

연삭가공특성에 미치는 연삭입자 최대물림깊이의 영향

김효정*, 허인호**, 우성대***, 이영문****

Effects of the maximum grit depth of cut on grinding characteristics

H. J. Kim*, I. H. Heo**, S. D. Woo*** and Y. M. Lee****

Abstract

In this study, the effects of the maximum grit depth of cut on the grinding characteristics were investigated. They are AE signals produced during grinding processes have been studied to find out the appropriate AE parameters for assessing grinding processes.

SM45C steel has been ground under the conditions yielding removal rate of workpiece, 100, 200, 300 and 400mm³/min, which was achieved by altering workpiece velocity(v) and apparent depth of cut(Z).

According to the experimental results, the value of surface roughness increases but grinding power, energy rate of AE signal(AErms²) and specific grinding energy consumed decrease as increasing the maximum grit depth of cut.

Key Words : maximum grit depth of cut(연삭입자 최대물림깊이), surface roughness(표면거칠기), specific grinding energy (비연삭에너지)

1. 서론

연삭가공공정은 치수정밀도가 요구되는 제품의 제작과 정중 최종단계의 가공공정으로 제품 품질에 큰 영향을 미치기 때문에 이에 대한 연구는 오래전부터 광범위하게 이루어지고 있다. 연삭가공에 대한 연구는 크게 연삭숫돌 입자 경로의 기하학적 해석에 기초한 이론적 연구와 연삭인자들이 표면거칠기 및 치수정밀도에 미치는 영향에 대한 실험적 연구로 대별할 수 있다.⁽¹⁾

연삭인자가 가공표면 품질에 미치는 영향에 대한 연구는 Sato, Shaw, Peters 및 Malkin 등에 의해서 광범위하게 연구되어 왔으며 주요 연삭인자로는 숫돌의 형상, 숫돌의 회전속도, 공작물속도, 연삭깊이, 연삭유, 드레싱 깊이 등이 있다.^(2,3)

한편, 최근 센서 기술의 발달과 함께 가공상태에 대한 감시가 이루어지고 있으며, 특히 AE센서는 연삭가공시 가공 상태와 관련된 유용한 정보를 제공한다고 보고된 바 있다.⁽⁴⁾

* (주) 신도기공
** 경북대학교 대학원 기계공학과
*** 경북공업고등학교
**** 경북대학교 기계공학부

연삭공정에서의 AE를 이용한 연구는 대부분 가공과정의 이상상태나 가공 외적인 요인에 대한 감시와 연삭깊이, 공작물속도와 같은 연삭조건과 AE 신호와의 관계를 규명하고 있다.⁽⁵⁻⁷⁾

본 연구에서는 연삭가공의 고정밀화와 고능률화를 기할 수 있는 연삭방안을 정립하기 위하여 단위시간당 연삭량이 일정한 조건하에서 연삭조건에 따른 연삭입자의 최대 물림깊이, g를 결정하고 g의 변화에 따른 표면거칠기 및 치수정밀도의 변화를 조사하고, 연삭저항을 측정하여 각 조건에서의 비연삭에너지 값을 비교하였다. 또한 연삭가공시 발생하는 AE신호에 대한 분석을 통하여 연삭상태에 대한 효율적인 감시 및 평가방안을 모색하였다.

2. 연삭입자의 최대물림깊이

연삭가공은 절삭가공과는 달리 수많은 연삭입자에 의해서 이루어진다. 실제로 스톱표면에 분포하고 있는 연삭입자들은 서로 높이가 다르고 입자들의 간격도 일정하지 않으나 연삭입자의 높이와 간격이 일정하다고 가정하면 평면연삭시 단일 연삭입자의 연삭경로는 Fig. 1에 나타낸 바와 같다.⁽¹⁾

그림에서 연삭입자의 최대물림깊이(maximum grit depth of cut), g는 \overline{BC} 로 표시되며 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$g = \overline{O'C} - \overline{O'B} = \frac{D}{2} - \overline{O'B} \quad (1)$$

삼각형 OO'B에서 \overline{OB} 는 스톱반경 (D/2)으로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. $\overline{OO'}$ 는 연삭입자당 이송 s를 나타낸다.

$$\overline{O'B} = \left[\left(\frac{D}{2} \right)^2 + s^2 - sD \cos \xi \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

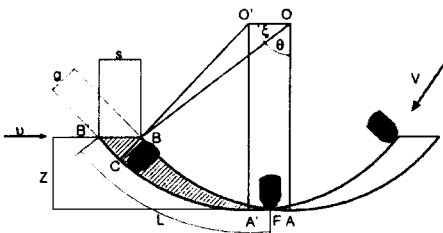


Fig. 1 Cutting path in surface grinding

그림에서 $\xi + \theta = 90^\circ$ 이므로, 식 (2)는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{O'B} = \left[\left(\frac{D}{2} \right)^2 + s^2 - sD(1 - \cos^2 \theta)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

한편, $\cos \theta = 1 - \frac{2Z}{D}$ 이므로 식 (3)은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{O'B} = \frac{D}{2} \left[1 - \left\{ \frac{8s}{D} \left(\frac{Z}{D} \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{Z}{D} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{4s^2}{D^2} \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

식 (4)에서 괄호내의 두 번째 항은 첫 번째 항에 비해 훨씬 작으며 이를 무시하여 식 (4)를 식 (1)에 대입하면 연삭입자의 최대물림깊이 g는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있고, $Z/D \ll 1$ 이므로 g는 근사적으로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$g = 2s \left(\frac{Z}{D} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{s^2}{D} \quad (5)$$

연삭입자당 이송 s는 연속절삭날이 이동하는 시간 ($\frac{a}{v}$)과 공작물속도 (v)와의 곱이므로 식(5)는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$g = 2a \left(\frac{v}{V} \right) \left(\frac{Z}{D} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{a^2}{D} \left(\frac{v}{V} \right)^2 \quad (6)$$

식 (6)에서 두 번째항은 첫 번째 항에 비해 훨씬 작아서 무시하면 연삭입자의 최대물림깊이 g는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$g = 2a \frac{v}{V} \left(\frac{Z}{D} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

식 (7)에서 a는 연삭입자 간격으로서 연속절삭날 간격 (successive cutting point spacing)이라 불리우며 실험적으로 결정되는 값이다.

3. 연삭과정에서의 AE 생성

음향방출(Acoustic emission, AE)은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 재료에 외력이 작용하여 내부구조가 변화할 때 변형에너지(strain energy)의 갑작스런 방출로 인해 생성되는 탄성응력파(elastic stress wave)로 정의된다. 발생된 응력파는 재료표면에 전달되어 변위를 발생시키고 AE센서

4. 연삭실험

4.1. 연삭입자의 최대물림깊이의 결정

식 (7)에서 나타낸 바와 같이 연삭입자의 최대물림깊이, g 는 여러가지 연삭 파라미터에 의해 결정되며 이중 연속 절삭날간격 a 는 실험적으로 결정되는 값이다.

연속절삭날 간격 a 는 스톨표면상의 단순히 이웃하는 연삭입자의 평균간격 (w) 이 아니고 Fig. 3에서 보는 바와 같이 스톨표면상에서 스톨회전방향의 동일원주상에 정렬하고 있는 연삭입자 사이의 간격으로 다음과 같이 구할 수 있다.

Fig. 4는 평균입자간격 w , 연속절삭날 간격 a 및 연삭입자에 의해 연삭된 평균간격 b 의 기하학적 관계를 나타낸 것으로, a 는 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

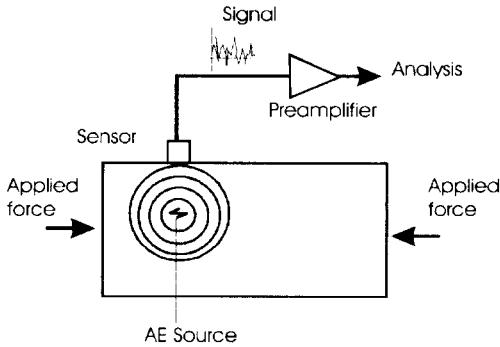


Fig. 2 Basic principle of the acoustic emission

에 내장된 압전형변환소자(piezoelectric transducer)에 의해 전기적 신호로 변환되어 감지된다.

재료의 내부구조 변화는 소성변형, 파괴, 균열의 진전, 피로, 상변태에 기인하며 이중 연삭과정에서 AE의 주된 근원은 연삭칩 생성과정시의 전단소성변형이다.

실제 연삭가공시 발생하는 AE신호는 200kHz에서 2MHz의 고주파 신호이므로 전체 파형을 기록하여 분석하기에는 많은 어려움이 있으므로 미리 설정한 파형인자들을 추출하여 시험데이터를 분석하는 것이 일반화 되어 있으며, 대표적 인자로서 최대진폭(peak amplitude), 상승시간(rise time), 지속시간(duration time), AE energy 및 AErms등이 있다. 이 중에서도 가공특성을 나타내는데 가장 유용한 인자는 AErms라고 보고된 바 있다.¹⁸⁾

AE근원에서의 에너지 변화를 나타내는 AE신호의 에너지 $U(t)$ 는 식 (8)과 같이 정의된다. 또한 AE에너지의 척도로서 AErms값이 사용되며 식 (9)와 같이 정의된다.

$$U(t) = \int_0^{\Delta t} V^2(t)dt \quad (8)$$

$$AErms = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} V^2(t)dt} \quad (9)$$

여기서,

$V(t)$: 신호함수

Δt : 샘플링주기 이다.

식 (8) 및 (9)로부터 시간에 대한 AE신호의 에너지 변화를 $\frac{dU}{dt}$ 는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dU}{dt} \propto AErms^2 \quad (10)$$

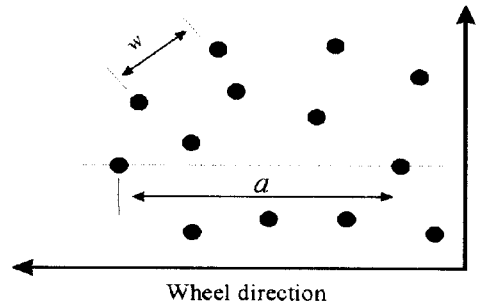


Fig. 3 Average cutting point spacing(w) and successive cutting point spacing(a) of abrasive grains

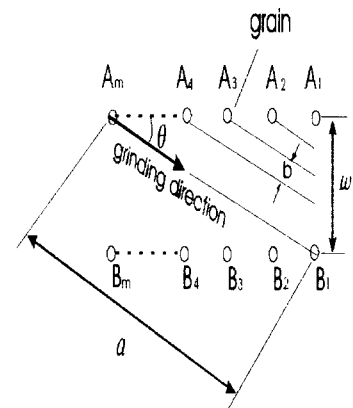


Fig. 4 Relation between average cutting point spacing(w) and successive cutting point spacing(a)

$$a = w^2 / b \tag{10}$$

식 (10)에서 보는 바와 같이 연속절삭날 간격 a 는 ω 와 b 를 측정함으로써 구할 수 있다.

본 연구에서 절삭날의 평균간격 w 는 슷돌표면을 공구 현미경으로 관찰하여 단위면적내에 존재하는 연삭입자의 수, N 을 측정함으로써 식(11)에 의해 구하였다.

$$w = \frac{1}{\sqrt{N}} \tag{11}$$

또한 공구현미경에 의한 관찰을 통하여 연삭흔적의 평균간격 b 를 구하였다.

4.2 연삭조건 설정

연삭실험은 연삭량에 따른 표면거칠기 및 연삭성능을 평가하고 연삭입자의 최대물림깊이에 따른 표면거칠기 및 연삭성능을 평가하기 위하여 단위폭당, 단위시간당 연삭량이 일정한 조건에서 행하였다.

Table 1은 본 실험의 실험조건을 나타내고 있다. 연삭조건으로는 단위폭당, 단위시간당 연삭량 vZ 가 100, 200, 300 및 400mm³/min인 조건에서 연삭입자의 최대물림깊이가 0.5~2.5 μ m범위가 되도록 공작물 이송속도 v 와 겹보기 연삭깊이 Z 를 결정하였다. 표에서 연삭입자의 최대물림깊이 g 는 각 연삭량에 따른 공작물속도 v 와 겹보기 물림깊이 Z 및 식 (10)에 의해 결정된 연속절삭날간격 a 에 따라 식 (7)에 의해서 결정하였다.

주축의 회전속도는 3450rpm으로 일정하게 하였다.

4.3 연삭시편 및 연삭스돌

실험에 사용된 연삭시편은 기계구조용 재료로 널리 사용되는 SM45C로 연삭가공폭이 9mm, 가공길이 80mm가 되도록 제작하였다.

사용된 연삭스돌은 WA계 연삭스돌로서 입도(46), 결합도(K), 조직(7), 결합제(V), 직경 180mm, 폭 13mm이었다.

4.4 실험장치 및 실험방법

Fig. 5는 본 실험에 사용된 실험장치의 개략도를 나타낸 것으로 연삭기는 스피들 모터동력이 1.5kW인 평면 연삭기(Youil, YGS52A)를 사용하였고, AE센서로는 WD(PAC, AD31)센서를 사용하였다.

매 연삭실험에 앞서 0.02mm깊이로 드레싱을 하고 시험편의 가공부위를 예비연삭한 후, 연삭스돌을 이용하여

Table 1 Experimental conditions

vZ (mm ³ /min)	100	200	300	400
	v (m/min) g (μ m)	v (m/min) g (μ m)	v (m/min) g (μ m)	v (m/min) g (μ m)
Z (μ m)				
5	20 1.117			
10	10 0.790	20 1.579		
15	6.7 0.648		20 1.934	
20	5 0.558	10 1.117	15 1.675	20 2.233
25		8 0.999		16 1.998
30			10 1.368	
40		5 0.790		10 1.579
50			6 1.059	8 1.413

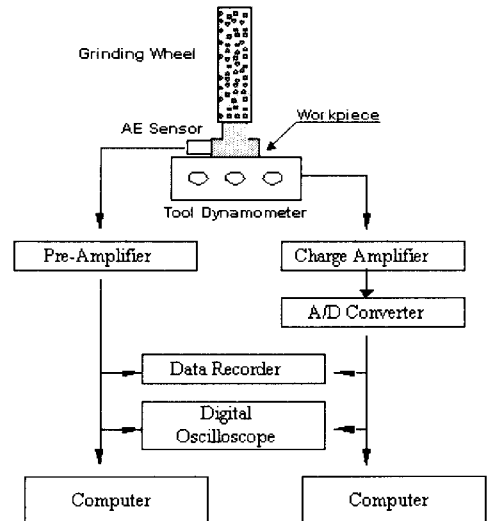


Fig. 5 Experimental setup

공작물속도를 5~20m/min으로, 연삭깊이를 5~50 μ m로 변화시켜 건식실험을 행하였다. 연삭가공시 연삭저항은 공구동력계(Kistler, 9251A), 전하증폭기(Kistler 5007), A/D

변환기(DT3831-G)를 통하여 마이크로 컴퓨터에서 분석하였다. AE신호를 측정하기 위한 AE장비는 MISTRAS를 사용하였으며, AE센서는 신호획득을 용이하게 하기 위하여 공작물 옆면에 부착하였다. 한편, 소음을 제거하기 위하여 preamplifier (PAC, 1220A)내에 100~1200kHz 대역통과필터(band pass filter)를 내장하여 사용하였고, 공회전시의 신호특성을 고려하여 preamplifier의 gain값은 40dB로 하였다. 그리고, AE파라미터의 분석시 소음의 영향을 최소화하기 위하여 문턱값(threshold)을 45dB로 설정하였으며 전달된 AE신호는 DSP보드가 내장된 마이크로 컴퓨터에서 분석하였다.

표면거칠기(R_a)는 연삭방향으로 표면조도기(Mitutoyo, surfstest500)를 사용하여 각각 5회 측정하여 그 평균값을 구하였다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 표면거칠기

Fig. 6은 단위시간당 연삭량 vZ 를 100, 200, 300 및 400mm³/min인 조건에서 연삭입자의 최대물림깊이에 대한 표면거칠기(R_a)의 변화를 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 연삭입자의 최대물림깊이 g 는 단위시간당 연삭량이 증가함에 따라 커지는 경향을 나타내고 있으며, 단위시간당 동일한 연삭량일 경우 연삭입자의 최대물림깊이가 커짐에 따라 표면거칠기 R_a 값은 증가하는 경향을 나타내고 있다.

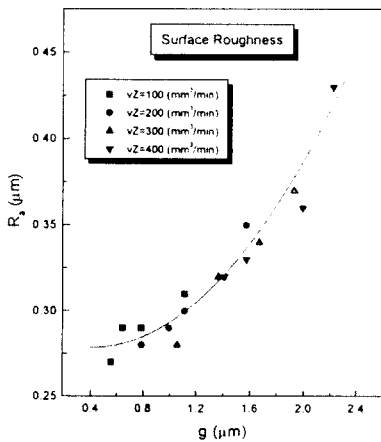


Fig. 6 Surface roughness, R_a variations vs. maximum grit depth of cut, $g(\mu m)$

연삭입자의 모양이 일정하다고 가정하면 표면거칠기는 연삭입자의 물림깊이에 영향을 받는다고 할 수 있다. 연삭입자의 물림깊이가 커질수록 공작물 표면에는 깊은 굴곡이 생기게 되고 이로 인해 표면거칠기 값이 커진다고 판단된다.

즉, 그림에서 보면 연삭입자의 최대물림깊이, g 가 커짐에 따라 표면거칠기, R_a 는 지수함수적으로 증가하는 것을 나타내고 있으며, 이는 표면거칠기가 연삭입자의 최대물림깊이에 크게 의존함을 나타내는 것이다.

5.2 연삭동력과 비연삭에너지

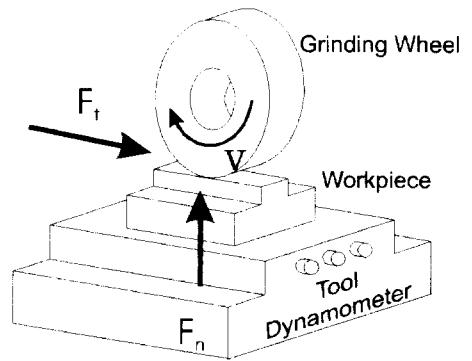
연삭작용에 의하여 슷돌과 공작물 사이에 저항이 발생하며, 평면연삭시 슷돌에 대한 공작물의 저항은 Fig. 7에서와 같이 접선분력, F_t 와 수직분력, F_n 으로 나타낼 수 있다. 연삭동력은 식 (12)에 나타낸 바와 같다.

$$P = F_t \cdot V \tag{12}$$

Fig. 8은 단위시간당 연삭량 vZ 를 100, 200, 300 및 400mm³/min인 조건에서 연삭입자의 최대물림깊이에 대한 연삭동력의 변화를 나타낸 그림이다.

그림에서 보는 바와 같이 단위시간당 연삭량 vZ 가 100, 200, 300 및 400mm³/min인 조건에서 연삭동력은 연삭입자의 최대물림깊이가 커짐에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 연삭에서의 치수효과(size effect)⁹⁾에 기인한다고 생각된다.

비연삭에너지는 연삭성능을 평가하는 기준으로 널리 사용되고 있는 파라미터로, 연삭동력을 단위시간당 연삭량



F_t : Tangential force
 F_n : Normal force
 V : Grinding wheel velocity

Fig. 7 Grinding forces

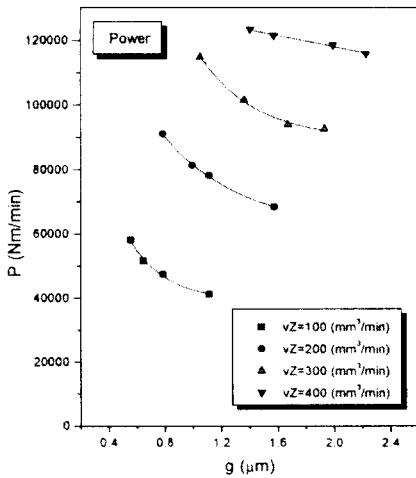


Fig. 8 This diagram is compared power (P) with maximum grit depth of cut (g)

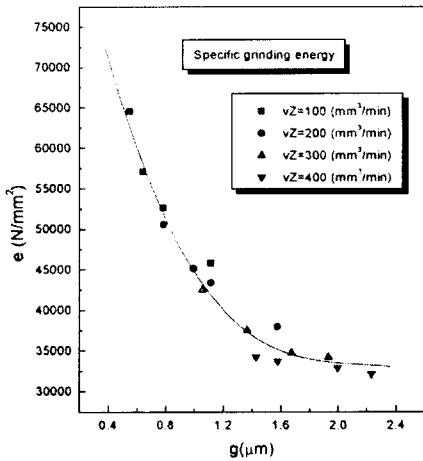


Fig. 9 This diagram is compared specific grinding energy (e) with maximum grit depth of cut (g)

으로 나눈 값으로 식 (13)과 같이 정의된다.

$$e = \frac{F_t V}{bvZ} \quad (13)$$

e : 비연삭에너지 (N/mm^2) F_t : 접선분력(N)
 V : 스톨회전속도(m/min) b : 연삭폭(mm)
 v : 공작물속도(m/min) Z : 연삭깊이(μm) 이다.

Fig. 9는 단위시간당 연삭량 vZ 가 100, 200, 300 및 400 mm^3/min 인 조건에서 연삭입자의 최대물림깊이에 따른 비연삭에너지의 변화를 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 단위시간당 연삭량이 일정할 경우 연삭입자의 최대물림깊이가 커질수록 비연삭에너지는 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 연삭저항에서와 같이 치수효과(size effect)에 의한 것으로, Shaw는 연삭과정에서 단일 연삭입자를 통한 실험으로 이를 입증한 바 있다.^[10]

5.3 AE신호

Fig. 10은 단위시간당 연삭량 vZ 가 100, 200, 300 및 400 mm^3/min 인 조건에서 연삭입자의 최대물림깊이에 따른 AE신호의 에너지 변화율인, $AErms^2$ 의 변화특성을 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 $AErms^2$ 의 값은 단위시간당 연삭량이 클수록 큰값을 나타내고 있으며, 연삭량이 일정한 경우 연삭입자의 최대물림깊이가 커짐에 따라 $AErms^2$ 은 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 실험결과는 연삭입자의 최대물림깊이에 따른 연삭동력의 변화특성과 같은 경향을 보이고 있다.

즉, $AErms^2$ 은 연삭입자의 최대물림깊이 g 가 커짐에 따라 연삭동력과 같은 경향을 보이고 있으므로 AE신호에 의한 연삭공정 감시가 가능함을 나타내고 있으며, AE신호에 의한 연삭공정감시의 신뢰성을 더해주고 있다.

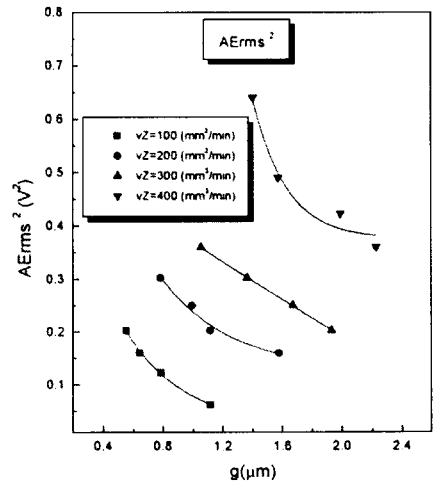


Fig. 10 This diagram is compared $AErms^2$ values with maximum grit depth of cut (g)

6. 결 론

본 연구에서는 연삭입자의 최대물림깊이에 따른 연삭가공면의 표면거칠기 및 비연삭에너지의 변화특성을 조사하고, 연삭가공특성을 평가하기 위하여 AE신호에 대한 고찰을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 표면거칠기값은 연삭입자의 최대물림깊이, g 가 커질수록 증가한다.
- (2) 비연삭에너지는 단위시간당 연삭량이 커질수록 감소하는 경향을 나타내며, 단위시간당 연삭량이 일정한 조건에서는 연삭입자의 최대물림깊이, g 가 커질수록 감소한다.
- (3) AE신호의 에너지 변화율 $AErms'$ 은 단위시간당 연삭량이 일정한 조건에서 연삭입자의 최대물림깊이, g 가 커질수록 감소한다.

참 고 문 헌

- (1) S. Malkin, "Grinding Technology : Theory and Application of Machining with Abrasives", Ellis Horwood Limited, 1990, Chapter 1-3.
- (2) K. Sato, "On the Surface Roughness in Grinding" Technol. Reports of the Tohoku University, 20, 1955, pp.59~70.

- (3) M. C. Shaw, "Interpretation of Grinding Data" Carnegie Mellon Univ. 1971.
- (4) I. Inasaki, K. Okamura, "Monitoring of dressing and grinding processes with acoustic emission signals" Ann. CIRP 1(25), 1977, pp.277~280.
- (5) T. Blum, D. Dornfeld, "Grinding process feedback using acoustic emission" Proc. of 4th Int. Grind. Conf., 1990, MR90-525.
- (6) W. Konig, T. Klumpen, "Monitoring and sensor concepts for higher process reliability" Proc. of 5th Int. Grind. Conference, 1993.
- (7) M. Wakuda, I. Inasaki, K. Ogawa, T. Matsumoto, "Monitoring of grinding process with and AE sensor integrated CBN wheel", J. of Advan. Auto. Tech., Vol. 5, No. 4, 1993, pp.179~184.
- (8) Elijah. Kannatey-Asibu. Jr, D. Dornfeld, "Quantitative Relationships for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting" Trans. ASME, 103, 1981, pp.330~340.
- (9) W. R. Baker, E. R. Marshall, M. C. Shaw, "The Size Effect in Metal Cutting" Trans. ASME, Vol. 74, 1952, pp.61~72.
- (10) J. N. Brecker, M. C. Shaw, "Specific Energy in Single Point Grinding" Annals of the CIRP, Vol. 23, No.1, 1974, pp.93~9.