

# CBN 슷돌을 이용한 연삭에서 표면거칠기와 연삭력 평가

하만경\*, 곽재섭\*, 이영석\*\*, 구 양\*, 윤문철\*

## Evaluation of Surface Roughness and Grinding Force Using CBN Wheel

Man Kyung Ha\*, Jae Seob Kwak\*, Young Suk Lee\*\*, Yang Koo\* and Moon Chul Yoon\*

### ABSTRACT

In these days, according to increasing the technical development, the dimension of a product goes up for ultra-precision. For the net shape manufacturing, grinding is a important process that influences directly the accuracy and the integrity of produced products. In this study, an experimental evaluation was carried out. Workpiece materials were used STD11, SUS304, and STB2 in accordance with varying condition of feedrate and depth of cut. From measuring the grinding force and the surface roughness, material characteristics of grinding by using CBN wheel were examined.

**Key Words** : Ultra-Precision(초정밀), CBN(입방정 질화붕소), Grinding Force(연삭력), Feedrate(이송속도), Surface Roughness(표면거칠기)

### 1. 서론

일반적으로 제품의 표면성상은 생산단계에서부터 완성여부 및 가공작업의 이상유무를 판단할 수 있는 가장 효율적인 부분으로 공정상에 중요한 문제로 대두되어 왔었다.

최근의 기계가공은 기술의 발전에 따라 고정도, 고능률, 고속화에 대한 요구가 증대되고 있다. 이중 연삭가공(Grinding Operation)은 입자(Grain)에 의한 고속절삭으로 초경합금 등과 같은 고정도강에서 경질고무 등과 같은 비교적 연질의 재료까지 광범위한 공작물을 가공할 수 있는 절삭가공으로 아주 적은 양의 절입깊이를 사용하므로 형상 및 가공정도가 높고, 가공품위와 표면거칠기가 양호한 마무리 가공법으로 적합하다.<sup>(1)</sup>

연삭스틀은 연삭입자에 따라 알루미나( $Al_2O_3$ )계와 탄화규소계가 범용적으로 사용되어 왔지만, 미국의 GE사가 개발한 초연마제(Super Abrasive)라 할 수 있는 다이아몬드와 CBN(Cubic Boron Nitride, 입방정 질화붕소)을 60년대 후반부터 합성하여 연삭분야에 본격적으로 이용하기 시작하였다. 이중 특히 CBN은 고정도이면서 열전달률이 높아 입자의 작은 절삭날이 마모되지 않고, 절삭날을 잘 유지하므로 매우 양호한 절삭을 할 수가 있다.<sup>(2)</sup>

CBN 연삭스틀의 적용범위는 고속절삭공구를 재연삭하는 초보적인 작업으로부터 자동차산업에 사용되는 경화강 부품의 초고속 연삭까지 다양하다. 또한, 난연삭 철계재료 연삭에 사용되는 일반연마재 보다 경도가 2배 이상 높으며, 우수한 연삭능력과 높은 열전도율로 열의 축적을 방지하여 슷돌

1997 2001년 6월 11일 접수

\* 부경대학교 기계공학부

\*\* 부경대학교 대학원 기계공학과

의 눈베움>Loading)현상과 피삭재의 금속학적 손상을 최소화한다. 따라서 정밀한 피삭재 형상과 치수 정밀도를 쉽게 얻을 수 있다.<sup>(3)</sup>

본 연구에서는 CBN 슛들을 사용하여 연삭가공 후에 나타난 금형강(STD11), 베어링강(STB2), 스테인레스강(SUS304)의 표면거칠기(Ra)와 수직연삭력(Fn) 측정 및 공작물의 표면사진 촬영 등을 통해서 표면성상을 분석하였다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 표면거칠기 이론

Fig. 1은 표면거칠기를 기하학적으로 도시한 것으로 연삭가공시의 표면거칠기는 여러 많은 요인에 의해 영향을 받는데 크게 분류하면 다음과 같다. 첫째 연삭스튐 입자의 크기, 슛들의 직경, 입도, 결합제의 종류 등 연삭스튐에 의한 요인, 둘째로 슛들의 드레싱 상태, 슛들마모, 공작물의 종류에 의한 요인과 마지막으로 가공속도, 이송속도, 연삭유제의 종류와 공급방법에 기인한 가공조건 등에 의해서 분류할 수 있다.

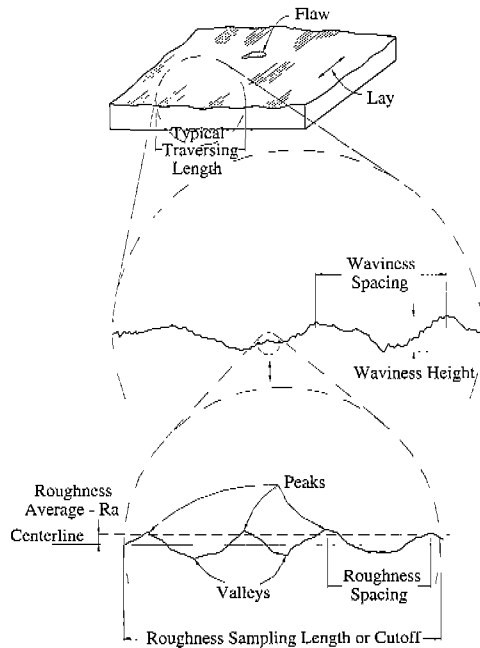


Fig. 1 Schematic diagram of surface roughness

연삭가공에서 얻어진 중심선 표면거칠기의 이론식은 다음과 같이 주어진다.<sup>(4)</sup>

$$R_a = \frac{1}{9\sqrt{2}} \left( \frac{v_w \cdot a}{v_s \cdot d^{1/2}} \right)^2 \quad (1)$$

여기서,  $v_s$ 와  $v_w$ 는 슛들의 원주속도와 공작물의 속도이고,  $d$ 와  $a$ 는 각각 슛들의 직경과 슛들의 주면에 분포한 절삭입자들의 평균간격이다.

Fig. 1은 표면거칠기의 개략도로써 표면거칠기의 측정은 일반적으로 측정식 조도계를 이용하고, 정량적인 평가를 위해 충분한 표본수를 획득할 수 있는 샘플 길이를 선택한다. 연삭가공과 같은 다듬질 가공된 표면의 거칠기 측정에 사용되는 샘플 길이는 0.8mm 정도가 일반적이다.

### 2.2 선형회귀분석 이론

도표화된 데이터를 시각적으로 조사한 후에 점들을 통과하는 최적의 선을 그려내는데 있어서 완전한 직선상에 정의할 수 없는 경우는 보간법이 널리 사용된다. 여기에서 주관성을 배제하고 적합한 곡선을 긋기 위한 한 가지 방법이 데이터점들과 곡선의 거리차를 최소화시키는 곡선을 유도하는 것인데, 이 목적을 성취하는 기술을 최소제곱회귀분석(Least-squares Regression)이라 한다.

최소제곱 근사의 가장 간단한 예는  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ 의 관측치에 직선을 적합시키는 것이다. 이 직선에 대한 수학적인 표현은

$$y_i = a_0 + a_1 x_i + e_i \quad (2)$$

이고,  $a_0$ 은 절편,  $a_1$ 은 기울기,  $e$ 는 관측치와 모델값의 오차이며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$e_i = y_i - a_0 - a_1 x_i$$

데이터의 흐름을 나타내는 최적의 직선을 구하는 방법 중 하나는 오차의 합을 최소화시키는 것이다. 즉,  $n$ 이 점들의 개수를 나타낼 때 잔차의 제곱의 합  $S_r$ 을 다음과 같이 최소화 할 수 있다.

$$S_r = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i)^2 \quad (3)$$

$a_0$ 와  $a_1$ 값을 결정하기 위해 식(3)을 각각의 계수에 대하여 편미분을 취하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_0} = -2 \sum (y_i - a_0 - a_1 x_i)$$

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_1} = -2 \sum [(y_i - a_0 - a_1 x_i) x_i]$$

도함수가 0이라는 사실은  $S_r$ 을 최소화한다는 의미로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$0 = \sum y_i - \sum a_0 - \sum a_1 x_i$$

$$0 = \sum y_i x_i - \sum a_0 x_i - \sum a_1 x_i^2$$

$\sum a_0 = na_0$ 이므로 이 식은  $a_0, a_1$ 에 대한 2원 1차 방정식으로 주어진다.

$$na_0 + \sum x_i a_1 = \sum y_i \tag{4}$$

$$\sum x_i a_0 + \sum x_i^2 a_1 = \sum x_i y_i \tag{5}$$

이것을 정규방정식(Normal Equation)이라 부르며, 이 방정식을 풀면 다음과 같이 된다.

$$a_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \tag{6}$$

이 결과를 식(4)에 대입하면

$$a_0 = \bar{y} - a_1 \bar{x} \tag{7}$$

을 얻는다. 여기서  $\bar{y}$ 와  $\bar{x}$ 는 각각  $y$ 의 평균과  $x$ 의 평균이다.<sup>(5)</sup>

### 3. 실험장치 및 방법

Fig. 2는 개략적인 실험장치도로 평면연삭기의 테이블에 공구동력계(Tool Dynamometer)를 설치한 후 CBN 스톨로 연삭가공시 발생된 연삭력의 아날로그 신호는 증폭기를 통해 증폭되고 이를 12비트의 분해능력을 지닌 A/D 변환기를 통해 디지털화 하여 PC에서 데이터를 처리하였다. 연속적으로 표면거칠기를 측정하고 디지털카메라로 공작물의 표면도 연속적으로 촬영하였다.

본 실험에서는 하향절삭으로 한방향으로만 실시하였으며, 주축의 속도를 1,800rpm으로 일정하게 유지하고 연삭깊이를 5~20 $\mu$ m까지 5 $\mu$ m씩 변화시키며 테이블의 이송속도를 2m/min, 5m/min로 단계변화하면서 1회 가공한 후 스파그 아웃하였다. CBN 스톨은 마멸이 잘 되지않는 특성이 있지만 눈메움 현상등을 방지하고자 인프리형 다이아몬드 드레서에 의한 완성 트루잉을 행한 후 WA 스틱을 사용하여 드레싱을 행했으며 절삭유도 계속적으로 공급하면서 실험하였다.

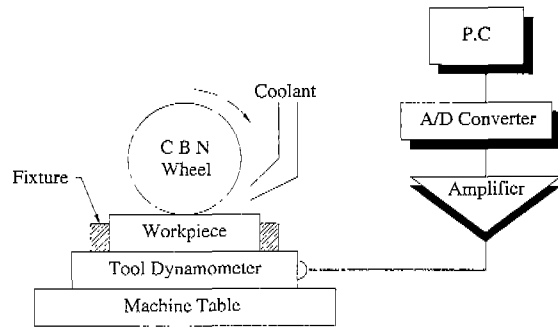


Fig. 2 Schematic diagram of experimental set-up

또한, CBN 스톨을 이용한 연삭가공 후 공작물의 표면거칠기와 연삭력을 평가하고자 하였으며, 이에 사용된 실험조건과 공작물의 화학적 조성 및 브리넬 경도를 각각 Table 1, 2, 3에 나타내었다.

Table 1 Experimental condition

Grinding machine	Horizontal spindle surface grinding
Grinding wheel	CBN (SDC120N100B) φ 250 × t 11 × φ 50.8
Workpiece	STD11, SUS304, STB2
Conditions	Wheel speed : 1,800rpm
	Table speed : 2, 5(m/min)
	Depth of cut : 5,10,15,20( $\mu$ m)
	Down cut & one pass
Coolant	Shell lubricant (soluble type, 10:1)
Charge amplifier	Kistler 5019B
Tool dynamometer	Kistler 9257B
A/D converter	ADLINK 8112PG
Surface roughness tester	Mitutoyo社 SURFTEST 301

Table 2 Chemical composition of workpieces (%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
STD11	1.5	0.4	0.6	0.03	0.03	12	0.5
SUS304	0.08	1.0	2.0	0.045	0.03	19.0	9.25
STB2	1.1	0.25	0.5	0.025	0.025	0.25	0.25

Table 3 Hardness of workpieces

	STD11	SUS304	STB2
H <sub>B</sub> (kg/mm <sup>2</sup> )	255	187	201

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 표면거칠기와 연삭력과의 관계

Fig. 3은 테이블의 이송속도와 연삭깊이의 조건 변화에 따른 연삭력과 표면거칠기를 표시한 것으로, 이 데이터를 최소제곱회귀분석을 이용하여 직선식으로 구하면 다음과 같다.

$$R_a = 0.289 + 7.11 \times 10^{-4} F_n \quad (\text{STD11})$$

$$R_a = 0.414 - 3.66 \times 10^{-4} F_n \quad (\text{SUS304})$$

$$R_a = 0.759 - 2.826 \times 10^{-3} F_n \quad (\text{STB2})$$

각 공작물별 특성을 살펴보면, STD11은 연삭력의 큰 편차에 비해서 표면거칠기가 적은 변화방향을 나타내었으나 전반적으로 연삭력이 증가함에 따라 표면거칠기가 다소 거칠어지는 경향을 나타냈다. SUS304는 Cr과 Ni의 함유량이 많은 연질의 금속으로 연삭시 눈메움 현상으로 연삭이 매우 어려운 난삭재의 특성을 나타내는 재료로서 표면거칠기와 연삭력의 상관관계에서는 분포의 변화가 상대적으로 적은 균의 형태를 이뤘는데, 이를 직선회귀식으로 나타내기는 했으나 그 의미를 해석하기에는 다소 무리가 따를 것으로 사료된다. 또한, STB2에서는 연삭력과 표면거칠기의 관계에서 상대적으로 연삭력이 증가함에 따라 거칠기가 매우 양호해지는 결

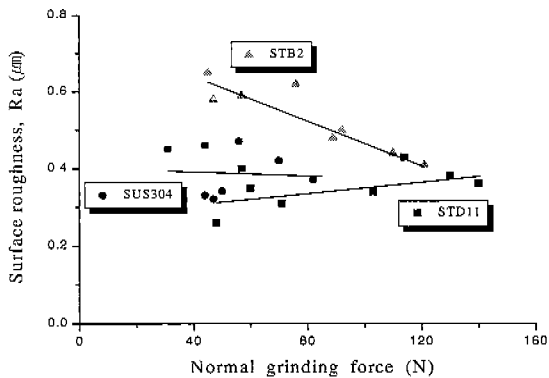


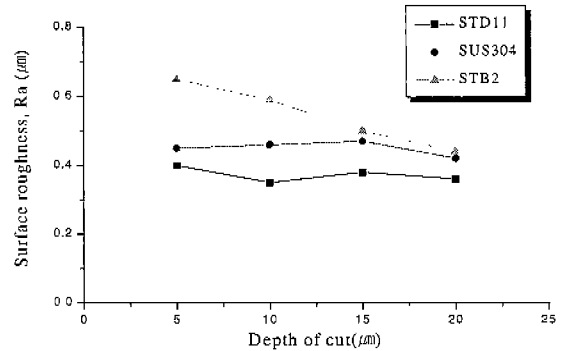
Fig. 3 Relation between surface roughness and normal grinding force

과를 나타내었는데, 이는 직선회귀식을 통해서도 확인할 수 있었다.

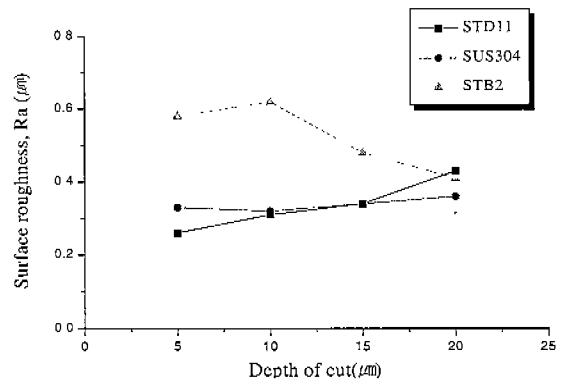
##### 4.2 이송속도와 연삭깊이의 변화에 따른 표면거칠기

Fig. 4는 테이블 이송속도를 2~5m/min, 연삭깊이를 5~20μm까지 변화시켰을 때의 표면거칠기를 측정된 값이다. 표면거칠기는 이송속도가 2m/min일 때보다 5m/min로 증가시켰을 때 모든 공작물에서 양호한 값을 나타내었으며 각 공작물별 특징을 살펴보면 다음과 같다.

STD11은 테이블의 이송속도가 2m/min일 때 연삭깊이의 변화에 따른 표면거칠기는 일정하게 나타나고, 5m/min로 증가했을 때는 다소 거칠어지는 경향을 보였으나 전체적으로는 이송속도가 증가함에 따라 향상되게 나타났으며, SUS304는 테이블의 이송속도가 증가함에 따라 표면거칠기가 다소 양호해



(a) Feedrate (2m/min)



(b) Feedrate (5m/min)

Fig. 4 Relation between surface roughness and depth of cut

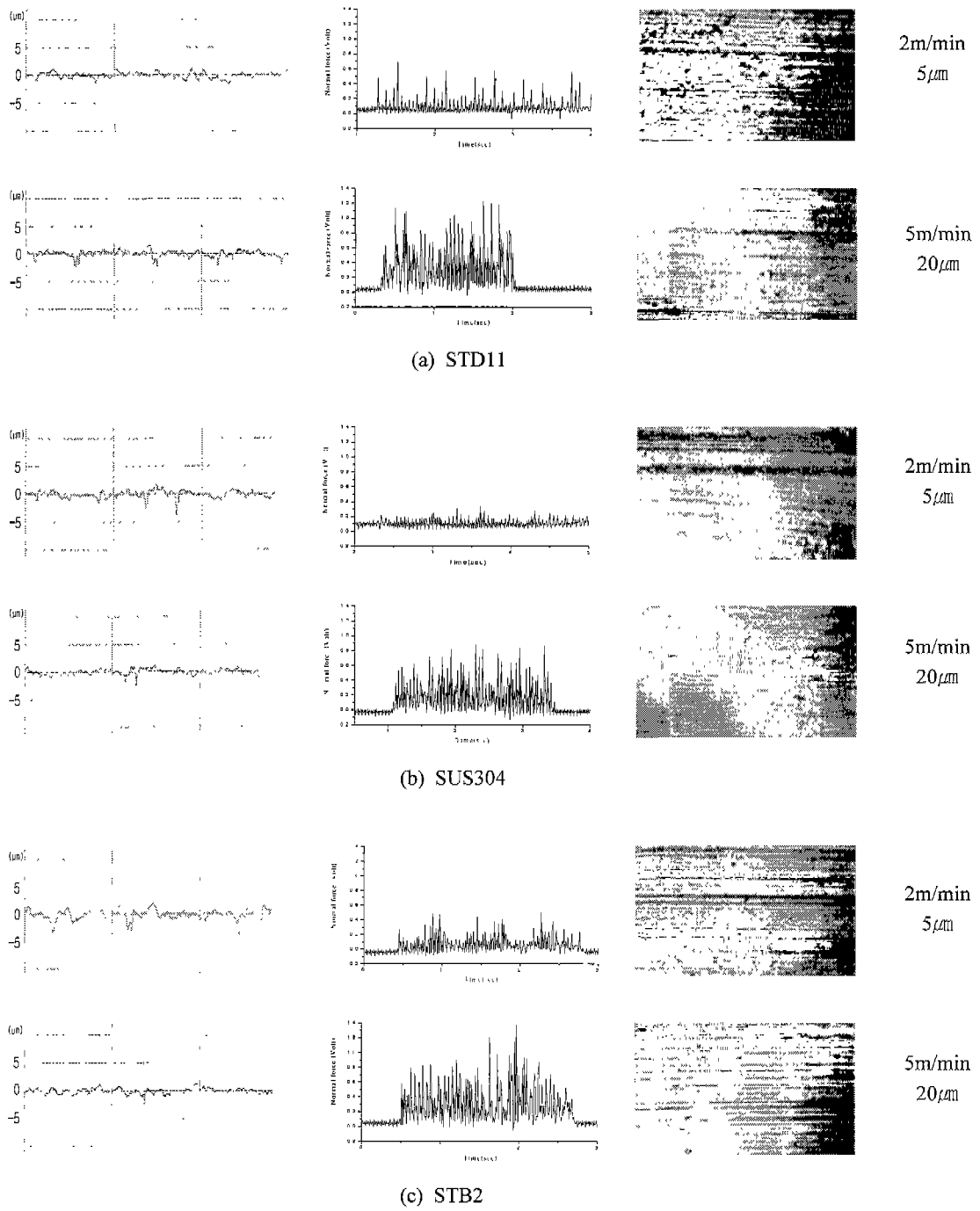
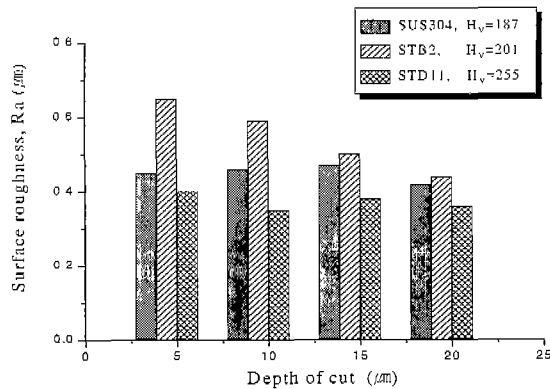
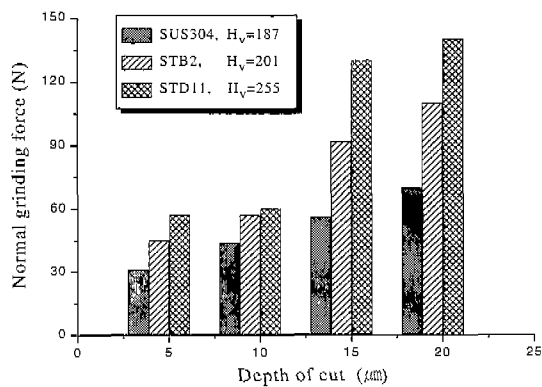


Fig. 5 Photo of workpieces and profile of surface roughness and grinding force

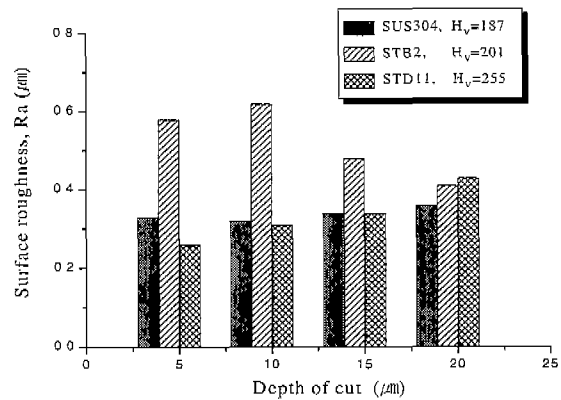
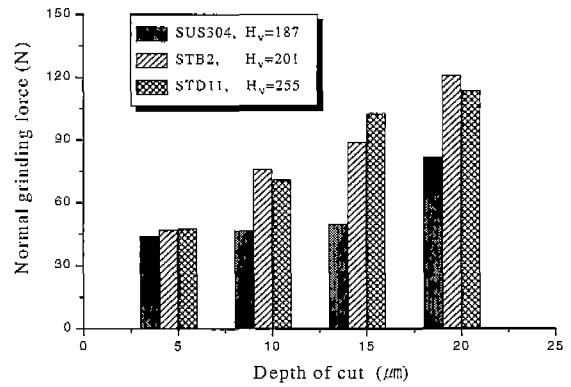
졌으나 연삭깊이에 대해서는 큰 변화를 보이지 않는 일정한 값을 나타내었으며, STB2에서는 STD11과 SUS304와는 달리 테이블의 이송속도 변화에서는 큰 차이가 없었으나 연삭깊이의 증가시에는 표면거칠기가 크게 향상되었음을 알 수 있다.

Fig. 5는 각 공작물의 표면거칠기와 연삭력 및 표면성상을 분석하고자 테이블 이송속도와 연삭깊이 변화의 조건변화 중에서 최대의 경우인 이송속도가 2m/min이고 절입깊이가 5( $\mu$ m)인 경우와 이송속도가 5m/min이며 절입깊이가 20( $\mu$ m)일때의 표면거칠기와 연삭력의 profile 및 공작물 표면을 금속현미경으로 100배의 비율로 촬영한 사진을 연속적으로 보여주며 그 결과를 살펴보면 다음과 같다. 표면거칠기 profile에서는 STB2가 이송속도와 연삭깊이의 증가에 대해서 향상되어진 형상을 나타냈으

### 4.3 경도에 따른 연삭력과 표면거칠기 평가



(a) Feedspeed 2(m/min)



(b) Feedspeed 5(m/min)

Fig. 6 Grinding force, surface roughness versus depth of cut for hardness

나 SUS304, STD11에서는 큰 특징적 변화를 보이지 않았으나 전체 공작물에서 거칠기가 양호해진 결과를 나타냈는데 이는 공작물 표면 사진을 통해서도 가공흔적이 향상된 표면성상을 통해서도 관찰할 수 있었다. 또한, 연삭력 profile를 통해 이송속도와 연삭깊이의 증가에 대해 모든 공작물에서 그 힘이 크게 증가되었음을 알 수 있다.

Fig. 6은 공작물의 경도차를 고려한 연삭력과 표면거칠기의 특성을 평가하고자 테이블의 이송속도와 연삭깊이의 조건변화에 의해서 비교, 분석한 것이다. 연삭력은 모든 공작물에서 연삭깊이가 증가하고 경질의 재료일수록 그 힘이 증가됨을 알 수 있다. 그러나, STD11( $H_v=255$ )의 경우 이송속도의 증가에 대해서 비슷한 거칠기에 비해 연삭력이 감

소되는 결과를 나타냈는데, 이는 고경도의 재질과 난삭재에서도 양호한 표면품질이 가능한 CBN의 우수성을 본 실험의 결과를 통해서도 확인할 수 있었다. 표면거칠기에서는 이송속도의 증가에 대해 모든 공작물에서 다소 양호해졌으나, 연삭깊이의 변화에 대해서는 STB2( $H_V=255$ )에서 상대적으로 거칠게 나타났으나 전반적으로 값의 변화가 크지않은 일정한 형태를 나타내고 있다. 경도차에 따른 표면거칠기에서는 큰 특징을 발견할 수 없었는데, 이는 재료의 특성에 따른 것으로 사료되어진다.

### 5. 결론

본 연구에서는 CBN(#120) 슷돌을 이용한 평면 연삭가공에서 STD11, SUS304, STB2의 공작물을 사용하여 이송속도를 2~5m/min로 연삭깊이를 5~20 $\mu$ m까지 단계변화시키면서 가공한 후 표면거칠기와 연삭력을 측정하고 표면성상을 분석한 실험결과를 나타내면 다음과 같다.

1. 표면거칠기는 STB2, SUS304, STD11의 순으로 양호하게 나타났고 연삭력은 SUS304, STB2, STD11의 순으로 크게 나타났으며, 표면거칠기는 연삭력과 일정한 상관관계보다는 각 공작물의 재료적인 특성에 따라 다른 경향을 나타냄에 따라 그 특성에 알맞는 최적의 가공조건을 선택해야 할 것으로 사료된다.
2. 테이블의 이송속도와 연삭깊이의 변화에서 표면거칠기는 이송속도가 증가함에 따라 모든 공작물에서 거칠기가 양호해졌으며 연삭깊이의 증가에 대해서 STD11은 표면거칠기가 거칠어지고, SUS304에서 양호해졌으나, STB2에서는 변화가 거의없는 일정한 값을 나타내었다.
3. 경도차를 고려한 공작물의 이송속도와 연삭깊이의 조건변화에서 연삭력은 연삭깊이와 경도의 증가에 따라 그 힘이 증가하였으며, 표면거칠기에서는 STB2가 비교적 거칠게 나타났으나 경도차에 따른 요인보다는 재료의 특성에 따라 일정한 형태를 나타내는 것으로 사료되어진다.
4. 결론적으로 CBN은 여러 가공조건 변화를 통한 실험에서 상대적으로 경질의 재료에서도 양호한 연삭가공을 행할 수 있는 적합한 슷돌임을 확인할 수 있었다.

### 참고문헌

1. 광재섭, 송지복, "AE 신호를 이용한 연삭 가공물의 표면 거칠기 예측," 한국정밀공학회지, 제17권, 제4호, pp. 240-246, 2000.
2. 원종호, "CBN 휠의 고속연삭에서의 가공특성에 관한 연구연삭특성," 고려대학교 박사 학위 논문, pp. 53-93, 1990.
3. 이종찬, 유인석, 초연마재를 이용한 연삭·절삭가공, 문운당, 1998.
4. S. Malkin, Grinding Technology-Theory and application of machining with abrasives, John Wiley & Sons, 1989.
5. 유해영, 이강섭, 공학도를 위한 수치해석, 희중당, 1994.
6. 정운교, "다인세라믹의 연삭잔류균열 깊이에 관한 실험적 연구," 창원대학교산업기술연구소는 문집, pp. 223-229, 1989.
7. ISO 4288-1985, "Rules and procedures for the measurement of surface roughness using stylus instruments".
8. John A. Webster, Zbigniew prusak, Ioan D.Marinescu, "Tribological Aspects of Vitrified-bond CBN Wheel Truing and Dressing Process," Proceeding of the Manufacturing Engineering, pp. 534-539, 1996.
9. 광철훈, 이은종, 김강, "적층 연삭 슷돌의 평면 연삭 공정 적용에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제17권, 제9호, pp. 45-52, 2000.
10. 유정구, "CBN스틀의 연삭성능에 관한 연구," 석사학위 청구논문, 단국대학교, pp. 32, 1986.