

## CBN 연삭입자크기에 따른 비연삭에너지 특성

이영문\*(경북대 기계공학과), 배대원, 이현구, 장준호,  
황근식, 손성필(경북대 대학원 기계공학과)

### Characteristics of specific grinding energy depending on grain size of CBN

Y. M. Lee(Mech. Eng. Dept., KNU), D. W. Bae, H. G. Lee,  
J. H. Jang, K. S. Hwang, S. P. Son(Mech. Eng. Dept., KNU)

#### ABSTRACT

As a new approach to analyze grinding energy, this paper introduces a specific grinding energy model based on the average grain. Using this model, grinding characteristics such as specific grinding energy of SM45C were investigated with changing variables such as grain size of CBN, workpiece velocity( $v$ ) and apparent depth of cut( $Z$ ) in down-surface grinding. From the experimental results, the specific grinding energy decreases as the maximum undeformed chip thickness increases.

**Key Words** : English Key Word: Average grain (평균입자), Specific grinding energy (비연삭에너지), Maximum undeformed chip thickness (최대미변형칩두께), Down-surface grinding (하향평면연삭)

#### 1. 서론

연삭가공은 수많은 연삭입자에 의한 고속절삭으로 경질재료에서 연질재료까지 가공할 수 있으며, 절삭가공에 비해 상당히 작은 절입깊이를 사용하므로 형상 및 가공정도가 높고 가공품위와 표면거칠기가 양호한 가공법이다.

하지만 최종 공정으로 가공 품질을 높이기 위해서는 연삭숫돌, 드레싱조건, 연삭조건등의 연삭가공 파라미터를 정량화할 수 있는 방안이 필요하다. 연삭기구에 대한 연구로는 가공품질에 영향을 미치는 중요한 인자인 숫돌의 기하학적 형상, 숫돌의 속도, 공작물 속도, 연삭깊이, 연삭유제, 드레싱 깊이 등에 관한 것이 있으며, 연삭가공 표면 상태에 대한 연구로는 평면연삭에서 가공중에 일어나는 공작물의 열변형과 열손상들에 대한 연구가 이루어지고 있다.<sup>(1)</sup>

연삭공정은 불균일한 연삭입자의 형태, 연삭입자의 간격 등 그 복잡성으로 인하여 해석이 어려우며, 연삭가공특성의 일반적인 평가기준을 제시하지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 연삭가공의 고정밀화와 고능률화에 기여할 수 있는 연삭가공 방안을 정립하기

위하여 연속절삭날 간격,  $a$ 와 연삭공정의 기하학적인 관계로부터 연삭공정의 최대물림깊이( $h_{max}$ )를 결정하고, 평균입자모델의 평균미변형칩두께에서 얻어지는 절삭력으로부터 정량적인 데이터를 확보하여 연삭공정의 반경방향과 접선방향의 평균힘을 구하고, 열처리 유무와 연마입자 크기에 따른 SM45C강의 비연삭에너지 특성에 대해 분석·고찰하였다.

#### 2. 평균입자연삭모델

Fig. 1(a)와 같이 실제 연삭입자는 불규칙 형상의 다면체이고, 그림에 나타낸 것과 같이 절삭점(cutting points)들이 연결되어 다수의 절삭날(cutting edges)을 형성하고 있다. 본 연구에서 평균입자연삭모델을 정의하기 위하여 연삭입자를 기하학적으로 단순화하여 연삭입자의 형상을 구형(sphere)으로 가정하고, 절삭날(cutting edge)도 구의 단면인 임의의 원호로 구성되어 있다고 가정하였다.

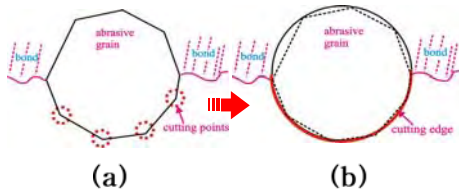


Fig. 1 Shape and cutting edge(bold line) of an abrasive grain (a) real shape (b) idealized shape.

## 2.1 최대미변형칩두께

Fig. 2는 균일형상·분포 연삭숫돌에 의한 평면하향연삭공정에서 공작물이 이송하는 것을 대신하여 연삭숫돌이 연삭작용을 하는 입자당 Sa만큼 이송하면서 회전할 때 연삭입자의 절삭경로를 나타낸 것이다.<sup>(2)</sup> 그림에서 연삭입자의 최대미변형칩두께(maximum undeformed chip thickness),  $h_{max}$ 는  $\overline{AC}$ 로 표시되며 근사적으로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(3)</sup>

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

여기서, a는 연삭숫돌의 연속절삭날간격(successive cutting point spacing)이며, v는 공작물속도, V는 연삭숫돌의 원주속도, Z는 연삭깊이, 그리고 D는 연삭숫돌의 직경을 나타낸다.

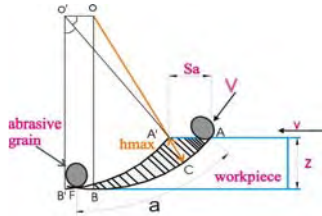


Fig. 2 Cutting path in down-surface grinding process.

## 2.2 평균입자모델에 의한 평균미변형칩두께, $h_{av}$ 및 평균연삭단면적, $A_a$

본 연구에서는 연삭특성 평가를 위해 평균입자모델에 의한 평균미변형칩두께( $h_{av}$ )를 설정하였다. 실제 연삭입자들은 불규칙한 다면체 형상을 나타내고 있지만, 구(sphere)의 형상으로 가정하였다.

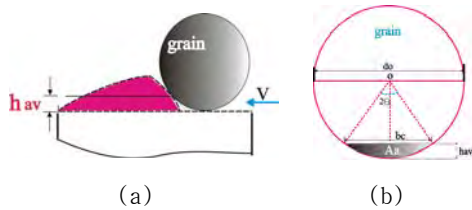


Fig. 3 Schematic of (a) undeformed chip thickness side section view, (b) section view of abrasive grain in grinding direction.

Fig. 3(a)는 하나의 연삭입자가 연삭작용을 하는 경우 연삭진행방향의 미변형칩을 밀변이 직선인 등가의 면적으로 나타낸 것이고, Fig. 3(b)은 연삭진행방향에서 직각방향으로의 실연삭 평균연삭단면적( $A_a$ )을 나타낸 것이다.

연삭숫돌과 공작물의 접촉면적( $lc \times b$ ) 사이에 존재하는 개개의 연삭입자들이 실제 연삭하고 있는 단면적은 각각 다르지만, Fig. 3(b)에 나타낸 바와 같이 모든 연삭입자들이 평균미변형칩두께( $h_{av}$ )를 연삭하고 있는 경우로 가정하여 평균연삭단면적( $A_a$ )을 구하였다.

Fig. 3(b)에서 연삭입자의 평균미변형칩두께( $h_{av}$ )는 식 (2)과 같이 나타낼 수 있으며, 실제 절삭작용을 하는 연삭입자의 폭  $b_c$ 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_{av} = -\frac{d_0}{2} - \sqrt{\frac{d_0^2}{4} - b_c^2} \quad (2)$$

$$b_c = 2\sqrt{d_0 h_{av} - h_{av}^2} \quad (3)$$

여기서,  $d_0$ 는 연삭입자의 직경이다.

$\theta$ 는 연삭숫돌이나 공작물의 종류와는 무관하며 숫돌의 기하학적조건 및 작동조건만으로 정해지는 무차원 값이다.

$$\theta = \sin^{-1} \left( -\frac{b_c}{d_0} \right) \quad (radian) \quad (4)$$

단일 연삭입자의 평균연삭단면적,  $A_a$ 는 기하학적 관계에 의하여 식(5)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_a = \frac{2\theta}{2\pi} \pi \left( -\frac{d_0}{2} \right)^2 - \frac{1}{2} b_c \left( -\frac{d_0}{2} - h_{av} \right) = \frac{1}{2} \left[ -\frac{\theta d_0^2}{2} - b_c \left( -\frac{d_0}{2} - h_{av} \right) \right] \quad (5)$$

## 2.3 평균입자 비연삭에너지

본 연구에서는 연삭특성 평가를 위해 실제 연삭입자들은 불규칙한 다면체 형상을 나타내고 있지만, Fig. 1에 나타낸 바와 같이 구의 형상으로 가정하여 평균미변형칩두께( $h_{av}$ )에 근거한 평균입자 연삭모델을 설정하고 이에 의한 평균입자 비연삭에너지,  $e_a$  (average grain specific grinding energy)를 정의하였다.

Fig. 4는 연삭숫돌과 공작물의 접촉면적을 3차원적으로 나타낸 것이다. 평면하향연삭시 연삭숫돌과 공작물의 접촉길이는  $lc$ 이며, 공작물의 폭( $b$ )이 연삭숫돌폭 보다 작으면, 연삭숫돌과 공작물의 접촉면적은,  $lc \times b$ 가 된다. 접촉면적 상의 'v'표시는 개개의 연삭입자들을 나타낸 것이다.

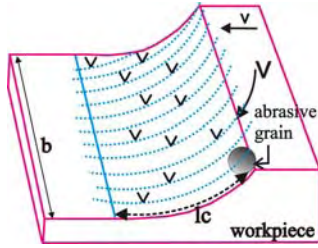


Fig. 4 Schematic 3-D view of down-surface grinding.

평균입자모델에서 단위면적당 존재하는 연삭입자의 개수( $n$ )는 식(6)과 같이 구할수 있고 연삭입자의 개수를 연삭숫돌과 공작물의 접촉면적( $lc \times b$ )에 의해 구하면, 연삭가공시 실제접촉면적상의 전체 연삭입자의 개수,  $n_a$ 는 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$n = Ag/100 \pi r'^2 \quad (6)$$

$$n_a = \frac{Ag \times l_c \times b}{100 \pi r'^2} \quad (7)$$

따라서, 본 연구에서는 앞서 도입한 평균입자미 변형칩 모델을 이용하여 평균입자 비연삭에너지,  $e_a$ 를 다음과 같이 정의하였다.

$$e_a = \frac{F_t}{n_a A_a} \quad (8)$$

### 3. 연삭실험

연삭실험에 사용한 연삭숫돌은 CBN 연삭숫돌로서 결합도(R), 집중도(125), 결합제(V), 입도는 120, 170 및 230 세가지를 사용하였고 직경 305mm, 폭 10mm 이었다.

연삭방식은 하향연삭방식으로 평면연삭기에서 가공하였으며, 매 실험마다 2 $\mu$ m로 드레싱을 하였다.

Table. 1 Grinding experimental conditions

Wheel speed(rpm)	1750
Radial depth of cut( $\mu$ m)	10, 20, 30, 40
Grinding velocity(m/min)	5, 10, 15, 20
Grinding wheel	CBN120R125V CBN170R125V CBN230R125V
Heat treatment	0, X
Grinding Fluid	None
Depth of dressing(mm)	0.002

Table. 1은 연삭실험조건을 나타낸 것으로 3가지 입도의 연삭숫돌로 각각 32가지 조건에 대해 연삭실험을 행하였다. Table. 2는 연삭실험에 사용된 공작물의 구성성분을 나타낸 것이며, 경화열처리 유무에 따른 SM45C강 공작물의 로크웰 C스케일(HRC) 경도를 나타낸 것이다.

Table 2 . Chemical composition(wt%) and hardness of SM45C

		SM45C
C		0.427
Si		0.213
Mn		0.679
P		0.011
S		0.010
Ni		0.052
Cr		0.120
Fe		Bal.
Hardness (HRC)	Heat treated	59
	Non-heat treated	4

Fig. 5은 연삭실험의 개략도를 나타낸 것으로 연삭력 성분을 구하기 위해서 공구 동력계(Kistler, 9273)로부터 측정된 연삭력 신호를 전하증폭기(Kistler, 5807A)를 통해 증폭시키고, A/D변환기(Data translation, DT3831-G)를 거쳐 PC에서 신호 분석 기능을 갖고 있는 소프트웨어패키지(Global Lab)을 사용하여 분석하였다.

연삭실험시 공작기계의 주축회전속도는 1750 rpm이었으며, 연삭력 성분은 샘플링 주파수 125,000Hz로 획득되었다. 따라서, 샘플링 시간간격은 0.008ms이었다.

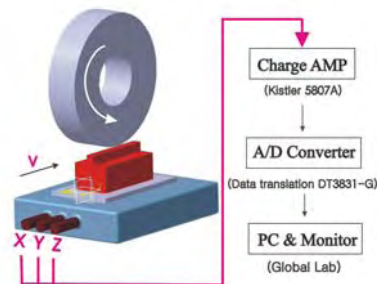
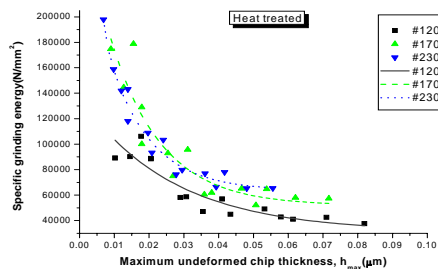


Fig. 5 Schematic diagram for surface grinding force measurement.

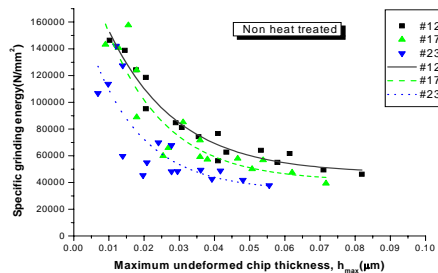
## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 비연삭에너지

비연삭에너지는 연삭동력을 단위시간당 연삭제거량으로 나눈값으로 연삭성능을 평가하는 기준으로 사용되고 있다. Fig. 6은 각 실험 조건하에서의 연삭되어지는 최대미변형칩두께( $h_{max}$ )에 따른 평균입자 비연삭에너지,  $e_a$ 를 나타낸 것이다.



(a)



(b)

Fig. 6 Specific grinding energy,  $e_a$  vs.

maximum undeformed chip thickness.

Fig. 6에서와 같이 연삭입자의 최대미변형칩두께가 증가할수록 비연삭에너지가 감소하고 있다. 이는 연삭가공에서의 치수효과<sup>(4)</sup>를 나타내는 것으로 판단된다. 또한 열처리된 시편에서는 최대미변형칩두께가 동일한 경우 연삭입자가 작을수록 비연삭에너지가 커지는 경향을 보이고 있으며, 이는 입자의 크기가 작을수록 나타나는 치수효과에 기인한 것으로 판단된다.

그러나 열처리되지 않은 시편에서는 열처리된 경우와 반대의 경향이 나타나고 있다. 이는 열처리되지 않은 시편의 경우 마찰과 소성변형에 소요되는 에너지 비율이 상대적으로 크기 때문에 동일한 최대미변형칩두께에 대하여 입자가 커질수록 비연삭에너지가 커지는 현상이라고 사료된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 평균입자연삭모델을 이용하여, CBN 연삭시 입자 크기에 따른 SM45C강에 대한 비연삭에너지의 특성을 얻을 수 있었다.

연삭입자의 최대미변형칩두께,  $h_{max}$ 가 커질수록 평균입자비연삭에너지  $e_a$ 는 감소한다. 입도가 다른 입자에 의해 주어지는 최대미변형칩두께,  $h_{max}$ 가 같을 때 열처리 유무에 따라 연삭입자에 의한  $e_a$ 값이 반대의 경향을 보인다.

## 참고문헌

- (1) K. Sato, "On the Surface Roughness in Grinding," Technol. Reports of the Tohoku University, 20, pp. 59-70, 1955.
- (2) H.J. Kim, I.H. Heo, S.D. Woo, and Y.M. Lee, "Effects of Maximum Grit Depth of Cut on Grinding Characteristics", Trans. of KSMTE, Vol. 8, No. 5, pp.63-69, 1999.
- (3) S. Malkin, Grinding Technology - Theory and Application of Machining with Abrasives, John Wiley & Sons, pp. 55-59, 1989.
- (4) Cooper, W. L., Lavine, A. S., "Grinding Process Size Effect and Kinematics Numerical Analysis", Trans, ASME, 122, pp. 59-69, 2000