결합이다. 이들을 방지하고 좋은 품질의 공작물을 가공하기 위해서는 드레싱(dressing)이 필수적이다.

연속적이고 안정적인 입자 돌출과 마모된 입자의 탈락을 위해 전해현상을 이용한 연속 전해드레싱(In-process electrolytic dressing) 방법이 제안 되었으며 세라믹과 광학유리 같은 고경도 취성재료의 표면가공에 널리 쓰이고 있다. Fig. 1은 연속 전해드레싱의 원리를 나타낸다.

①초기 트루잉 이후에 래핑 슛들의 표면은 평평한 상태를 유지하게 된다. ②전도성 전해액에 펄스 전류를 인가하게 되면 초기 드레싱이 시작하게 되고 결합제가 용출되면서 다이아몬드 입자가 돌출되고 ③용출된 결합제는 전해액과 반응하여 부도성 산화막을 형성하게 된다. ④이후 래핑 가공이 시작하게 되면 가공 중 마모된 입자가 생기게 되고 부도성 산화막은 래핑 가공 시 칩의 배출과 함께 일부 떨어져 나오게 된다. ⑤산화막의 탈락과 함께 마모된 입자는 탈락하게 되고 다시 결합제의 용출과 함께 새로운 입자가 돌출하게 된다.⁽⁵⁻⁷⁾

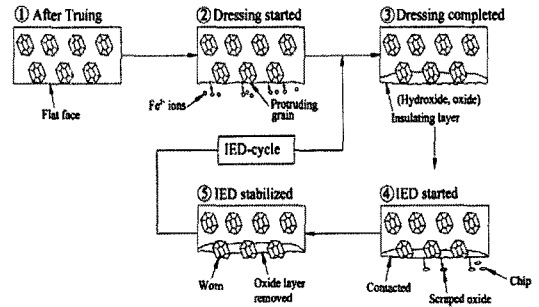


Fig. 1 Principles of the in-process electrolytic dressing

가공 중에 발생하는 슛들의 결합을 방지하고 안정적인 가공을 위한 연속 전해드레싱(IED)은 가공 시간 동안 지속적으로 반복되며 공작물의 표면 품질 향상에 기여하게 된다.

3. Acoustic Emission

3.1 AE sensor

가공 공정에서의 음향 방출(acoustic emission)을 이용한 센서의 응용은 가공 중 발생하는 탄성파를 감지하여 가공물 및 공구 상태 모니터링에 널리 사용되고 있다. AE는 재료 내부의 변형이나 미세한 크랙의 성장, 마찰 및 표면 입자의 마멸 및 파괴 등으로 인한 응력상태의 변화에 따라 탄성파를 방출하는 것으로서 실시간으로 상태 감시 및 관측이 가능하다. AE를 이용한 센서는 100kHz ~ 1MHz 주파수 영역대의 신호를 대상으로 하고 있다. 이는 자연발생적인 신호나 기계 진동과 같은 신호보다 높은 주파수 영역을 형성하므로 가공 상태 모니터링에 이상적인 신호라고 할 수 있다.

AE 센서를 이용한 신호의 검출은 A/D 변환기를 거쳐 전압 값으로 나오게 되는데 이를 유용한 데이터로서 응용을 하기 위해 원 데이터를 실효치(RMS, Root mean square)값으로 변환하여 처리한다. 실효치 값은 탄성파가 갖고 있는 에너지의 진폭으로 정의할 수 있으며, 아래 식 (1)과 같이 정의한다.

$$AE_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} V^2(t) dt} \quad (1)$$

ΔT 는 측정 주기이며, $V(t)$ 는 AE 원 신호를 나타낸다. AE 원 신호와 함께 AE_{RMS} 값의 분석을 통하여 가공물 및 공구 상태 감시가 가능하다.^(1,2)

3.2 래핑가공 중 AE 신호 검출

초지립 메탈본드 래핑 슷돌을 이용한 래핑가공에서 AE 신호가 발생하는 부분은 크게 가공물과 래핑 슷돌이며, 이들의 상호 관계 및 상태에 의해 미약한 신호부터 상대적으로 큰 에너지를 갖는 신호가 발생한다. Fig. 2는 고정지립 슷돌을 이용한 래핑가공 시 발생하는 AE 신호의 원인을 개략적으로 나타낸다.

Fig. 2의 상단 그림은 공작물과 가공입자와의 상호 반응에 의한 AE 신호의 방출을 개략적으로 보여준다. 대표적인 신호 발생의 원인으로서는 공작물 표면으로의 입자 침투에 의한 Cutting 또는 Rolling 크랙 생성 및 전파, 표면층 마모에 의한 칩의 발생, 가공 입자와의 마찰 등이 있다. Fig. 2의 하단 그림은 가공입자 및 래핑 슷돌의 상태변화에 의한 AE 신호의 원인을 나타낸다. 입자 상태에 의한 AE 신호 방출의 요인으로서 가공 중 발생하는 입자의 마모, 입자의 파괴, 마모된 입자의 탈락, 입자와 공작물 사이의 마찰 등이 있으며, 전도성 전해액에 펄스 전류 인가에 의한 결합제 용출 및 가공 중 발생하는 산화막 탈락 현상 등이 있다. 이외에도 눈매움 (loading)과 날무덤(glazing) 현상들과 같은 래핑 슷돌의 결합, 미세 진동이나 슷돌 내부로의 미세 크랙전파와 같은 기

타 여러 요인들이 존재한다.

래핑가공 시 발생하는 AE 신호발생의 원인들은 다양하며 각각의 원인들 마다 발생하는 신호의 진폭 및 주파수는 정도의 차이를 보이게 된다. 안정적이고 최적 상태의 세라믹 래핑가공이 진행되면, 주된 탄성과 방출은 가공입자에 의한 공작물 내부로의 크랙 생성 및 전파, 표면층 마모에 의한 칩의 발생이다. 즉, 래핑 가공 중 재료제거에 관련된 원인이라고 할 수 있으며 낮고 안정적인 진폭을 유지한다.

4. 실험 방법 및 구성

4.1 이트리아(Yttria, Y_2O_3)

고정지립 래핑 슷돌에 의한 세라믹 래핑가공의 공작물로서 이트리아(Yttria, Y_2O_3)를 사용하였다. Table 1은 본 실험에서 사용된 이트리아 시편의 원소 구성비를 나타낸다. 두 원소(Y, O)의 시편 구성 비율은 89.8% 질량비와 97.12% 원자비이며, 순수 이트리아 시편에 근접하다.

래핑가공 실험 전, 압입 경도 시험법에 의해, 시편의 비커스 경도와 파괴인성을 측정하였다. 측정된 비커스 경도는 $HV = 653.91kg/mm^2$ 이며 식 $HV = 1.8544F/d^2$ 에 의해 계산되었다. F는 압입하중이며, d는 압입자극의 대각선 거리이다. 파괴인성 K_{IC} 는 $5.68MPam^{1/2}$ 이며 식 $K_{IC} = 0.203(c/a)^{-2/3} \cdot HV \cdot a^{1/2}$ 에 의해, 측정된 비커스 경도를 이용하여 계산되었다. 여기서 c는 크랙길이의 절반이며 a는 d/2이다.⁽⁶⁾

4.2 가공 조건별 래핑실험

3개의 주요 가공 조건을 변화시키면서 래핑실험을 실시하였다. 가공 변수는 작용하중, 슷돌 회전속도, 가공시간이며 작용하중은 5kgf, 7kgf, 9kgf의 하중을 가하였고, 슷돌 회전속도는 40rpm부터 70rpm까지 10rpm 간격으로 실험을 실시하였다. 가공 시간은 30분으로 하였으며, 총 실험 횟수는

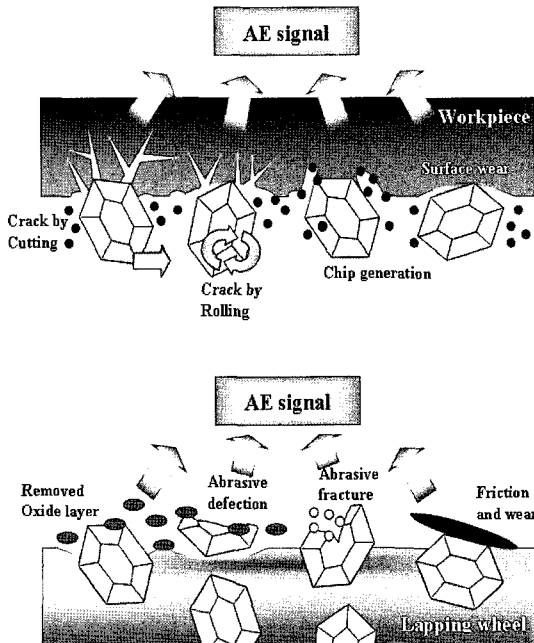


Fig. 2 AE signals by the lapping process

Table 1 Element composition of Y_2O_3

Element	Weight(%)	Atomic(%)
Y	75.02	46.38
O	14.78	50.80
Ir	5.70	1.63
Pb	4.50	1.19
Total	100.00	100.00

각각의 변수를 조합하여 12회를 진행하였다. Fig. 3 실험에 사용된 연속 전해드레싱(IED) 래핑머신이며, Table 2는 래핑머신의 시스템 구성을 나타낸다.

펄스 전류 공급은 최대 전류 25A, τ on/off 시간은 20/10 μ s로 공급하였다. 전해현상을 일으키고 윤활 및 냉각의 역할을 하는 전해액의 조성은 N3용액과 DI water를 1:15의 비율로 조성하였다.

4.3 AE 신호 측정 실험

이트리아 래핑 실험을 진행하면서 AE 센서를 이용하여 가공 중 발생하는 탄성파를 감지하였다. 각각의 가공 조건에 따른 AE 신호 측정을 실시하였으며, 전해드레싱 현상을 일으킨 경우와 가공 중 드레싱을 실시하지 않은 경우에 AE 신호를 검출하여 비교 분석하였다. 이트리아 래핑 AE 신호 측정 실험 실행 과정을 Fig. 4에 나타내었다.

래핑 가공 중 발생하는 AE 원 신호를 전지증폭기의 +60dB 증폭을 거쳐 AE 증폭기(Gain +23dB) 이후, A/D 변환기를 통해 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하여 PC를 통해

신호를 받아 들었다. 샘플링 주파수는 100kHz, 측정 시간은 각 실험 마다 2초간 진행하였다. 입력 전압 범위는 $\pm 5.0V$ 이며, 단위는 mV로 정하였다. 실험 후 얻은 AE 원 신호를 AE_{RMS} 값으로 변환하고, 가공 결과와 비교하여 특성을 비교 분석하였다.

5. 실험 결과 및 분석

5.1 가공 표면 특성

세라믹과 같은 고경도 취성재료의 표면 가공은 가공입자에 의한 표면 크랙의 생성 및 응력 집중 효과에 의한 크랙의 전파/파괴, 표면층 마모에 의한 칩의 발생에 의한 것이다. 표면 가공의 주된 목적은 가공 전보다 향상된 품질의 표면조도를 얻는 것이다. 이트리아 시편의 가공 전 평균 표면거칠기는 $Ra\ 1.5\mu m$ 로 측정되었으며 본 연구에서 실행한 표면 래핑 실험 이후의 표면거칠기(Ra)를 Fig. 5에 나타내었다.

래핑 슷들의 속도를 증가시키면 표면거칠기가 감소하였다. 슷돌회전 속도가 증가하게 되면, 상대적으로 세라믹 표

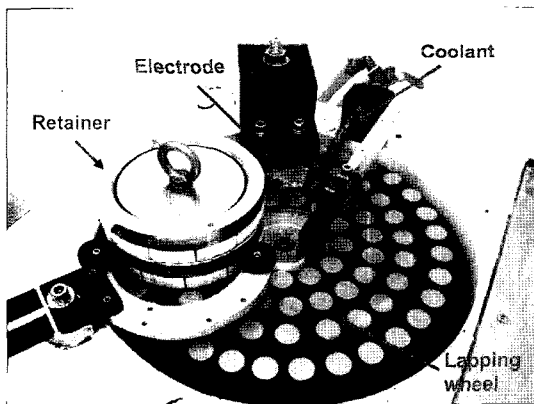


Fig. 3 IED lapping machine

Table 2 System of the IED lapping

Lapping wheel	Cast-iron metal bonded diamond lapping wheel ($\Phi 380 \times W25mm \#4000$)
Power supply	τ on/off (0-999 μ s) voltage (0-90V) peak current I_p (0-30A)
Electrolytic fluid	N3:DI water (1:15)

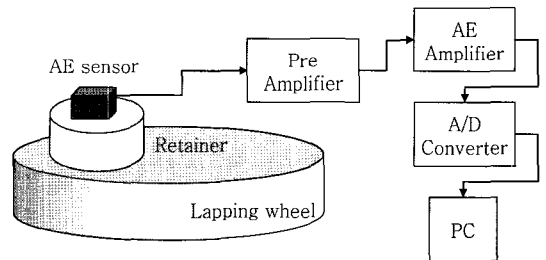


Fig. 4 AE signal measurement

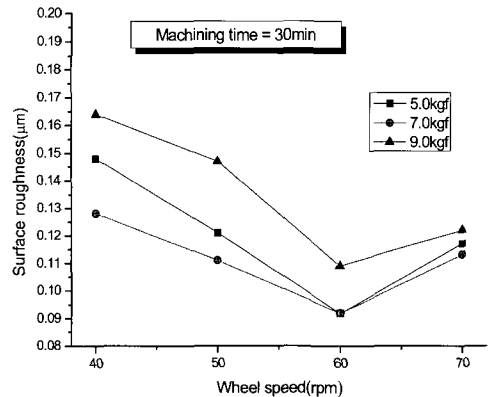
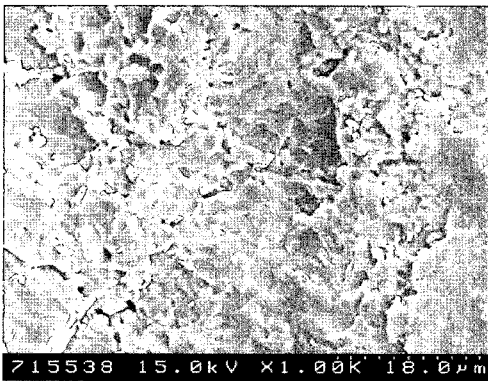


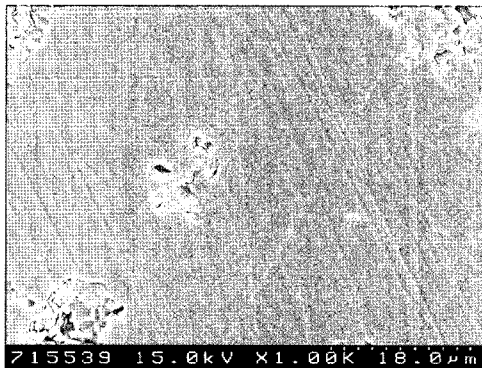
Fig. 5 Surface roughness after lapping

면으로부터 내부로의 크랙 전파가 적은 상태에서 가공이 진행 되게 되어 파괴에 의한 재료 제거보다 표면층 마모에 의한 칩의 발생이 원활히 진행된다. 세라믹 소결입자 사이의 결합력에 의한 저항이 상대적으로 작게 되며 원활한 칩의 배출에 의해 표면거칠기가 감소하게 된다. 하지만 70rpm의 회전속도로 가공 하였을 경우, 표면거칠기가 감소하지 않고 다시 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 회전속도 증가에 따른 동적 불평형 증가와 이에 따른 운동량 에너지 소비 증가에 기인한 것으로 보인다. 이트리아 표면 래핑가공의 경우, 슛돌 회전속도 60rpm에서 가장 작은 표면거칠기를 얻을 수 있었다.

Fig. 6(a)는 세라믹 커팅머신에 의해 잘려진 가공 전 시편 표면의 SEM 사진이며 Fig. 6(b)는 작용하중 5kgf, 슛돌 회전 속도 60rpm, 30분 가공시간 이후의 표면 SEM 사진의 모습이다. 표면 크랙 전파에 의한 파괴 제거보다 표면층 마



(a) Before lapping

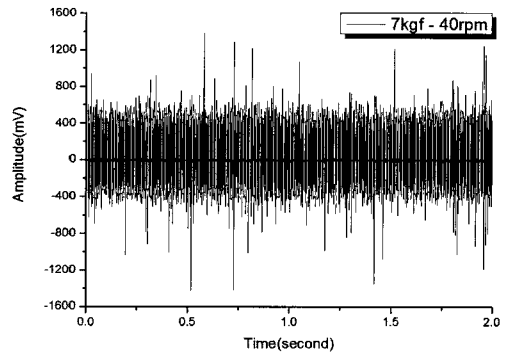


(b) After lapping

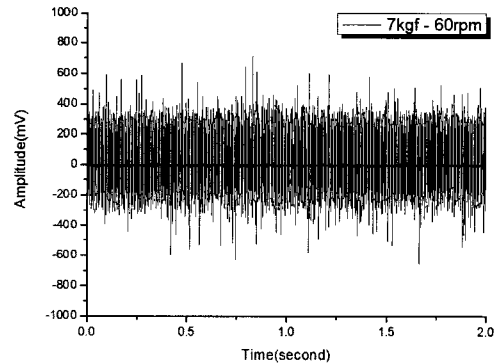
Fig. 6 Surface SEM photo

모에 의한 칩 발생에 의해 가공이 주로 진행되었음을 확인할 수 있다.

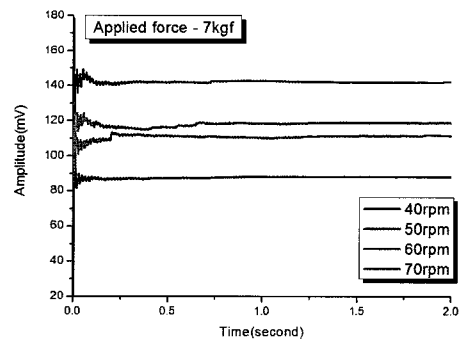
작용하중을 다르게 하였을 경우, 7kgf에서 가장 최적의 표면거칠기를 얻을 수 있었으며, 9kgf 하중에서 가혹조건이



(a) AE raw (7kgf-40rpm)



(b) AE raw (7kgf-60rpm)



(c) AERMS (7kgf)

Fig. 7 AE signal by 7kgf applied force condition

형성되고 있음을 확인할 수 있었다. 하중이 지나치게 가해진 경우에는 입자 침투에 가해지는 힘이 크기 때문에 상대적으로 내부로의 크랙전파가 커지게 되고 입자 회전에 의한 축방향 힘에 대항하는 소결입자들의 저항이 커지기 때문이다. 원활하고 안정적인 가공이 진행되기 위해서는 적절한 하중이 가해져야 하며, 본 연구에서는 7kgf 하중조건과 60rpm 래핑 스톨 회전 속도에서 가장 좋은 품질의 표면거칠기, Ra 92nm 를 얻을 수 있었다.

5.2 AE 신호 분석

래핑가공 실험에서 확인했던 최적 가압조건 7kgf에서의 스톨 회전속도에 따른 AE 원 신호와 원 신호 획득 후, 식 (1)에 의해서 변환된 AE_{RMS} 를 Fig. 7에 나타내었다.

AE 원 신호의 경우, 각각의 스톨 회전속도에서 진폭 $\pm 300\sim 500mV$ 근처의 신호가 감지되었으며, Fig. 7(a), (b)를 비교했을 경우, 60rpm 조건에서 상대적으로 작은 진폭의 신호를 획득하였으며, Fig. 7(c)에서 AE_{RMS} 를 비교 분석한 결과, 스톨 회전속도 60rpm에서 가장 낮고 안정된 AE_{RMS} 값을 얻을 수 있었다. 이는 안정적인 래핑가공이 이루어지고 있음을 나타내며, 상대적으로 크랙전파 정도가 적으므로 표면층 마모에 의한 적은 양의 재료 제거가공이 주로 일어나고 있으며 가공 중 소모되는 에너지가 작다고 해석할 수 있다. 각각의 회전속도 조건에서의 신호는 정도의 차이를 보이고 있으며, AE_{RMS} 의 진폭 및 경향성은 가공 후 표면거칠기와도 일치하는 결과를 보인다.

Fig. 8은 스톨 회전속도 60rpm에서의 작용 하중조건에 따른 AE_{RMS} 를 나타낸다. 7kgf 하중조건에서 가장 낮고 안정된 진폭을 유지하고 있으며, 래핑가공 실험에서 가하 하중조

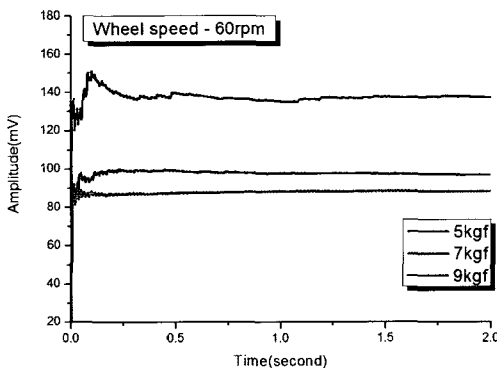
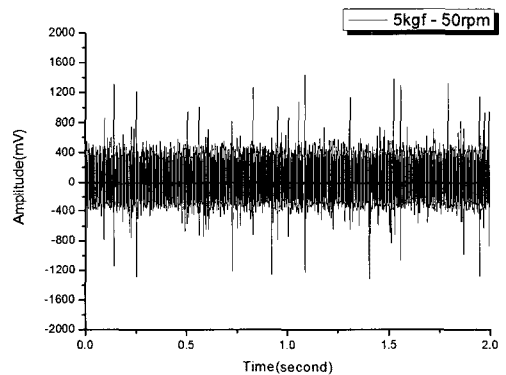


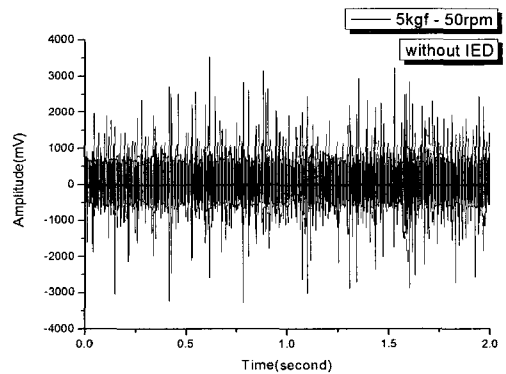
Fig. 8 AERMS by 60rpm wheel speed condition

건이라고 판단했던 9kgf 하중 조건에서 가장 큰 진폭을 얻을 수 있었다. 이는 표면 특성 분석과 마찬가지로 과도한 하중에 의한 크랙전파 증가와 입자 침투 깊이 증가에 따른 축방향 저항증가에 기인한다. 가압 조건에 따른 AE_{RMS} 진폭은 스톨 회전속도 조건에서와 마찬가지로 표면거칠기 결과와 일치하며 7kgf 조건에서 안정적인 가압이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 연속 전해드레싱(IED)이 이루어진 경우와 드레싱 과정이 이루어지지 않은 조건에서의 AE 원 신호를 보여준다. Fig. 9(a)에서 AE 원 신호는 낮고 안정된 진폭을 유지하고 있는 반면, 전해드레싱이 이루어지지 않은 상태로 가공이 진행된 Fig. 9(b)는 상대적으로 큰 진폭을 가진 신호가 검출되고 있음을 볼 수 있다. 래핑스톨의 입자가 정상적으로 제거가공을 진행하지 못하고 있음을 알 수 있으며, 이는 래핑 스톨의 가공 중 결함에 기인한다. 결과적으로, 안정적인



(a) With IED



(b) Without IED

Fig. 9 AE raw signal by 5kgf-50rpm condition

래핑가공이 이루어지고 있지 못함을 AE 신호를 통해 확인할 수 있었다.

회전속도 60rpm 조건(Fig. 10)에서도 마찬가지로 전해드

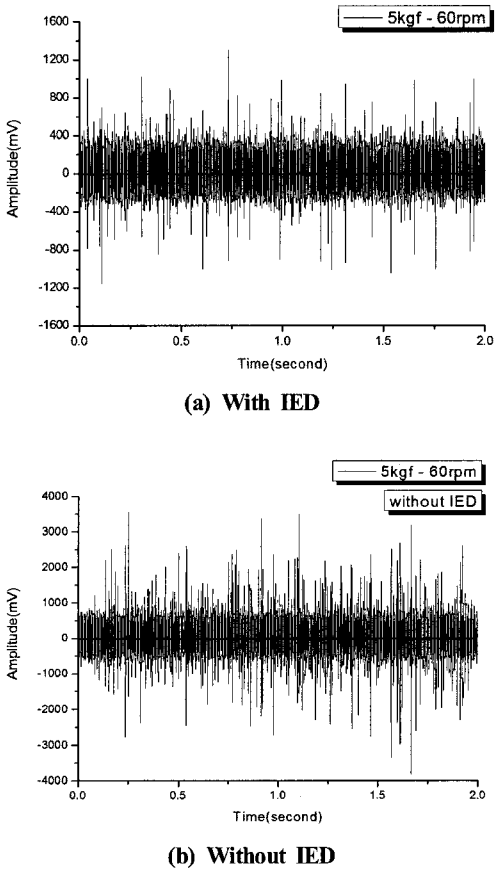


Fig. 10 AE raw signal by 5kgf-60rpm condition

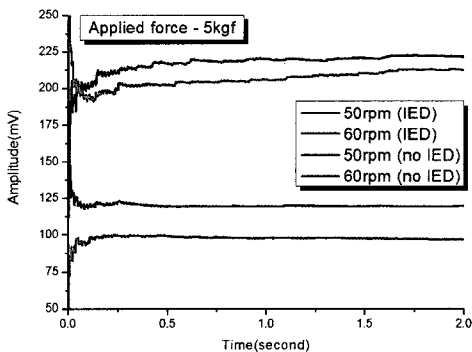


Fig. 11 AERMS (with/without IED)

래싱이 이루어지지 않은 상태에서의 AE 원 신호가 불안정한 모습을 확인할 수 있었으며, Fig. 11에서 각각의 AE 원 신호를 RMS 변환하여 분석해 본 결과에서도 연속 전해드레싱(IED)을 적용한 상태에서의 AERMS보다 상대적으로 높고 불안정한 진폭을 확인할 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 이트리아(Y_2O_3) 세라믹을 초지립 메탈본드 래핑 스톨을 이용하여 연속 전해드레싱(IED) 래핑실험을 실시하였고, 각 가공 조건에 따른 AE 센서 신호 분석을 통해 그 특성을 표면가공 결과와 함께 비교 분석하였다. 결과 분석에 따라 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 이트리아(Y_2O_3) 래핑가공의 최적 표면품질은 래핑스톨 회전속도 60rpm, 작용 하중 7kgf 조건에서 형성되었으며, Ra 92nm의 표면거칠기가 측정되었다. 회전속도 70rpm 조건에서는 동적 불평형 증가에 의해 표면거칠기는 다소 증가하였다. 작용하중 9kgf에서 가장 높은 표면거칠기 결과가 나왔으며 크랙전파 증가에 의한 가혹 조건이 형성됨을 알 수 있었다.
- (2) AE 센서를 이용하여 각각의 가공조건(스톨 회전속도, 작용 하중)에 따라 래핑가공 중 발생하는 AE 신호를 분석하였으며, AE 원 신호와 AERMS의 비교, 분석을 통해 그 결과 값이 래핑가공 표면거칠기 결과와 경향이 일치하고 있음을 확인하였다.
- (3) 연속 전해드레싱(IED)을 실시하지 않은 경우, 상대적으로 높은 진폭의 AE 원 신호가 검출되었고 AERMS 분석 결과에서도 불안정하고 높은 진폭이 형성됨을 알 수 있었으며, 가공 중 발생하는 스톨결함으로 인한 불안정한 표면가공의 영향을 AE 신호를 통해 확인할 수 있었다.
- (4) AE 센서 신호 분석을 통해 가공 조건에 따른 이트리아(Y_2O_3) 세라믹 래핑가공 상태 감시 및 가공경향 파악을 할 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Stephenson, D. J., Sun, X., and Zervos, C., 2006, "A study on ELID ultra precision grinding of optical glass with acoustic emission," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 10,

- pp. 1053~1063.
- (2) Chang, Y. P., Hashimura, M., and Dornfeld, D. A., 1996, "An investigation of the AE signals in the lapping process," *Annals of the CIRP*, Vol. 45, No. 1, pp. 331~334.
- (3) Noboru, I., 1987, *Introduction to Fine Ceramics: Applications in Engineering*, John Wiley & Sons, New York, pp. 43~70.
- (4) Oh, S. Y. and Kang, S. K., 2000, "Characteristics of Y_2O_3 buffer layer in MFIS structure," *Inst. of Ind. Tech. Journal*, Vol. 20, pp. 205~212.
- (5) Katahira, K., Ohmori, H., Uehara, Y., and Azuma, M., 2005, "ELID grinding characteristics and surface modifying effects of aluminum nitride(AlN) ceramics," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, No. 7-8, pp. 891~896.
- (6) Lee, E. S., Won, J. K., Chun, Y. J., Cho, M. W., Cho, W. S., and Lee, J. H., 2007, "Ultra-precision lapping of machinable ceramic Si_3N_4 -BN by in-process electrolytic dressing," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 31, No. 11-12, pp. 1101~1108.
- (7) Hwang, S. C., Kim, B. K., Won, J. K., and Lee, E. S., 2008, "A study on the optimal machining of the IED ultra-precision lapping by Taguchi method," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 17, No. 4, pp. 29~34.
- (8) Hwang, S. C., Lee, J. T., Lee, E. S., Cho, M. W., and Cho, W. S., 2008, "Analysis of surface characteristics in the Si_3N_4/h -BN ceramic by IED ultra-precision lapping," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 25, No. 7, pp. 47~54.
- (9) Kramer, N., 2007, "In-process identification of material-properties by acoustic emission signals," *Annals of the CIRP*, Vol. 56, No. 1, pp. 331~334.