

## 평균입자 연삭모델에 의한 최대미변형칩두께의 예측

이영문\*, 최원식<sup>+</sup>, 손재환<sup>++</sup>, 배대원<sup>+++</sup>, 손성필<sup>+++</sup>, 황근식<sup>+++</sup>

(논문접수일 2006. 8. 4, 심사완료일 2007. 1. 19)

### Estimation of the Maximum Undeformed Chip Thickness Using the Average Grain Model

Y. M. Lee\*, W. S. Choi<sup>+</sup>, J. H. Son<sup>++</sup>, D. W. Bae<sup>+++</sup>, S. P. Son<sup>+++</sup>, K. S. Hwang<sup>+++</sup>

#### Abstract

In order to estimate the maximum undeformed chip thickness in grinding operation, it is necessary to obtain the successive cutting point spacing. In the past it was obtained by experiments. In this paper, the average successive cutting point spacing has been obtained using the given grinding input conditions and it is possible to estimate the maximum undeformed chip thickness without using any experimentally obtained data. The validity of the proposed analysis has been verified based on two sets of grinding scratch tests using WA and CBN grinding wheels.

**Key Words** : Average grain(평균입자), Maximum undeformed chip thickness(최대미변형칩두께), Successive cutting point spacing(연속절삭날간격), Grinding scratch spacing(연삭스크래치 간격)

#### 기호설명

|             |                                                           |                 |                                                                 |
|-------------|-----------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------|
| $a$         | = average successive cutting point spacing, $\mu\text{m}$ | $b_{est}$       | = estimated grinding scratch spacing, $\mu\text{m}$             |
| $b$         | = grinding scratch spacing, $\mu\text{m}$                 | $d_g$           | = average diameter of grain, $\mu\text{m}$                      |
| $b_{meas.}$ | = measured grinding scratch spacing, $\mu\text{m}$        | $h_{max}$       | = maximum undeformed chip thickness, $\mu\text{m}$              |
| $b_g$       | = grain engagement width, $\mu\text{m}$                   | $h_{max-conv.}$ | = conventional maximum undeformed chip thickness, $\mu\text{m}$ |
| $D$         | = wheel diameter, mm                                      | $h_{max-est.}$  | = estimated maximum undeformed chip thickness, $\mu\text{m}$    |

\* 경북대학교 기계공학부 (ymlee@knu.ac.kr)

주소: 702-701 대구시 북구 산격동 1370

+ 부산대 바이오시스템공학부

++ 대구기계부품연구원

+++ 경북대 대학원 기계공학과

- $M$  = mesh number
- $N$  = number of cutting points per unit area, no./ $\mu\text{m}^2$
- $S$  = structure number
- $v$  = workpiece velocity, m/min
- $V$  = wheel peripheral velocity, m/min
- $w$  = average grain spacing,  $\mu\text{m}$
- $Z$  = depth of cut,  $\mu\text{m}$

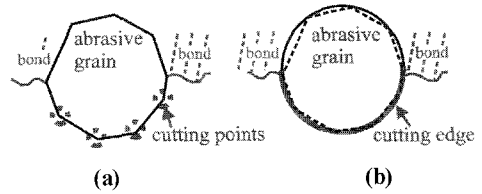


Fig. 1 Shape and cutting edge(bold line) of an abrasive grain (a) real shape (b) idealized shape

## 1. 서론

연삭가공(grinding)은 슛돌 표면에 돌출하여 있는 수많은 연삭입자(abrasive grain)의 절삭작용에 의해 이루어진다.

그러나 연삭입자의 불규칙성으로 인하여 입자의 크기, 간격, 돌출정도가 다르고 이에 따라 칩생성에 관여하는 기하학적 변수들이 매입자마다 달라진다. 따라서 연삭가공공정 해석 시 통계적, 확률적 개념의 도입이 불가피하다<sup>(1)</sup>.

절삭가공에서와 같이 연삭가공공정 해석 시에도 가장 중요한 기하학적 파라미터 중의 하나는 최대미변형칩두께(maximum undeformed chip thickness)이다.

연삭가공에서의 칩생성기구에 대한 체계적인 연구가 이루어지기 시작할 때부터 최근에 이르기까지 많은 연구자들에 의해 최대미변형칩두께에 대한 식들이 제시되었다. 그러나 대부분의 식에서는 실험적으로 결정되는 기하학적 변수인 연속절삭날간격(successive cutting point spacing)을 포함하고 있으며 이로 인해 제시된 식들의 실용적 응용이 제한되었다<sup>(2)</sup>.

본 연구에서는 주어진 연삭입력조건만을 이용하여 평균 연속절삭날간격(average successive cutting point spacing)을 이론적으로 구하였다. 또한 구해진 평균연속절삭날간격을 이용하여 최대미변형칩두께(maximum undeformed chip thickness)의 예측을 시도하고, WA 및, CBN 슛돌에 의한 스크래치 시험을 통하여 이의 타당성을 검증하였다.

## 2. 평균입자 연삭모델

실제연삭입자는 Fig. 1 (a)에 나타낸 바와 같이 불규칙 형상의 다면체이고, 절삭점(cutting points)들이 연결되어 다수의 절삭날(cutting edges)을 형성하고 있다. 본 연구에서는 모든 연삭입자가 동일한 크기의 구(sphere)의 형상이고 균일하게 분포하며, 절삭날도 구의 단면인 임의의 원호로 구성되어 있다고 가정하였다<sup>(3)</sup>.

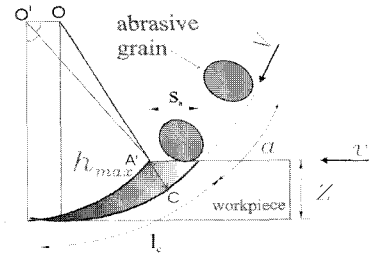


Fig. 2 Cutting path in down-surface grinding process

### 2.1 최대미변형칩두께( $h_{max}$ )

Fig. 2는 균일형상·분포의 연삭스�돌에 의한 평면 하향연삭공정에서 공작물이 이송하는 것을 대신하여 연삭스�돌이 입자당  $S_a$ 만큼 이송하면서 회전할 때 연삭입자의 절삭경로를 나타낸 것이다.

그림에서  $l_c$ 는 연삭스�돌과 공작물의 접촉길이를 나타내며,  $a$ 는 연속절삭날간격을 나타낸 것이다. 또한 그림에서 연삭입자의 최대미변형칩두께  $h_{max}$ 는  $\overline{A'C}$ 로 표시되며 근사적으로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다<sup>(4)</sup>.

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

식 (1)에서  $a$ 는 연삭스�돌의 연속절삭날간격(successive cutting point spacing)이며,  $v$ 는 공작물속도,  $V$ 는 연삭스�돌의 원주속도,  $Z$ 는 절입깊이, 그리고  $D$ 는 연삭스�돌의 직경을 나타낸다.

이들 인자 중  $v$ ,  $V$  및  $Z$ 는 연삭조건(grinding conditions)을 구성하는 인자이며,  $D$ 는 슛돌형상을 나타내는 인자로서 이들의 값은 연삭가공 전에 미리 설정 하여주는 값이다. 한편 연속절삭날간격  $a$ 는 후술하는바와 같이 연삭방향으로 정렬하고 있는 인접입자간의 간격으로 통상적으로 측정에 의해 구해지는 값이다.

## 2.2 평균연속절삭날간격(a)

### 2.2.1 평균연삭입자간격(w)

재래식 연삭숫돌의 결보기 체적 중 순수하게 연삭입자가 차지하는 체적백분율  $V_g(\%)$ 은 경험적으로 식 (2)와 같이 주어진다<sup>(5)</sup>.

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

여기서  $S$ 는 숫돌의 조직번호(structure no.)이다.

초연마재 숫돌의 경우 체적백분율  $V_g(\%)$ 은 식 (3)과 같이 집중도(concentration no.)를 4로 나누어준 값으로 주어진다<sup>(6)</sup>.

$$V_g(\%) = \frac{\text{Concentration no.}}{4} \quad (3)$$

재래식 연삭숫돌의 경우에 연삭입자의 평균직경  $d_g(\mu m)$ 는 경험적으로 식 (4)와 같이 주어진다. 초연마재 숫돌의 경우는 FEPA(Federation Europeenne des Fabricants de Produits Abrasifs) 표준표시법을 이용하여 입자의 평균직경을 나타낼 수 있다<sup>(7)</sup>.

$$d_g(\mu m) = 28M^{-1.1} \times 10^3 \quad (4)$$

Fig. 3 (a)은 실제의 연삭숫돌 단위체적 내에 불규칙하게 분포된 연삭입자를 나타낸 것이며, Fig. 3 (b)는 연삭입자가 균일하게 분포된 경우를 가정하여 나타낸 것이다.

Fig. 3 (b)로부터 연삭입자간의 평균간격  $w(\mu m)$ 는 체적백분율  $V_g(\%)$ 의 기하학적인 정의로부터 단위체적  $w^3$ 에 지름이  $d_g$ 인 구형의 입자 하나가 있다고 가정하면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$w = d_g \sqrt[3]{\frac{100\pi}{6v_g}} \quad (5)$$

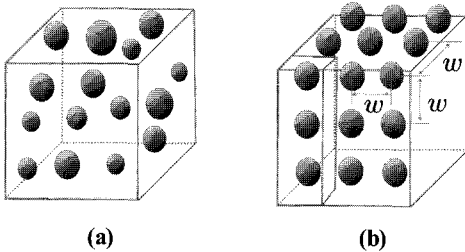


Fig. 3 Schematics of (a) grain distribution in a real grinding wheel and (b) equivalent uniform distribution of grain

### 2.2.2 연삭자국 폭( $b_g$ )

Fig. 4는 연삭입자의 일부가 공작물에 절입한 상태를 나타낸 것이다. 그림에서 해칭된 부분은 절입부 단면을 나타내며  $h_{max}$ 만큼 절입하였을 때 절입부의 직경, 즉 연삭자국의 폭은  $b_g$ 가 된다. 기하학적인 관계로부터  $b_g$ 는 식 (6)과 같이 된다.

$$b_g = 2\sqrt{(d_g - h_{max})h_{max}} \quad (6)$$

### 2.2.3 연속절삭날간격(a) 결정

연속절삭날간격  $a$ 는 숫돌표면상의 단순히 이웃하는 연삭입자의 평균간격  $w$ 가 아니고, Fig. 5에서 보는 바와 같이 숫돌표면상에서 숫돌회전방향으로 정렬하고 있는 동일원주상 인접하는 연삭입자 사이의 간격이다.

그림에 나타낸 바와 같이 입자 절입부의 둘레를 원으로 두고 입자의 입자 중심을 원점으로 가정하였을 때 입자 절입부 둘레의 원의 방정식은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x^2 + y^2 = \frac{b_g^2}{4} \quad (7)$$

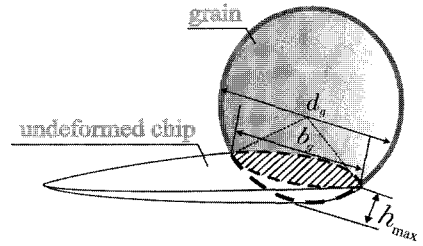


Fig. 4 Schematic of grain engagement in work

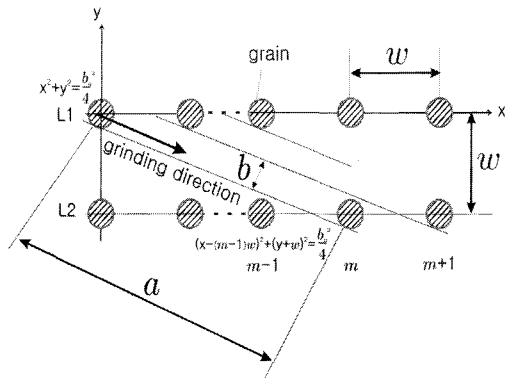


Fig. 5 Average successive cutting point spacing,  $a$  and successive cutting point spacing,  $w$

원점에 있는 입자와 이보다 한줄 아래  $m$ 번째의 입자가 연삭방향에서의 서로 인접하는 입자라 할 때, 이들 입자에 의한 절입부(빗금친 원)를 동시에 접하는 직선의 방정식은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = -\frac{1}{m}x - \frac{b_g}{2}\sqrt{1 + \frac{1}{m^2}} \quad (8)$$

기하학적으로 연속절삭날간격  $a$ 가 숫돌회전방향(연삭방향)에서 이웃하는 입자와 겹치지 않기 위해서는 식 (8)의 직선이  $m-1$ 번째 입자의 둘레와 만나지 않거나 최소한 한점에서 접해야한다. 따라서 식 (8)을  $m-1$ 번째 입자 절입부의 둘레의 방정식,  $(x - (m-1)w)^2 + (y+w)^2 = b_g^2/4$ 에 대입한 후, 그 방정식의 판별식  $D$ 가  $D \leq 0$ 의 조건을 만족하여야 한다. 이 조건을  $m$ 에 대해서 정리하면 식 (9)와 같다.

$$0 \leq m \leq \sqrt{\frac{w^2}{b_g^2} - 1} \quad (9)$$

따라서 식 (9)를 만족하는  $m$ 의 최대값  $m_{max}$ 는 식 (10)과 같다.

$$m_{max} = \sqrt{\frac{w^2}{b_g^2} - 1} \quad (10)$$

이론적인 연속절삭날간격  $a$ 는 중심이 원점인 임의의 기준 입자와  $m_{max}$ 번째 입자 사이의 거리이며 식 (11)과 같다.

$$a = w\sqrt{m_{max}^2 + 1} \quad (11)$$

연삭입자에 의해 공작물에 생성되는 연삭스크래치(grinding scratch)의 평균간격  $b$ 는 기하학적인 관계에 의해서 식 (12)와 같다.

$$b = \frac{w^2}{a} \quad (12)$$

식 (10), (11), (12)로부터 이론적인 스크래치 간격  $b_{est.}$ 는 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$b_{est.} = \frac{w}{\sqrt{m_{max}^2 + 1}} = b_g \quad (13)$$

또한 식 (13), (6)으로부터  $b_{est.}$ 는 식 (14)와 같이 나타낼

수 있다.

$$b_{est.} = 2\sqrt{(d_g - h_{max})h_{max}} \quad (14)$$

또한 연삭공정 시 연삭입자의 지름  $d_g$ 에 비해서 최대미변형칩두께  $h_{max}$ 가 매우 작은 값이므로 식 (6)은 근사적으로 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$b_g \approx 2\sqrt{d_g h_{max}} \quad (15)$$

식 (15), (10), (11)으로부터 연속절삭날간격  $a$ 는 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$a \approx \frac{w^2}{2\sqrt{d_g h_{max}}} \quad (16)$$

식 (16)을 식 (1)에 대입하여  $h_{max}$ 에 대하여 정리하면 식 (17)과 같다.

$$h_{max} = \left( \frac{w^2}{\sqrt{d_g}} \frac{v}{V} \sqrt{\frac{Z}{D}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (17)$$

식 (17)에서 보는바와 같이 최대미변형칩두께  $h_{max}$ 는 평균입자간격  $w$ [식 (5)], 입자의 평균직경  $d_g$ [식 (4)] 및 숫돌의 직경  $D$ 와 연삭가공조건인 공작물의 이송속도  $v$ , 연삭숫돌의 원주속도  $V$ , 절입깊이  $Z$ 등 연삭입력조건이 주어지면 예측가능하다.

### 3. 연삭스크래치 시험

#### 3.1 실험조건

스크래치 시험을 통하여 실제 연삭스크래치간격  $b_{meas.}$ 를 측정하고 평균입자모형을 이용한 최대미변형칩두께 예측의 타당성여부를 검증한다.

연삭스크래치간격을 측정하기위해 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 평면연삭기를 이용하여 회전하는 숫돌을 매끄러운 표면의 시편위에 지나가게 함으로써 표면에 나타난 스크래치간격을 측정하였다. 실제 연삭입자가 불규칙적으로 분포되어 있는 점을 고려해 스크래치 하나에 여러 개의 연삭입자가 지나가는 것을 막기 위하여 숫돌은 최대한 천천히 회전시키고 상대적으로 시편의 이송속도를 빠르게 하였다<sup>(8)</sup>.

Table 1은 연삭스크래치 시험조건을 나타낸 것으로 드레싱을 한 숫돌을 사용하였으며 스크래치 시험 시 절입깊이

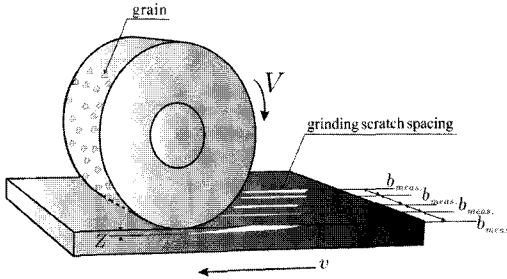


Fig. 7 Schematic diagram for grinding scratch spacing measurement

Table 1 Conditions for the scratch tests

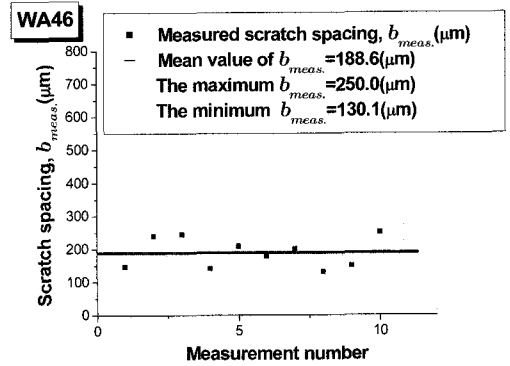
|                           |             |
|---------------------------|-------------|
| Wheel speed(rpm)          | 60          |
| Z( $\mu\text{m}$ )        | 5           |
| Workpiece Velocity(m/min) | 30          |
| Grinding wheels           | WA46K7V     |
|                           | WA60K7V     |
|                           | WA80K7V     |
|                           | CBN120R125V |
|                           | CBN170R125V |
|                           | CBN325R125V |

Z는 5( $\mu\text{m}$ )로 하였다.

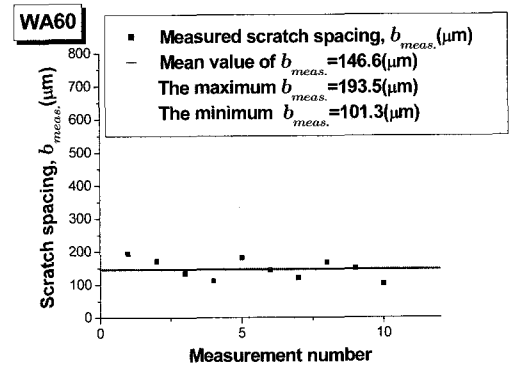
### 3.2 연삭스크래치 시험결과

Fig. 8의 (a)부터 (c)까지는 WA숫돌의 입도별로 10회 측정된 연삭스크래치간격  $b_{meas.}$ 를 나타내었다. 측정된  $b_{meas.}$  중 최대 값과 최소 값을 식 (12)의  $b$ 에 대입하여 Table 2에 나타난 바와 같이  $a$ 값의 범위를 구하고 이로부터 식 (1)의  $h_{max}$ 의 범위를 구하였다. 이 때 식 (12)의 평균입자간격  $w$ 는 단위면적당의 입자수  $N$ 를 측정하여  $w = 1/\sqrt{N}$ 의 관계로부터 얻어진 값을 사용하였다. Table 2에 나타난 바와 같이 예측된  $h_{max-est.}$ [식 (17)]은 기준에 제시된  $h_{max-conv.}$ [식 (1)]의 최대 값과 최소 값 사이의 범위에 존재하였다.

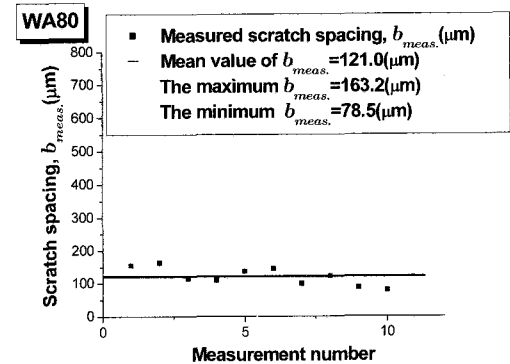
Fig. 9의 (a)부터 (c)까지는 CBN숫돌의 입도별로 WA숫돌과 같은 조건의 시험을 통해 측정된  $b_{meas.}$ 값을 나타내었다. Table 2에 나타난 바와 같이 CBN의 경우 역시 WA숫돌과 비슷한 결과를 나타내었고 본 논문에서 예측된  $h_{max-est.}$ [식 (17)]값이 기준에 제시된  $h_{max-conv.}$ [식 (1)]의 최대 값과 최소 값 사이의 범위에 존재함을 알 수 있었다.



(a)

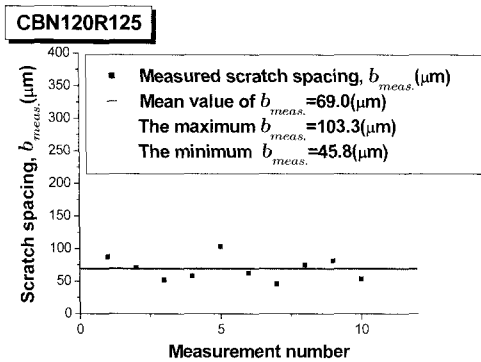


(b)

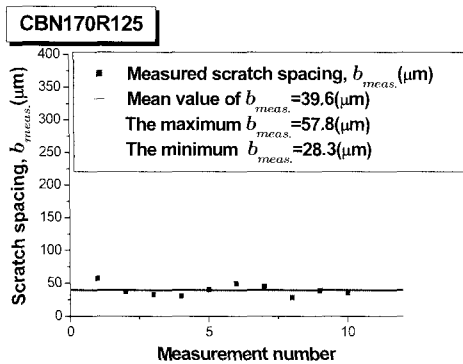


(c)

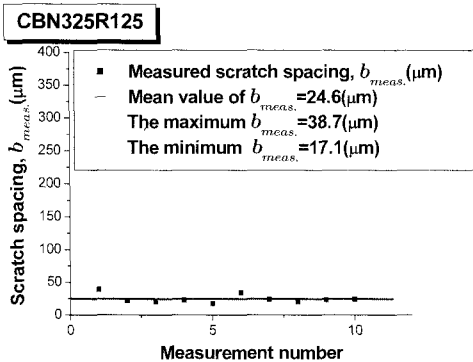
Fig. 8 Scratch spacings measured for (a) WA46, (b) WA60 and (c) WA80



(a)



(b)



(c)

Fig. 9 Scratch spacing measured for (a) CBN120, (b) CBN170 and (c) CBN325

Table 2 Comparison of conventional  $h_{max-conv.}$  by eqn.1 with estimated  $h_{max-est.}$  by eqn. 17( $\mu m$  unit)

|        | $w$ | Max. $a$ | Min. $a$ | Max. $h_{max-conv.}$ | Min. $h_{max-conv.}$ | $h_{max-est.}$ |
|--------|-----|----------|----------|----------------------|----------------------|----------------|
| WA46   | 640 | 3143     | 1636     | 13.3                 | 6.9                  | 7              |
| WA60   | 438 | 1894     | 991      | 8.0                  | 4.2                  | 5.2            |
| WA80   | 322 | 1321     | 635      | 5.6                  | 2.7                  | 3.8            |
| CBN120 | 196 | 840      | 372      | 3.5                  | 1.6                  | 3.1            |
| CBN170 | 130 | 596      | 292      | 2.5                  | 1.2                  | 2.2            |
| CBN325 | 96  | 541      | 239      | 2.3                  | 1.0                  | 1.1            |

#### 4. 결론

본 논문에서는 평균입자 연삭모델을 도입하여 연속절삭 날간격  $a$ 와 최대미변형칩두께  $h_{max}$ 를 연삭입력조건만으로 예측할 수 있는 방안을 제시하였다.

- (1) 본 논문에서는 기존의 실험에 의한 연속절삭날간격의 측정 없이 연삭입자 크기와 조직도 및 집중도와 같은 숫돌의 사양과 연삭가공조건만으로 최대미변형칩두께를 예측하였다.
- (2) 예측된 최대미변형칩두께  $h_{max-est.}$ 는 WA 및 CBN숫돌에 의한 스크래치 시험과 단위면적당 연삭입자의 측정으로부터 구한 기존의 최대미변형칩두께  $h_{max-conv.}$ 의 범위 내에 값을 나타내었다.

#### 참고 문헌

- (1) Malkin, S., 1989, *Grinding Technology - Theory and Application of Machining with Abrasives*, John Wiley & Sons, pp. 45.
- (2) Snoeys, R., 1974, "The Significance of Chip Thickness in Grinding", *Annals of CIRP*, Vol. 23/2, pp. 227~237.
- (3) Lee, Y. M., Choi, W. S., Chang, S. I., Bae, D. W., Son, J. H. and Lee, H. G., 2005, "Analysis of specific grinding energy using average grain model," *Trans. KSMTE*, Vol. 14, pp. 61~68.
- (4) Malkin, S., 1989, *Grinding Technology - Theory and Application of Machining with Abrasives*, John

Wiley & Sons, pp. 46~59.

- (5) Malkin, S., 1989, *Grinding Technology - Theory and Application of Machining with Abrasives*, John Wiley & Sons, pp. 22~24.
- (6) Krar, S. F. and Ratterman, E., 1990, *Superabrasives: Grinding and Machining With CBN and Diamond*,

Gregg Division McGraw-Hill.

- (7) *Checking the Size of diamond Abrasive Grain*, American National Standard ANSI B74.16-1982.
- (8) Malkin, S., 1989, *Grinding Technology - Theory and Application of Machining with Abrasives*, John Wiley & Sons, pp. 95~96.