

# 평균입자모델을 이용한 비연삭에너지 특성평가

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

## Analysis of Specific Grinding Energy Characteristics Using Average Grain Model

Y.M. Lee\*, W.S. Choi<sup>+</sup>, S.I. Chang<sup>++</sup>, D.W. Bae<sup>++</sup>, J.W. Son<sup>++</sup>, H.G. 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 altering grinding variables such as workpiece velocity(v) and apparent depth of cut(Z) in down-surface grinding. From the experimental results, there is no significant difference between the radial, tangential forces and vertical, horizontal forces because of small contact angle between wheel and workpiece. The specific grinding energy decreases as the maximum undeformed chip thickness increases. But, there is much 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. 서론

연삭가공(grinding)은 연삭숫돌 표면에 돌출하여 있는 수 많은 연마입자(abrasive grain)의 절삭작용에 의해 이루어지며, 절삭가공시 절삭깊이에 해당하는 연삭깊이가 매우 작기 때문에 전통적으로 매끈한 표면과 높은 치수 정밀도가 요구되는 부품의 마무리 가공공정으로 인식되고 있다.

연삭가공의 기술적 발전에도 불구하고 연삭가공에 대한 체계적인 연구는 아직까지도 미흡한 실정이다. 이는 불규칙한 형상의 수많은 입자들이 동시에 매우 빠른 속도로 절삭작용을 하며, 개개 입자의 연삭깊이가 매우 작을 뿐만아니라, 입자에 따라 다르기 때문에 연삭기구의 해석모델 설정과 이의 실험적 검증이 대단히 어렵기 때문이다.<sup>(1)</sup>

본 연구에서는 평면하향연삭가공공정에 대한 평균입자연

삭모델을 설정하고, 새로운 비연삭에너지 식을 제시하였다. 경화열처리한 SM45C강에 대한 연삭실험 결과를 사용하여 기존의 비연삭에너지와 본 연구에서 제시된 비연삭에너지에 대한 비교, 고찰을 행하였다.

## 2. 평균입자연삭모델

### 2.1 최대미변형칩두께

숫돌표면에 분포하고 있는 연삭입자들은 서로 높이가 다르고 입자들의 간격도 일정하지 않다. 연삭기구해석시 연삭입자의 크기 및 분포에 관하여 가장 일반적으로 채택되고 있는 모델은 입자의 크기 및 형상이 동일하고 입자간의 간격이 일정한 균일형상·분포모델이다. Fig. 1은 균일형상·분포

\* 이영문, 경북대학교 기계공학부 (ymlee@knu.ac.kr)

주소: 702-701 대구시 북구 산격동 1370

+ 밀양대학교 기계공학과

++ 경북대 대학원 기계공학과

연삭숫돌에 의한 평면 하향연삭공정에서 공작물이 이송하는 것을 대신하여 연삭숫돌이 연삭작용을 하는 입자당  $S_a$ 만큼 이송하면서 회전할 때 연삭입자의 절삭경로를 나타낸 것이다. 그림에서 연삭입자의 최대물림깊이 또는 최대미변형칩두께 (maximum undeformed chip thickness),  $g$ 는  $\overline{A'C}$ 로 표시되며 근사적으로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

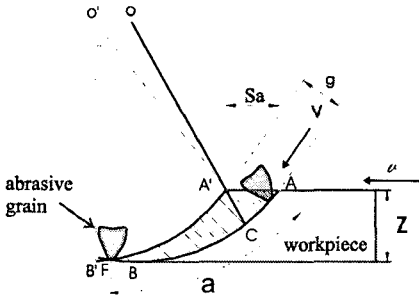


Fig. 1 Cutting path in down-surface grinding process.

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

식(1)에서  $a$ 는 연속절삭날 간격(successive cutting point spacing),  $v$ 는 공작물속도,  $V$ 는 숫돌의 원주속도,  $Z$ 는 연삭깊이,  $D$ 는 숫돌의 직경을 나타낸다.<sup>(2)</sup>

## 2.2 평균미변형칩두께

Fig. 3은 하향평면연삭시 한개의 연삭입자에 의해 제거되는 미변형칩의 단면적을 나타낸 것이다. 그림에서  $\phi$ 는 절삭개시점( $S_0$ )으로부터 연삭날의 회전각을 나타내고,  $h$ 는 회전각이  $\phi$ 일때 연삭날 경로 사이의 반경방향 길이차로서 미변형칩두께를 나타낸다.<sup>(3)</sup>

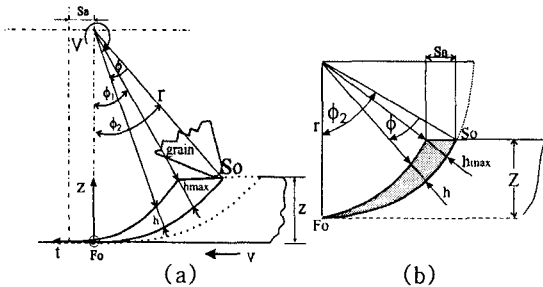


Fig. 2 (a)Schematic and (b)undeformed chip cross section of down-surface grinding process.

이때  $\phi_1$ 은  $h_{max}$ 점과 절삭완료점사이의 각이고,  $\phi_2$ 는 절삭개시점과 절삭완료점 사이의 각이다. 연삭입자당 이송량  $S_a$ 는 식(2)와 같이 나타낼 수 있으며, 연삭입자 경로상의 최대미변형칩두께  $h_{max}$ 는 식(1)의  $g$ 와 같다. Fig. 3에서 보는바와 같이 기하학적 관계로부터 각  $\phi_1$ 은 식(3)으로, 각  $\phi_2$ 는 식(4)로 각각 나타낼 수 있다.

$$S_a = a \frac{v}{V} \quad (2)$$

$$\phi_1 = \cos^{-1} \left( \frac{r-Z}{r-h_{max}} \right) \quad (3)$$

$$\phi_2 = \cos^{-1} \left( \frac{r-Z}{r} \right) \quad (4)$$

본 연구에서는 연삭입자 경로에 따라 달라지는 미변형칩두께  $h$ 의 결정을 위하여 Fig. 2의 실제 연삭단면적을 밑변이 직선인 등가의 면적으로 나타내었다. 그림에서와 같이 평균미변형칩두께,  $h_{av}$ 는 단일 연삭칩에 대한 평균높이를 나타낸 것으로서, 하향연삭시 Fig. 3(a)와 같이  $\phi_2 - \phi_1$  사이의 임의의 각도일 때 미변형칩두께는 식 (5)로, Fig. 3(b)와 같이  $\phi_2 - \phi_1$ 에서  $\phi_2$ 사이의 각일때는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다. 또한, 절삭을 종료할 때까지의 평균미변형칩두께( $h_{av}$ )는 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

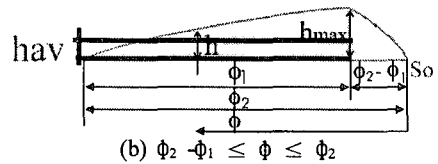
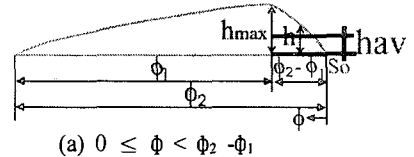


Fig. 3 Spread undeformed chip side section.

$$h = r \left( 1 - \frac{\cos \phi_2}{\cos(\phi_2 - \phi)} \right) \quad (5)$$

$$h = S_a \sin(\phi_2 - \phi) \quad (6)$$

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

$$\int_{\phi_2 - \phi_1}^{\phi_2} S_a \sin(\phi_2 - \phi) d\phi ] / \phi_2 \quad (7)$$

### 2.3 연삭력

Fig. 4는 하향연삭시 연삭력성분을 나타낸 것으로  $F_x$  및  $F_y$ 는 수직 및 수평분력이며,  $F_r$  및  $F_t$ 는 임의의 순간에서의 반경방향과 접선방향 연삭력성분을 나타내고 있으며, 식(8)의 관계가 성립한다.<sup>(3)</sup>

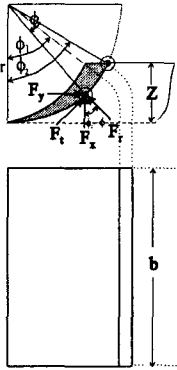


Fig. 4 Coordinate system for grinding force components in down-surface grinding process.

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi_2 - \phi) & \sin(\phi_2 - \phi) \\ -\sin(\phi_2 - \phi) & \cos(\phi_2 - \phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_r \\ F_t \end{bmatrix} \quad (8)$$

실제 연삭가공시 입자의 분포가 불규칙하고 크기도 다르기 때문에, 연삭력 신호로부터 순간적인 반경방향 연삭분력과 접선방향 연삭분력을 구하는 것은 불가능하다. 따라서, 측정된 연삭력의 평균값으로부터 반경방향 접선방향 평균연삭분력을 구하여 연삭특성을 평가하였다. 식(7)에서 평균미변형 칩두께,  $hav$ 를 구할 수 있으며,  $hav$ 에 해당되는 각도  $\phi_{av}$ 를 지정할 수 있다. 미변형칩두께가  $hav$ 일 때의 연삭력을 평균연삭력이라 가정하면, 식(9)와 같이 반경방향( $\overline{F_r}$ )과 접선방향( $\overline{F_t}$ )의 평균연삭력성분을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \overline{F_r} \\ \overline{F_t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi_2 - \phi_{av}) & -\sin(\phi_2 - \phi_{av}) \\ \sin(\phi_2 - \phi_{av}) & \cos(\phi_2 - \phi_{av}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{F_x} \\ \overline{F_y} \end{bmatrix} \quad (9)$$

## 2.4 평균입자 비연삭에너지

### 2.4.1 비연삭에너지

통상적으로 비연삭에너지,  $e$ 는 연삭특성평가를 위해 가장 일반적으로 채택되는 파라미터이며, 식(10)과 같이 정의

된다.

$$e = \frac{F_y V}{b' v Z} \quad (10)$$

여기서,

$V$  : 스톨회전속도(m/min)  $b'$ : 연삭폭(mm)

$v$ : 공작물속도(m/min)  $Z$ : 연삭깊이(mm)

이다.

비연삭에너지는 연삭동력을 단위시간당 제거되는 공작물의 체적으로 나누어준 값으로 단위체적당 소요되는 연삭에너지를 나타내는 거시적 파라미터이다.<sup>(2)</sup>

### 2.4.2 평균입자 비연삭에너지

Fig. 5(a)는 스톨과 공작물의 접촉길이  $l_c$ 를 나타낸 것이다. 공작물의 폭( $b'$ )이 연삭스톨폭 보다 작으면, 연삭스톨과 공작물의 접촉면적은  $b' \times l_c$ 가 된다. Fig. 5(b)는 접촉면적을 3차원적으로 나타낸 것으로 'v'표시는 개개의 연삭입자들을 나타낸 것이다. 실제 연삭입자들은 불규칙한 다면체 형상을 나타내고 있지만, 그림에서 나타낸 바와 같이 구의 형상으로 가정하였다.

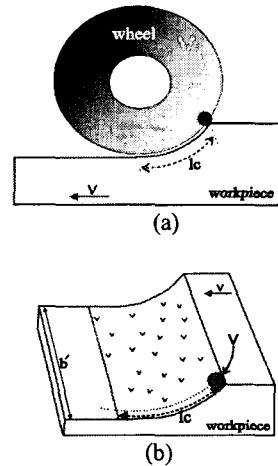


Fig. 5 Schematic of (a)down-surface grinding and (b)three dimensional view of down-surface grinding.

연삭스톨과 공작물 접촉면적( $l_c \times b'$ )사이에 존재하는 연삭입자의 수,  $n$ 는 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$n = \frac{l_c \times b'}{w^2} \quad (11)$$

Fig. 6(a)는 연삭작용을 하는 경우 연삭진행방향의 미변형칩을 확대하여 나타낸 것이고, Fig. 6(b)는 연삭진행방향

과 직각인 방향으로, 한개입자의 평균연삭단면적( $A_a$ )을 확대해서 나타낸 것이다.

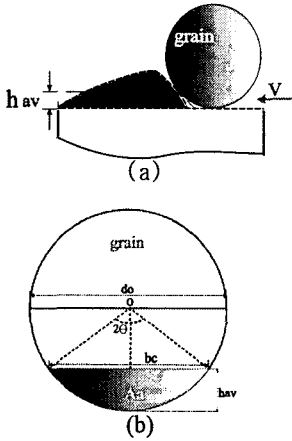


Fig. 6 Schematic of (a) undeformed chip thickness and (b) abrasive grain in grinding direction.

연삭숫돌과 공작물의 접촉면적( $lc \times b$ ) 사이에 존재하는 개개의 연삭입자들이 실제 연삭하고 있는 단면적은 각각 다르지만, 모든 연삭입자들이 평균미변형칩두께( $h_{av}$ )를 연삭하는 경우로 가정하여 평균연삭단면적( $A_a$ )을 구하면 식 (12)와 같다.

$$A_a = \frac{1}{2} \left[ \frac{\theta d_0^2}{2} - b_c \left( \frac{d_0}{2} - h_{av} \right) \right] \quad (12)$$

따라서, 평균입자미변형칩 모델에 의하여 평균입자 비연삭에너지,  $e_a$ 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$e_a = \frac{\bar{F}_t}{n A_a} \quad (13)$$

### 3. 연삭실험

#### 3.1 연삭숫돌 및 연삭실험조건

실험에 사용된 숫돌은 WA계로 입도 46, 결합도 K, 조직 7, 결합제 V, 직경 305mm, 폭 38mm 이며. 매실험전, 연삭숫돌을 깊이  $2\mu\text{m}$ 로 드레싱하였다. 연삭시편은 길이 100mm, 폭 9mm인 경화열처리한 SM45C강이며, 그 화학적 조성은 Table 1에 나타낸 바와 같다. 연삭실험 조건 및 주요사양은 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition(wt%) of SM45C

	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Fe
SM45C	0.42	0.21	0.67	0.01	0.01	0.05	0.12	Bal.

Table 2 Experimental conditions and grinding machine specifications

Grinding machine	Horizontal spindle surface grinding machine(3.5Kw)
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

#### 3.2 연삭력 측정

연삭력성분은 샘플링 주파수 125kHz로 획득되었다. 샘플링 시간간격은 0.008ms이며, 대응되는 공구의 회전각은  $0.084^\circ$ 이며 공구 1회전당 획득되는 데이터의 수는 대략 5개이었다.

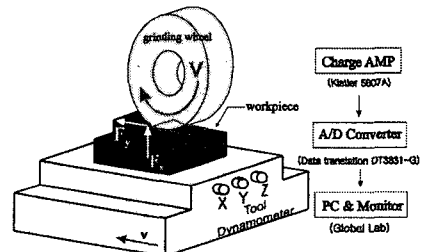
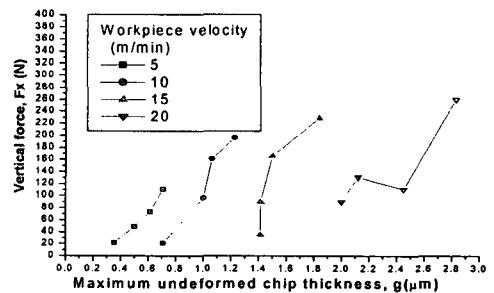


Fig. 7 Schematic diagram for grinding force measurement.

### 4. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 측정 연삭력

Fig. 8은 연삭깊이에 따른 평균수직력( $F_x$ )과 평균수평력( $F_y$ )을 최대미변형칩두께에 따라 나타낸 것이다. 공작물 속도( $v$ )가 빨라지고 최대미변형칩두께가 커짐에 따라 수직력(vertical force)과 수평력(horizontal force)이 증가하고 있다



(a)

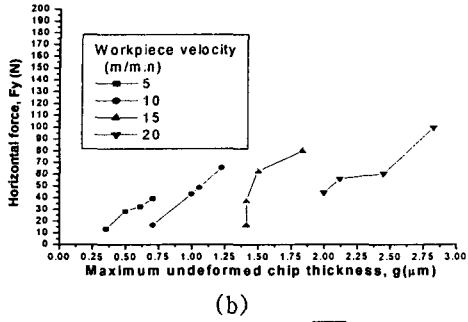


Fig. 8 (a) Vertical force ( $\overline{F_x}$ ) and (b) horizontal force ( $\overline{F_y}$ ).

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

Fig. 9는 연삭가공에서의 실제적인 저항력인 반경방향 평균연삭력( $F_r$ )과 접선방향평균 연삭력( $F_t$ )을 나타낸 것이다. Fig. 8에서 측정된 연삭력인 수직력( $F_x$ ), 수평력( $F_y$ )과 비교했을때 큰 차이가 없음을 볼 수 있는데, 실제 연삭에서는 연삭깊이가 매우작으며 공작물사이의 접촉각 또한 대단히 작으므로 차이가 거의 나타나지 않기 때문으로 판단된다.

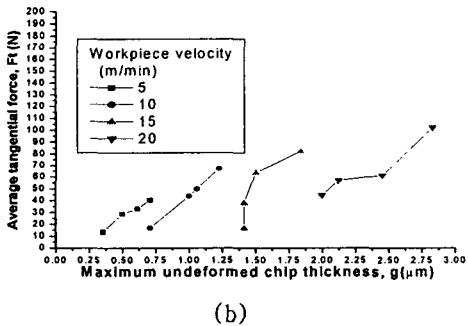
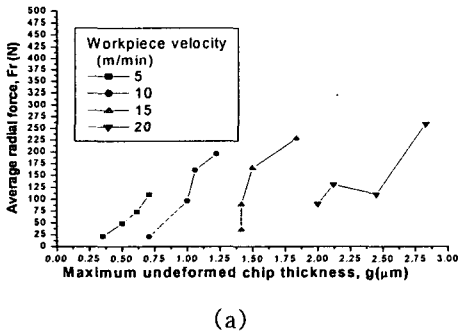


Fig. 9 Average (a) radial ( $\overline{F_r}$ ) and (b) tangential ( $\overline{F_t}$ ) grinding force.

#### 4.3 평균미변형칩두께 및 평균연삭단면적

Fig. 10(a)는 식(7)를 이용하여 얻어진 평균미변형칩두께 ( $h_{av}$ )의 변화를 연삭깊이에 따라 나타낸 것이며, Fig. 10(b)는 평균입자미변형칩모델을 이용하여 구한 연삭입자의 평균연삭단면적을 최대미변형칩두께,  $g$ 에 따라 나타낸 것이다. Fig. 10(a)에서 연삭깊이( $Z$ )가 커질 수록 평균미변형칩두께가 증가하고 있다. 이는 연삭깊이( $Z$ )가 커질수록 최대미변형칩두께가 커지기 때문에 평균미변형칩두께도 증가하기 때문이다. Fig. 10(b)에서 최대미변형칩두께,  $g$ 가 커짐에 따라 입자당 절삭되는 평균연삭단면적도 증가하고 있다.

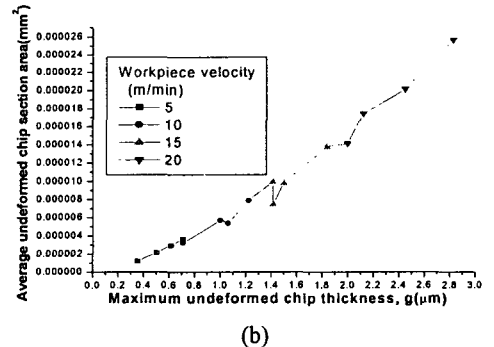
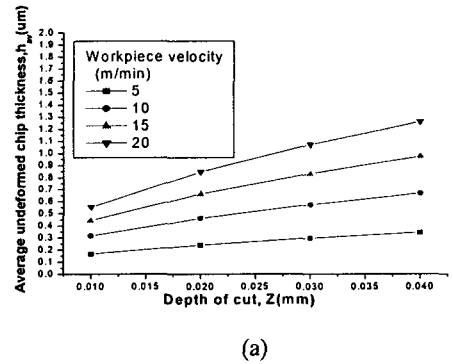
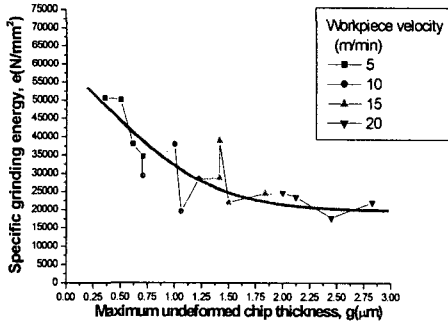


Fig. 10 (a) Average undeformed chip thickness and (b) average undeformed chip section area.

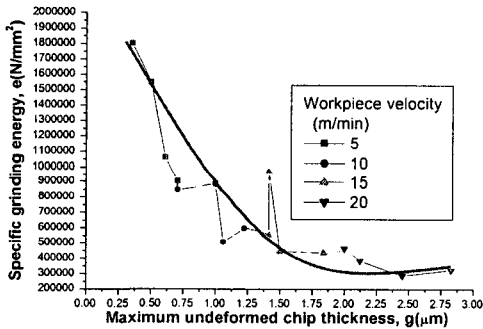
#### 4.4 비연삭에너지

Fig. 11(a)는 통상적 비연삭에너지,  $e$ 를 나타낸 것이며,, Fig. 11(b)는 평균입자 비연삭에너지,  $e_a$ 를 나타낸 것이다. 본 연구에서 제시한 평균입자 비연삭에너지,  $e_a$ 는 통상적 비연삭에너지,  $e$ 보다 약30배정도 크게 나타나고 있다. 이는 연삭을 개시하면서부터 전체 연삭날이 절삭(cutting)에 관여하는 것이 아니라 극히 일부만 절삭에 관여

하고 나머지는 경작(plowing)이나 소성유동으로 인한 미끄러짐(sliding)등의 현상이 발생하기 때문이라 판단된다.<sup>(6)</sup>



(a)



(b)

**Fig. 11 (a) Conventional specific grinding energy and (b) specific grinding energy using average grain model.**

## 5. 결론

1. 연삭분력의 측정으로부터 평균반경방향힘( $F_r$ )과 접선방향힘( $F_t$ )을 구할 수 있었으며, 최대미변형칩두께( $h_{max}$ )가 커질수록 공작물과 연삭접촉길이가 커지며, 이에 따라 단면적도 증가였다.

2. 평면연삭모델의 평균연삭단면적을 이용하여 연삭기공에서 미시적으로절삭(cutting)에 관여한 연삭입자의 평균입자 비연삭에너지,  $e_a$ 를 구할 수 있었고, 통상적 비연삭에너지,  $e$ 와 비교해 상당한 차이를 나타내었다.

3. 비연삭에너지,  $e$ 와 평균입자 비연삭에너지,  $e_a$ 모두 최대미변형칩두께( $h_{max}$ )가 증가할수록 지수함수적으로 감소하였다.

## 참 고 문 헌

- (1) K. Brach, D. M. Pai, E. Ratterman, M. C. Shaw, 1988, "Grinding Force and Energy", Journal of Engineering for Industry, Vol. 110, pp.25-31.
- (2) S. Malkin, 1989 Grinding Technology - Theory and Application of Machining with Abrasives, John Wiley & Sons.
- (3) H.J. Kim, I.H. Heo, S.D. Woo, Y.M. Lee, 1999, "Effects of Maximum Grit Depth of Cut on Grinding Characteristics", Trans. of KSMTE, Vol. 8, No. 5, pp.63-69.
- (4) Y.M. Lee, S.I. Chang, M.K. Seo, J.W. Son, 2004, "Shear and Friction Characteristics in Down-end Milling with Different Helix Angles" Trans. of KSMTE, Vol.13, No.2, pp.17-24.
- (5) T.W. Hwang, C.J. Evans, S. Malkin 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) C. Chen, Y. Jung, I. Inasaki, 1989, "Surface, Cylindrical and Internal Grinding of Advanced Ceramics. Grinding Fundamentals and Applications" Trans. ASME, Vol.39, pp. 201-211.