

## 평균입자모델을 이용한 비연삭에너지 해석

이영문\*, 최원식<sup>+</sup>, 장승일<sup>++</sup>, 배대원<sup>+++</sup>, 손정우<sup>+++</sup>, 이현구<sup>+++</sup>

(논문접수일 2004. 12. 24, 심사완료일 2005. 6. 8)

### Analysis of specific grinding energy using average grain model

Young Moon Lee\*, Won Sik Choi<sup>+</sup>, Sung Il Chang<sup>++</sup>,  
Dae Won Bac<sup>+++</sup>, Jeong Woo Son<sup>+++</sup>, Hyun Goo Lee<sup>+++</sup>

#### 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 radial and tangential forces, specific grinding energy of SM45C were investigated with changing grinding variables such as 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. And there is no significant difference between the specific grinding energies of the existing and the proposed model.

**Key Words** : Average Grain(평균입자), Specific Grinding Energy(비연삭에너지), Maximum Undeformed Chip Thickness(최대미변형칩 두께), Down-surface Grinding(하향평면연삭)

### 1. 서 론

연삭가공(grinding)은 연삭숫돌 표면에 돌출하여 있는 수많은 연마입자(abrasive grain)의 절삭작용에 의해 이루어지며, 절삭가공시의 미변형칩두께(undeformed chip thickness)에 해당하는 입자의 물림깊이가 매우 작기 때문에 전통적으로 매끈한 표면과 치수 정밀도가 요구되는 부품의 마무리가

공공정으로 인식되고 있다. 특히 연마입자의 경도가 높기 때문에 일반 절삭가공으로는 불가능한 초경합금, 세라믹 등의 고경도 재료 정밀가공에 거의 독점적인 위치를 차지하고 있다. 그러나, 연삭가공의 기술적 발전에도 불구하고 연삭가공에 대한 체계적인 연구는 아직까지 미흡한 실정이다. 이는 불규칙한 형상의 수많은 입자들이 동시에 매우 빠른 속도로 절삭작용을 하며, 개개 입자의 물림깊이가 매우 작을 뿐만

\* 경북대학교 기계공학부 (ymlee@knu.ac.kr)

주소: 702-701 대구시 북구 산격동 1370

+ 밀양대학교 기계공학과

++ 중소기업진흥공단

+++ 경북대 대학원 기계공학과

아니라, 입자에 따라 다르기 때문에 연삭기구의 해석모델 설정과 이의 실험적 검증이 대단히 어렵기 때문이다<sup>(1)</sup>. 본 연구에서는 평균입자연삭모델을 설정하고, 이 모델에 근거한 새로운 비연삭에너지 식을 제시하였다. 또한, 경화열처리된 SM45C 강에 대한 WA(White Aluminum Oxide)계열과 CBN(Cubic Boron Nitride)계열 두 종류의 연삭숫돌에 의한 평면하향 연삭실험 결과로부터 기존의 비연삭에너지와 본 연구에서 제시된 새로운 비연삭에너지에 대한 비교·고찰을 행하였다.

## 2. 평균입자연삭모델

평균입자연삭모델을 정의하기 위하여 연삭입자를 기하학적으로 단순화하면, Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이 실제 연삭입자는 불규칙 형상의 다면체이며, 그림에 나타난 절삭점(cutting points)들이 연결되어 다수의 절삭날(cutting edges)을 형성하게 된다. 본 연구에서는 미세 절삭 표면의 단면이 원형 절삭날 형태를 나타내므로 연삭입자의 형상을 구형(sphere)으로 가정하고, 절삭날(cutting edge)도 구의 단면인 입의 원호로 구성되어 있다고 가정하였다.

### 2.1 최대미변형칩두께( $h_{max}$ )

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

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

여기서,  $a$ 는 연삭숫돌의 연속절삭날간격(successive cutting point spacing)이며,  $v$ 는 공작물속도,  $V$ 는 연삭숫돌의 원주속

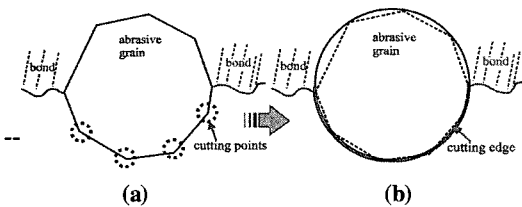


Fig. 1 Shape and cutting edge(bold line) of an abrasive grain (a) real shape (b) idealized shape

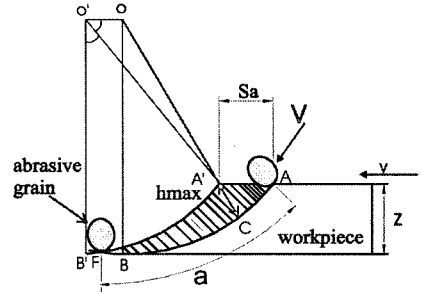


Fig. 2 Cutting path in down-surface-grinding process

도,  $Z$ 는 연삭깊이, 그리고  $D$ 는 연삭숫돌의 직경을 나타낸다.

### 2.2 연속절삭날간격( $a$ )의 결정

연삭숫돌의 겉보기 체적 중 순수하게 연삭입자가 차지하는 체적백분율  $V_g$ (%)는 식 (2)와 같이 주어진다<sup>(2)</sup>.

$$V_g(\%) = 2(32 - S) \quad (2)$$

여기서,  $S$ 는 연삭숫돌의 조직번호(structure number)이며, 1~ 16의 값을 갖는다. 한편 연삭입자의 평균직경  $d_0$ 는 경험적으로 식 (3)과 같이 주어진다<sup>(2)</sup>.

$$d_0 = 15.2/M \quad (3)$$

여기서,  $M$ 은 체눈의 번호(mesh number)를 나타낸다.

Fig. 3(a)는 실제의 연삭숫돌 단위체적 내에 불규칙하게 분포된 연삭입자를 나타낸 것이다. 우측 그림은 임의의 절단면으로 절단하였을 때 절단면상에 나타나는 연삭입자들의 단면을 나타낸 것이며, 그림에서와 같이 크기가 다른 원으로 나타낸다. 따라서 이 그림으로부터는 연속절삭날간격  $a$ 의 평균값을 구할 수 없다. 그러나 연삭숫돌을 구성하는 연삭입자가 동일한 크기이며 규칙적으로 분포한다고 가정하면 식 (2) 및 식 (3)에 나타난 바와 같이 단위체적 안에 포함되는 연삭입자의 체적백분율[ $V_g$ (%)]과 평균직경( $d_0$ )으로부터 임의의 절단면상에서 입자들이 차지하는 단면백분율  $A_g$ (%)는 체적백분율  $V_g$ (%)와 같게 된다. 이로부터 단위체적 안에 포함되는 연삭입자의 개수를 구할 수 있다.

Fig. 3(b)는 이러한 상황을 가상적으로 나타낸 것으로 그림에 나타난 단위체적 내에 있는 원기둥들의 체적의 합은 Fig. 3(a)에 나타난 입자들의 체적의 합과 같다. 원기둥의 반경을  $r'$ 라 하면 절단면 단위면적당 입자의 개수  $n$ 은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

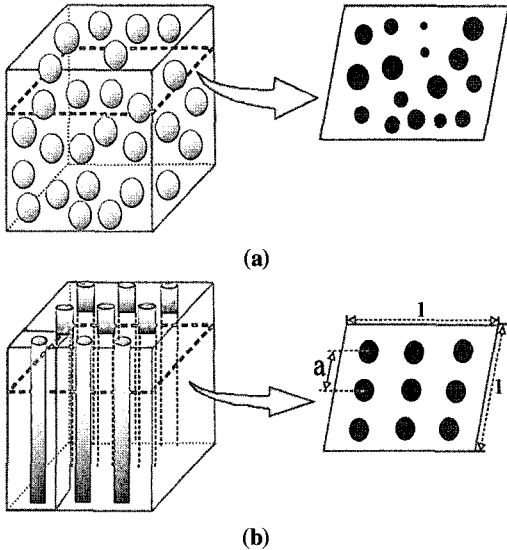


Fig. 3 (a) Schematic view of grain distribution in a grinding wheel and (b) equivalent volume distribution of circular column

$$n = \frac{A_g(\%)}{100\pi r'^2} \quad (4)$$

따라서 연속절삭날간격  $a$ 는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$a = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

2.3 평균미변형칩두께 ( $h_{av}$ )

Fig. 4는 공작물의 이송을 대신하여 슷돌이 입자당  $S_a$ 만큼 이송하면서 회전할 때 하나의 연삭입자에 의해 제거되는 미변형칩의 단면적을 나타낸 것이다. 그림에서  $\phi$ 는 절삭개

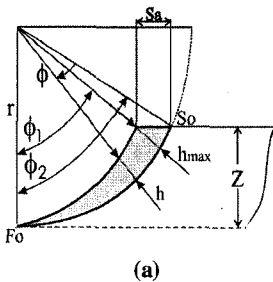


Fig. 4 Chip cross section of down-surface grinding process.

시점( $S_0$ )으로부터 연삭날의 회전각을 나타내고,  $h$ 는 회전각이  $\phi$ 일때의 미변형칩두께를 나타낸다. 하향연삭시 미변형칩두께( $h$ )는 절삭개시점( $S_0$ )에서 최대미변형칩두께( $h_{max}$ )까지 급격하게 증가한 뒤 서서히 감소하여 절삭완료지점( $F_0$ )에 이른다<sup>(3)</sup>.

이때  $\phi_1$ 은  $h_{max}$  점과 절삭완료점 사이의 각이고,  $\phi_2$ 는 절삭개시점과 절삭완료점 사이의 각이다. 연삭입자당 이송량  $S_a$ 는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있으며, 연삭입자 경로상의 최대미변형칩두께  $h_{max}$ 는 식 (1)과 같다. Fig. 4에서 보는바와 같이 기하학적 관계로부터 각  $\phi_1$ 은 식 (7)로, 각  $\phi_2$ 는 식 (8)로 각각 나타낼 수 있다. 여기서  $a$ 는 연속절삭날간격,  $r$ 은 연삭숫돌의 반경,  $Z$ 는 연삭깊이이다.

$$S_a = a \frac{v}{V} \quad (6)$$

$$\phi_1 = \cos^{-1}\left(\frac{r-Z}{r-h_{max}}\right) \quad (7)$$

$$\phi_2 = \cos^{-1}\left(\frac{r-Z}{r}\right) \quad (8)$$

본 연구에서는 연삭입자 경로에 따라 달라지는 미변형칩두께,  $h$ 의 결정을 위하여 Fig. 4의 실제 연삭단면적을 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 밀변이 직선인 등가의 면적으로 나타내었다. 하향연삭시 Fig. 5(a)와 같이 연삭입자의 위치 $\phi$ 가 절삭개시점( $S_0$ )와 최대미변형칩두께를 나타내는 위치 사이에 있을 경우, 즉  $\phi_2 - \phi_1$ 사이의 임의의 각도일 때 미변형칩두께는 식 (9)로, Fig. 5(b)와 같이  $\phi_2 - \phi_1$ 에서  $\phi_2$ 사이의 각일 때는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (9), (10)을 이용하여 하나의 연삭입자가 절삭을 종료할 때까지의 평균미변형칩두께( $h_{av}$ )를 구하면 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

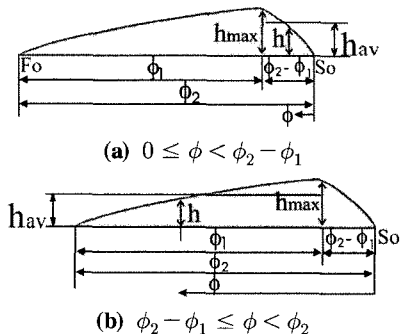


Fig. 5 Spread undeformed chip side section.

$$h = r \left( 1 - \frac{\cos \phi_2}{\cos(\phi_2 - \phi)} \right) \quad (9)$$

$$h = S_a \sin(\phi_2 - \phi) \quad (10)$$

$$h_{av} = \left[ \int_0^{\phi_2 - \phi_1} r \left( 1 - \frac{\cos \phi_2}{\cos(\phi_2 - \phi)} \right) d\phi + \int_{\phi_2 - \phi_1}^{\phi_2} S_a \sin(\phi_2 - \phi) d\phi \right] / \phi_2 \quad (11)$$

### 2.4 평균연삭단면적 ( $A_a$ )

Fig. 6은 구형입자에 의한 평면하향연삭 가공공정을 나타낸 것이다.

Fig. 7(a)는 하나의 연삭입자가 연삭작용을 하는 경우 연삭진행방향의 미변형칩을 밀면이 직선인 등가의 면적으로 나타낸 것이고, Fig. 7(b)는 연삭진행방향에서 직각방향으로의 평균연삭단면적( $A_a$ )을 나타낸 것이다.

연삭숫돌과 공작물의 접촉면적( $l_c + b$ ) 사이에 존재하는 연삭입자들이 실제 연삭하고 있는 단면적은 다르지만, Fig. 7(b)에 나타난 바와 같이 모든 연삭입자들이 평균미변형칩두께( $h_{av}$ )를 연삭하고 있는 경우로 가정하여 평균연삭단면적( $A_a$ )을 구하였다. Fig. 7(b)에서 연삭입자의 평균미변형칩두께( $h_{av}$ )는 식 (12)와 같이 나타낼 수 있으며, 실제 절삭작용을 하는 연삭입자의 폭( $b_c$ )은 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_{av} = \frac{d_o - \sqrt{d_o^2 - b_c^2}}{2} \quad (12)$$

$$b_c = 2\sqrt{d_o h_{av} - h_{av}^2} \quad (13)$$

여기서,  $d_o$ 는 연삭입자의 직경이다.

단일 연삭입자가 평균단면적  $A_a$ 를 연삭할 때의 중심각  $2\theta$ 는 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{b_c}{d_o} \right) \quad (\text{radian}) \quad (14)$$

단일 연삭입자의 평균연삭단면적,  $A_a$ 는 기하학적 관계에 의하여 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$A_a = \frac{1}{2} \left[ \frac{\theta d_o^2}{2} - b_c \left( \frac{d_o}{2} - h_{av} \right) \right] \quad (15)$$

### 2.5 연삭력

Fig. 8는 평면하향연삭시 연삭력성분을 나타낸 것으로  $F_x$  및  $F_y$ 는 수직 및 수평분력이며,  $F_r$  및  $F_t$ 는 입의 순간에서의 반경방향과 접선방향 연삭력성분을 나타내고 있으며, 식 (16)의 관계가 성립한다<sup>(4)</sup>.

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi_2 - \phi) & \sin(\phi_2 - \phi) \\ -\sin(\phi_2 - \phi) & \cos(\phi_2 - \phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_r \\ F_t \end{bmatrix} \quad (16)$$

실제 연삭가공시 입자의 분포와 크기가 불규칙하므로, 순간적인 반경방향 연삭분력과 접선방향 연삭분력을 구하는 것

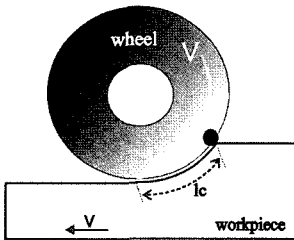


Fig. 6 Schematic of down-surface grinding

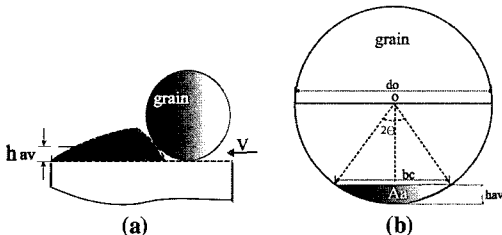


Fig. 7 (a) Side section view of undeformed chip thickness, (b) cross section view of abrasive grain in grinding direction

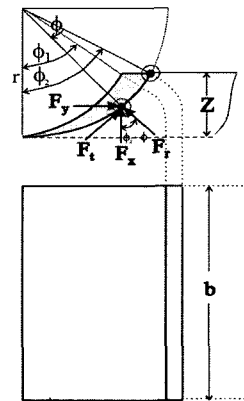


Fig. 8 Coordinate system for grinding force components in down surface-grinding process

은 불가능하다. 따라서, 평균값으로부터 반경방향 접선방향 평균연삭분력을 구하였다. 식 (11)에서 평균미변형칩두께,  $h_{av}$ 를 구할 수 있으며,  $\phi_{av}$ 를 지정할 수 있다. 평균미변형칩 두께가  $h_{av}$ 일 때의 연삭력을 평균연삭력이라하면, 식 (17)과 같이 반경방향과 접선방향의 평균연삭력성분을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F_r \\ F_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi_2 - \phi_{av}) & -\sin(\phi_2 - \phi_{av}) \\ \sin(\phi_2 - \phi_{av}) & \cos(\phi_2 - \phi_{av}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} \quad (17)$$

## 2.6 평균입자 비연삭에너지

### 2.6.1 통상적 비연삭에너지

통상적으로 비연삭에너지는 연삭특성평가를 위해 일반적으로 채택되는 파라미터이며, 식 (18)과 같이 정의된다<sup>(6)</sup>.

$$e = \frac{F_y V}{b v Z} \quad (18)$$

여기서,  $e$  : 비연삭에너지(N/mm<sup>3</sup>)       $F_y$  : 수평분력(N)  
 $V$  : 스톨회전속도(m/min)       $b$  : 연삭폭(mm)  
 $v$  : 공작물속도(m/min)       $Z$  : 연삭깊이(mm)

비연삭에너지,  $e$ 는 연삭동력을 단위시간당 제거되는 공작물의 체적으로 나누어준 값으로서 공작물 단위체적당 소요되는 연삭에너지를 나타내는 거시적 파라미터이다.

### 2.6.2 평균입자 비연삭에너지

Fig. 9는 연삭스톨과 공작물의 접촉면적을 3차원적으로 나타낸 것이다. 연삭스톨과 공작물의 접촉길이는  $l_c$ 이며, 공작물의 폭( $b$ )이 스톨폭보다 작으면, 스톨과 공작물의 접촉면적은,  $l_c + b$ 가 된다. 접촉면적 상의 'v'표시는 개개의 연삭입자들을 나타낸 것이다. 앞서 구한 식 (4)에서 단위면적당 존재하는 연삭입자의 개수( $n$ )를 연삭스톨과 공작물의 접촉면적( $l_c + b$ )에 의해 구하면, 접촉면적상의 전체 연삭입자

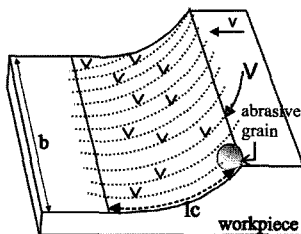


Fig. 9 Schematic 3-D view of down surface-grinding

의 개수,  $n_a$ 는 식 (19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$n_a = \frac{A_g(\%) l \cdot b}{100\pi r'^2} \quad (19)$$

따라서, 본 연구에서는 앞서 도입한 평균입자미변형칩 모델을 이용하여 평균입자 비연삭에너지,  $e_a$ 를 식 (20)과 같이 정의하였다.

$$e_a = \frac{F_t}{n_a A_a} \quad (20)$$

## 3. 연삭실험

### 3.1 연삭스톨 및 연삭실험조건

연삭실험에는 WA와 CBN계열의 2가지 스톨을 사용하였다. Table 1에는 연삭실험 조건을 나타내었다. 각 조건에 대한 연삭실험을 수행하기 전에, WA계 연삭스톨을 깊이  $2 \mu\text{m}$ 로 드레싱 하였고, CBN계 연삭스톨은 매 실험시 알루미늄 드레싱 스틱을 사용하여 드레싱 하였으며, 실험에 사용한 공작물은 경화열처리된 SM45C강(HRC 60)이다.

### 3.2 연삭력 측정

연삭력성분은 샘플링 주파수 125kHz로 획득되었다. 샘플

Table 1 Experimental conditions

Grinding machine	Horizontal spindle surface grinding machine(3.5Kw)
Grinding wheel	WA46K7V(305×38×127) CBN170R100V(305×10×127)
Conditions	Wheel speed : 1750 rpm
	Workpiece velocity : 5, 10, 15, 20(m/min)
	Depth of cut : 10, 20, 30, 40( $\mu\text{m}$ )
	Down grinding & One pass
Coolant	None

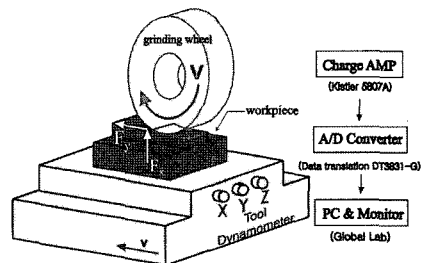


Fig. 10 Measurement of grinding forces

링 시간간격은 0.008ms이며, 대응되는 연삭숫돌의 회전각은 0.084°이며 연삭숫돌 1회전당 획득되는 데이터의 수는 대략 13개이었다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 측정 연삭력

Fig. 11은 두 종류(WA, CBN)의 연삭숫돌에 의한 연삭시험시 연삭깊이에 따라 측정된 평균수직력( $F_x$ )과 수평력( $F_y$ )을 최대미변형칩두께,  $h_{max}$ 에 따라 나타낸 것이다. 공작물 속도( $v$ )가 빨라지고 최대미변형칩두께가 증가함에 따라 두 종류의 숫돌 모두 수직력(vertical force)과 수평력(horizontal force)이 증가하며, 수직력이 수평력의 약 2배의 크기를 보이고 있다. 또한, CBN숫돌의 연삭력이 좀더 큼을 볼 수 있는데 이는 CBN숫돌이 절삭에 관여하는 연삭숫돌의 입도가 더 높기 때문으로 판단된다.

### 4.2 반경방향( $F_r$ ), 접선방향( $F_t$ ) 평균연삭력

Fig. 12는 두 종류(WA, CBN) 연삭숫돌에 의한 연삭가공에서의 실제적인 저항력인 반경방향평균연삭력( $F_r$ )과 접선

방향평균연삭력( $F_t$ )을 나타낸 것이다. 공작물속도와 연삭깊이,  $Z$ 에 따라 크기가 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 11에서 측정된 수직력( $F_x$ ), 수평력( $F_y$ )과 비교했을 때 큰 차이가 없음을 볼 수 있는데, 이는 실제 연삭에서는 연삭깊이가 매우 작으며 연삭숫돌과 공작물사이의 접촉각 또한 대단히 작으므로 그 차이가 거의 나타나지 않기 때문으로 판단된다.

### 4.3 평균미변형칩두께 및 평균연삭단면적

Fig. 13(a)(c)는 숫돌의 종류(WA, CBN)에 따라 얻어진 평균미변형칩두께( $h_{av}$ )의 변화를 연삭깊이에 따라 나타낸 것이며, Fig. 13(b)(d)는 평균연삭단면적( $A_a$ )을 최대미변형칩두께,  $h_{max}$ 에 따라 나타낸 것이다.

연삭깊이( $Z$ )가 커질 수록 최대미변형칩두께가 커지기 때문에 평균미변형칩두께( $h_{av}$ )도 따라서 증가한다. 또한, 입자당 평균연삭단면적도 증가하고 있다.

### 4.4 비연삭에너지

사용된 연삭숫돌의 종류에 따라 Fig. 14(a)(b)의 점선은 통상적 비연삭에너지,  $e$ 이고, 실선은 본 연구에서 제시한 평균연삭단면적( $A_a$ )을 이용하여 식 (20)에 의해 구한 평균입자

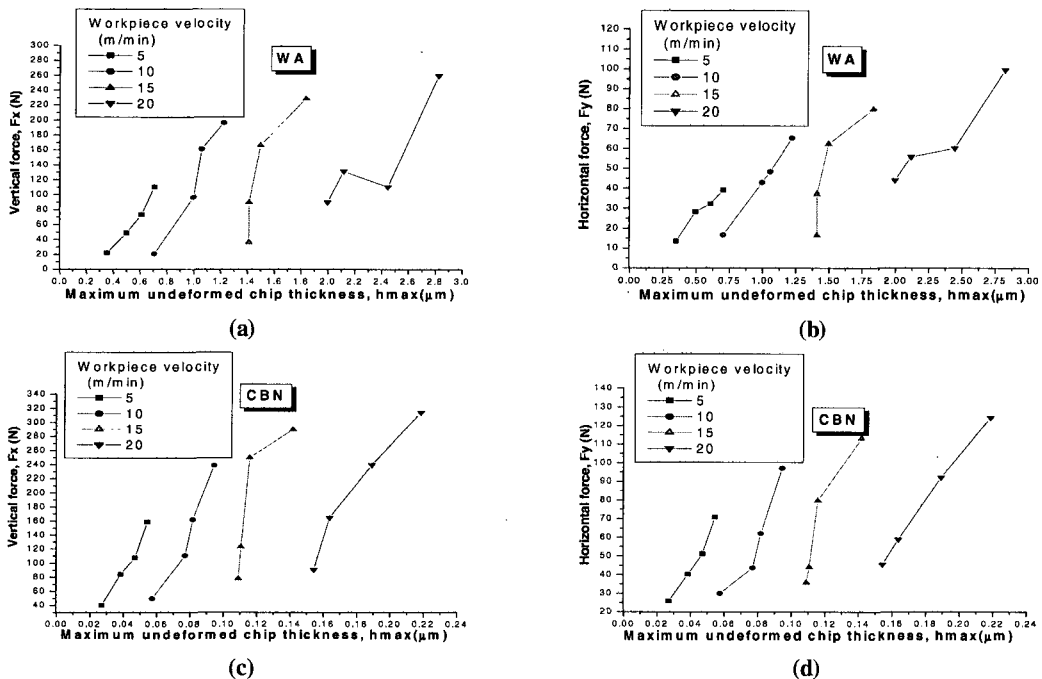


Fig. 11 Measured grinding force: vertical( $F_x$ ) and horizontal( $F_y$ ) forces

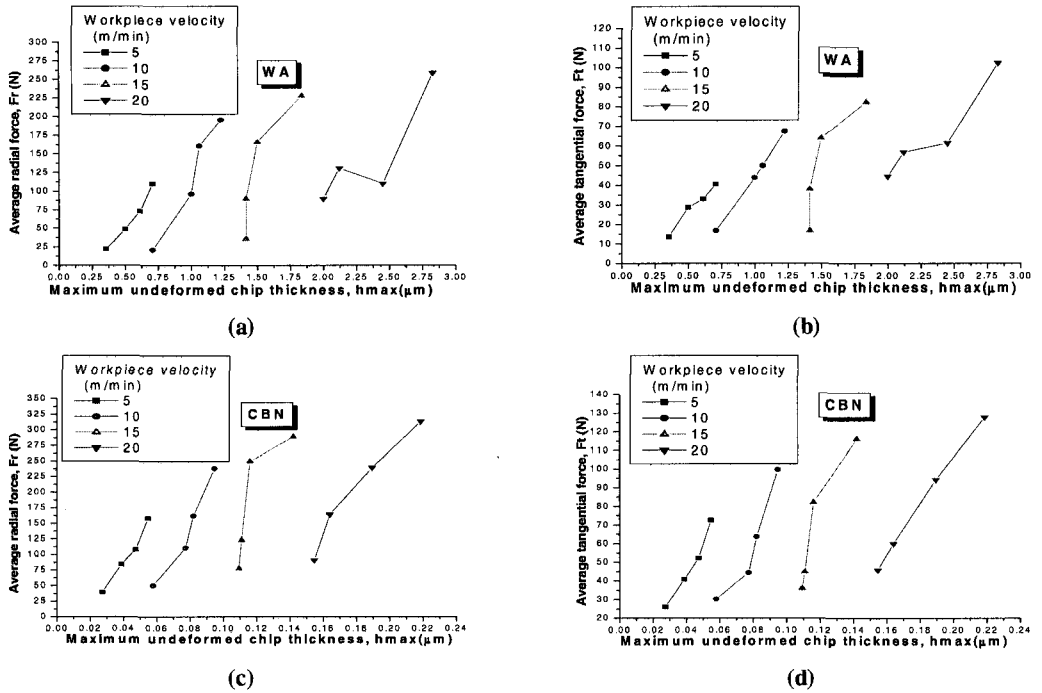


Fig. 12 Average radial( $F_r$ ) and tangential( $F_t$ ) grinding forces

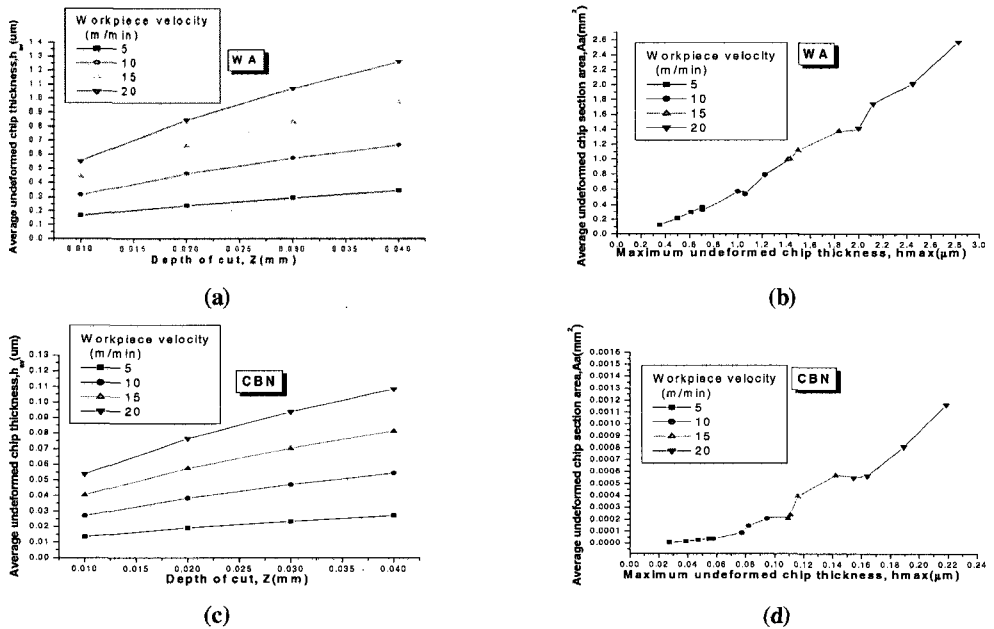


Fig. 13 Average undeformed chip thickness( $h_{av}$ ) and average undeformed chip section area( $A_a$ ) depending on maximum undeformed chip thickness

비연삭에너지,  $e_a$ 를 나타내고 있다. 보는바와 같이 이들 값은 크게 차이를 나타내지 않으며, 최대미변형칩두께( $h_{max}$ )가 증가할수록 비연삭에너지가 감소하고 있다. 이러한 결과는 본 연구에서 제시한 평균입자모델의 타당성을 일차적으로 입증하여 주는 것으로 판단된다. 또한, 최대미변형칩두께가 작은 영역에서는  $e_a$ 값이 다소 큰 값을 나타내고 있으며, 최대미변형칩두께가 큰 영역에서는 반대의 경향이 나타난다. 이는 연삭과정에서 최대미변형칩두께가 작을수록 마찰 및 소성변형에 소요되는 에너지 비율이 커지고 절삭작용에 소요되는 에너지 비율이 작아지기 때문으로 판단된다.

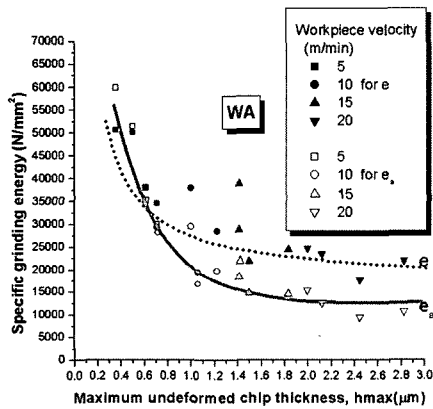
또한 CBN의 경우 WA에 비해 전반적으로 비연삭에너지 값이 크게 나타나고 있으며, 이는 CBN 개개의 입자가 작기 때문에 나타나는 연삭에서의 치수효과<sup>(7)</sup>에 기인한 것으로 판단된다.

### 5. 결 론

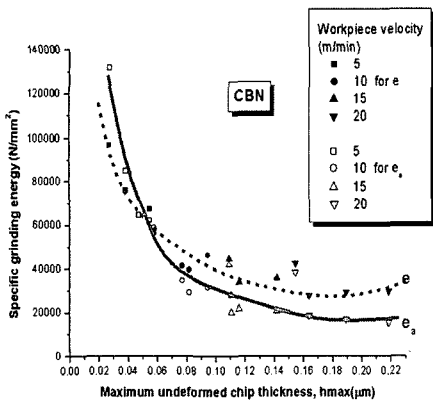
- (1) 평균입자모델에 의한 연속절삭날간격,  $a$ 를 구할 수 있으며, 이를 이용하여 평균입자 비연삭에너지를 정의하였다.
- (2) 평균입자 비연삭에너지,  $e_a$  값과 통상적 비연삭에너지  $e$  값의 크기는 대체적으로 일치하였으며, 양자모두 최대미변형칩두께가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이로부터 평균입자연삭모델의 타당성을 입증할 수 있었다.
- (3) 최대미변형칩두께가 작은 영역에서는 평균입자 비연삭에너지,  $e_a$  값이 통상적 비연삭에너지,  $e$  값보다 대체적으로 크게 나타나고 있으며, 최대 미변형칩두께가 큰 영역에서는 반대의 경향을 나타내고 있다.

### 참 고 문 헌

- (1) Shaw, M. C., 1996, *Principles of abrasive processing*, Oxford Univ. Press, New York, pp. 1~12.
- (2) Malkin, S., 1989, *Grinding Technology - Theory and Application of Machining with Abrasives*, John Wiley & Sons. pp. 45~78.
- (3) Kim, H. J., Heo, I. H., Woo, S. D., and Lee, Y. M., 1999, "Effects of Maximum Grit Depth of Cut on Grinding Characteristics," *Trans. of KSMTE*, Vol. 8, No. 5, pp. 63~69.
- (4) Lee, Y. M., Chang, S.I., Seo, M. K., and Son, J. W., 2004, "Shear and Friction Characteristics in Down-end Milling with Different Helix Angles," *Trans. of KSMTE*, Vol. 13, No. 2, pp. 17~24.
- (5) Hwang, T. W., Evans, C. J., and Malkin, S., 2000, "High Speed Grinding of Silicon Nitride with Electroplated Diamond Wheels, Part 2: Wheel Topography and Grinding Mechanisms," *Trans. ASME*, Vol. 122, pp. 42~50.
- (6) Chen, C., Jung, Y., and Inasaki, I., 1989, "Surface, Cylindrical and Internal Grinding of Advanced Ceramics. Grinding Fundamentals and Applications," *Trans. ASME*, Vol. 39, pp. 201~211.
- (7) Baker, W. R., Marshall, E. R., Shaw, M. C., 1952, "The Size Effect in Metal Cutting," *Trans. ASME*, Vol. 74, pp. 61~72.



(a)



(b)

Fig. 14 Specific grinding energy using average grain model(bold line) and conventional specific grinding energy(dotted line)