

# 세라믹 연삭에서 다이아몬드 휠의 연삭 특성 및 마멸 거동

박병규\*, 문홍현<sup>+</sup>, 김성청<sup>++</sup>

(논문접수일 2003. 2. 18, 심사완료일 2003. 7. 15)

## Grinding Characteristics and Wear Behavior of Diamond Wheel in Ceramic Grinding

B. G. Park\*, H. H. Moon<sup>+</sup>, S. C. Kim<sup>++</sup>

### Abstract

The characteristics of grinding and wear behavior of diamond wheel for grinding ceramic materials was investigated in this study. In case of  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , the wear of wheel was large, the grinding force was relatively stable and the fluctuation of surface roughness was small. On the other hand in case of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{ZrO}_2$ , the wear of wheel and surface roughness were decreasing, the grinding force was increasing. During grinding with vitrified bond wheel,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  shows renewal of cutting edge while  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{ZrO}_2$  show glazing phenomenon of cutting grains. We have found that it possible to observe the behavior of grinding wheel by grinding ratio, grinding resistance, surface roughness and cutting edge ratio. Through the grinding experiments, it was found that grinding life of diamond wheel is 20 times for  $\text{Si}_3\text{N}_4$  and 40 times for  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{ZrO}_2$ .

**Key Words :** Wear Behavior(마멸 거동), Grinding Ratio(연삭비), Glazing(날부딪), Cutting Edge Ratio(절삭날 면적율)

## 1. 서론

세라믹은 고정도와 취성을 가진 난삭재라고 할 수 있으며 소결 공정에 따른 비틀림, 굽힘 및 수축 등의 다양한 변형들을 제어하여 고정도를 요구하는 부품으로 제작하기 위해서는 고능률적이고, 고정도적인 기계적인 제거

가공이 반드시 필요하다. 세라믹의 기계적인 제거 가공 방법으로서의 다이아몬드 휠을 이용한 연삭 가공이 가장 효율적인 방법으로 알려져 있다<sup>(1-2)</sup>. 그러므로 난삭재에 대해서 연삭성능이 좋고 마멸되지 않는 휠의 요구가 가속화되고 있다. 일반 휠을 사용하여 가공하면 휠 입자의 경도가 공작물의 경도에 가깝기 때문에 가공이 좋지 않은

\* 주저자, 주성대학 캐드응용설계공학과 (bgpark@jsc.ac.kr)

주소: 363-794 충북 청원군 내수읍 덕암리 산4번지

+ 청주교도소 전산응용기계과

++ 충북대학교 기계공학부

상태이든지, 휠의 마멸이 너무 빨라서 가공비 문제가 심각하다. 따라서 세라믹은 높은 경도 때문에 절입이 어렵고, 공작물에 미소한 소성변형을 일으키기 때문에 연삭저항이 높게 나타나고 있다. 휠에 의한 연삭 가공에 있어서 연삭의 용이도를 파악하는 척도로는 소재제거율(material removal rate)과 연삭비(grinding ratio)가 주로 이용되고 있다<sup>(3)</sup>. 즉 단위시간당 얼마만큼 소재를 제거하는지, 그리고 동시에 휠의 마멸이 얼마나 적은지를 가지고 재료의 피가공성을 판단한다. 세라믹은 피가공성이 나쁘므로 이들 재료가 갖는 우수한 특성을 활용하기에는 어려운 실정이며, 연삭가공 기술의 확립은 재료를 광범위하게 이용할 수 있는 필요과제라 할 수 있다<sup>(4)</sup>.

본 연구에서는 평면연삭기에서 세라믹재료를 다이아몬드 휠(diamond wheel)로 연속가공을 하면서 휠의 마멸 거동이 어떠한 형태로 나타나는지를 관찰하기 위하여, 다이아몬드 휠 및 세라믹 재료의 마멸 체적을 구하여 연삭비를 산출하고, 연삭의 법선저항 및 표면거칠기의 변화를 고찰하였으며, 다이아몬드 휠의 마멸을 판단하기 위하여, 컴퓨터 비전 시스템<sup>(5)</sup>을 구성하고 다이아몬드 휠의 표면을 CCD 카메라로 획득하여 영상처리 한 후, 그 절삭날 면적의 변화를 측정하여 다이아몬드 휠의 거동을 가시화하고, 세라믹 난삭재의 가공 중에 발생할 수 있는 상황들을 예측하여 절삭과정에서 보다 효율적인 가공조건들을 찾고자 한다.

## 2. 연삭비 및 휠 입자의 거동

### 2.1 연삭비

연삭 중에 휠에 작용하는 힘을 연삭력이라 한다. 연삭력에는 법선분력과 접선분력이 있다. 접선분력은 연삭동력과 관계가 깊으며, 법선분력은 동력과 관계되지 않으나 휠과 공작물에 변위를 일으키게 해서 공작물에 절삭 잔량을 발생하게 하고, 진동을 유발하는 등 가공정밀도에 관련되는 중요한 요소이다. 특히 휠이 마멸되어 무디어진다든지 눈매움 등이 발생한 상태에서는 이 분력은 상당히 커진다. 연삭력은 절입량, 공작물속도가 증가하면 증가하고, 휠의 원주속도가 증가하면 감소한다.

또한, 연삭가공에서 연삭의 경제성을 평가하기 위해서는 휠이 제 성능을 발휘하는가를 알아야한다. 휠 성능의 지표가 되는 것이 연삭비이다. 연삭비는 연삭작업의 많은 인자들 즉 휠의 종류, 공작물 재료, 연삭액, 연삭깊이 및 원주속도 같은 공정변수 등에 따라 달라진다. 낮은 소재제거율은 생산성이 떨어지거나 휠의 수명을 연장시키고, 높은 소재제거

율은 휠 수명은 떨어지거나 생산성을 향상시킨다. 휠의 수명을 늘리기 위해 높은 연삭비 값을 유지하면 입자가 무디어져서 표면손상을 유발하므로 연삭비 값이 높은 것이 항상 바람직한 것은 아니다. 전반적인 경제성 분석을 통하여 제품당 최소 총 연삭비용에 기초하여 선택한다<sup>(6)</sup>.

연삭비 G를 구하는 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_w = b \cdot \Delta t \cdot \ell \tag{1}$$

$$V_s = \pi \cdot D \cdot b \cdot \Delta r \tag{2}$$

$$G = \frac{V_w}{V_s} \tag{3}$$

여기서,  $V_w$ 는 공작물의 제거된 체적,  $V_s$ 는 휠의 마멸된 체적,  $b$ 는 공작물과 휠의 폭,  $\ell$ 은 공작물의 길이,  $\Delta t$ 는 공작물의 제거된 두께,  $D$ 는 마멸 전·후의 평균 휠 지름,  $\Delta r$ 은 감소된 휠의 반지름을 나타낸다.

이 식에서 보면 연삭비가 높을수록 휠의 수명이 길어진다. 그러므로 같은 조건하에서 연삭비가 증가하다가 다시 감소하는 시점, 즉 일정량의 휠 마멸이 나타날 때까지의 시간 또는 연삭량을 연삭 수명점으로 볼 수가 있다<sup>(7)</sup>.

### 2.2 휠 입자의 거동

연삭가공에 있어서 그 입자의 거동을 살펴보면, 입자의 마멸(wear), 파괴(breakage), 탈락(dig-out), 생성(newly appeared), 부분파괴(partial breakage)의 과정이 반복되면서 일어나며, 이 과정이 진행되면서 서서히 그 수명이 다하게 된다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 A 작업면에서 B 작업면까지 가공이 진행되면서 (1)번의 마멸은 입자가 서서히 깎여 나

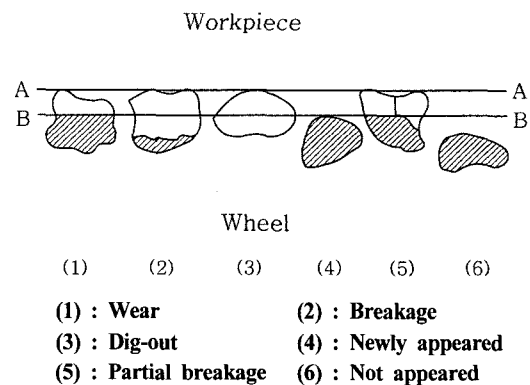


Fig. 1 Changing aspects of cutting edges

가는 현상이며, (2)번의 파괴는 입자의 일부분이 떨어져 나가는 현상이고, (3)번의 탈락은 가공에 참여하지 못하고 본드로부터 떨어져 나가는 현상이며, (4)번의 생성은 본드 아래에 숨어있던 입자가 가공이 진행되면서 서서히 나타나 연삭에 참여하는 것이며, (5)번의 부분파괴는 입자의 일부분은 떨어져 나가고 일부분은 마멸되는 현상이다<sup>(8)</sup>.

### 2.3 휠의 수명

다이아몬드 휠의 절삭 날끝은 연삭이 진행될수록 Fig. 2에서와 같이 점차 평탄하게 마멸되어 이 면적이 휠 작업 면적에 대하여 점차 증가하다가 어느 일정한 지점에 이르면 그 변화율이 완만해지고 그 이후 점차 감소하게 된다. 그 증가가 멈추고 감소가 시작되는 지점에 도달하면 연삭저항이 급증하여 연삭 버어닝이나 채터를 유발하게 되어 연삭을 계속 수행할 수 없게 된다. 그래서 휠 성능에 대한 척도로서 절삭날 면적율이 사용된다.

즉 Fig. 3과 같은 휠 작업면 전개도에 있어서 작업 가능

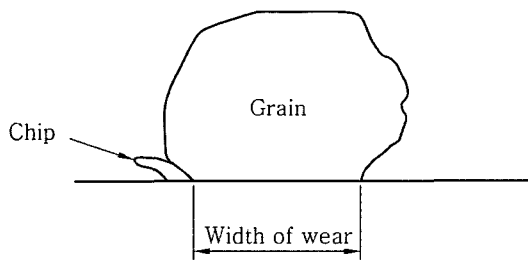
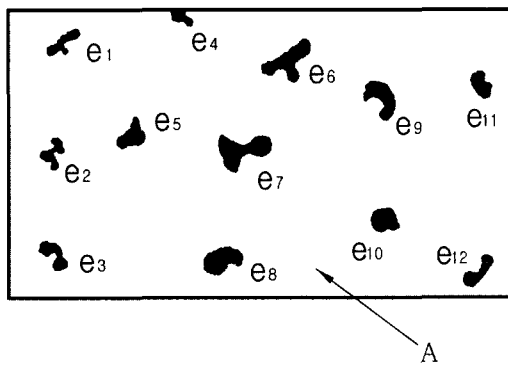


Fig. 2 Cutting edge of grinding grain



$e_i$  : Area of cutting edges  
A : Working area

Fig. 3 Cutting edge area of working surface

한 일정한 면적 A에 대해서 그 면적내에 있는 절삭날 마멸 면적  $e_1, e_2, \dots, e_N$ 의 총합,  $\sum e_N$ 의 비로서 절삭날 면적율  $\alpha$ 를 정의한다.

$$\alpha = \frac{\sum e_N}{A} \quad (1)$$

이 값의 대소는 다이아몬드 휠의 절삭날 마멸의 정도, 다시 말해서 다이아몬드 휠의 수명과 깊은 관계가 있다. 휠의 절삭날 면적율은 시간의 경과와 더불어 서서히 변화하는데 이 증가량이 점차 완만해지면서 결국 일정하게 되는 점을 휠의 수명으로 한다.

## 3. 실험

### 3.1 시험편과 다이아몬드 휠

본 실험에 사용된 시험편은 3종의 세라믹 재료인 질화규소( $Si_3N_4$ ), 알루미나( $Al_2O_3$ ) 그리고 지르코니아( $ZrO_2$ )를 사용하였고, 시험편의 규격은 60(L)×13(W)×18(H)mm이며, 스틱(stick)형으로 제작하였으며, 다이아몬드 휠은 비트리파이드(vitrified) 본드를 사용하여 입도(mesh)를 400으로 하고 집중도(concentration)를 100으로 제작하여 사용하였다. 휠의 크기는 180(OD)×31.75(ID)×13(W)×3(T)mm로 제작하였다.

### 3.2 실험장치 및 방법

본 실험은 주축의 회전수가 변속이 가능하도록 인버터(inverter)를 부착하고, 절입량이 1 $\mu m$ 까지 디스플레이(display)가 가능한 디지털 장치를 부착한 평면 연삭기(HGS-515XA, Hwacheon)를 사용하였으며, 실험에 사용한 실험 기기는 Fig. 4와 같다.

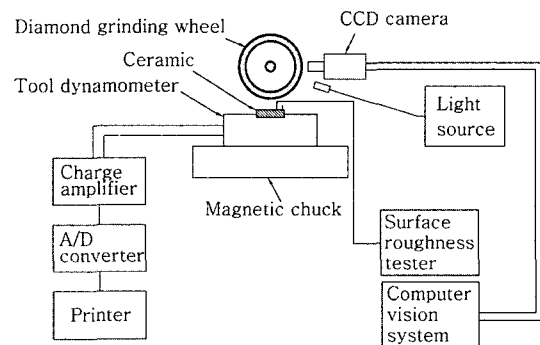


Fig. 4 Block diagram of experimental apparatus

가공조건은 주축회전수 3000rpm, 이송속도 1m/min, 절입량 0.02mm 로 연속가공을 실시하였으며, 공작물을 매10회씩 가공한 후 연삭 휠의 마멸 체적은 버어니어 캘리퍼스 로 휠 원주면을 4등분하여 측정한 후 평균하였고, 세라믹재료의 제거된 체적은 3지점을 측정한 후 평균하였으며, 그 값들을 식 (1)~(3)에 적용하여 연삭비의 변화를 관찰하였고, 연삭저항을 측정하기 위하여 공구동력계(AST-MM, Satowo)를 마그네틱 척 위에 설치하고, 공구동력계 위에 지그를 설치한 후 공작물을 고정하였다. 공구동력계에서 발생된 신호는 엠프(UCAM-70A, Kyowa)에서 증폭된 후 A/D 변환기를 거쳐 출력장치인 프린터를 통해 출력이 되도록 하였다. 공작물의 표면상태를 측정하기 위하여 촉침식 표면거칠기 측정기(Surfest-301, Mitutoyo)를 이용하여 최대높이 표면거칠기( $R_{max}$ )를 측정하였다. 가공이 진행함에 따른 연삭 휠의 마멸 거동이 어떠한 형태로 나타나는지를 관찰하기 위하여, 공작물을 매10회씩 가공한 후 연삭 휠 표면의 원주면을 4등분하여 CCD 카메라(SDC4304NA, Samsung)로 영상을 획득하였으며, 이미지 시스템에 저장한 후 프린터로 출력하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 연삭저항의 변화

Fig. 5 ~ Fig. 7은 연속가공 횟수에 따른 연삭저항의 법선분력의 값을 나타낸 그림이다. 입도가 400인 비트리파이드 본드 휠로 연삭하였을 때 질화규소의 경우는 연삭저항이 10회부터 증가하는 경향은 있으나 20회 이후 변화는 없다. 이는 휠 입자 사이에 칩의 부착으로 인하여 연삭저항이 20회까지 증가하나, 그 이후 안정된 연삭을 수행하고 있다. 알

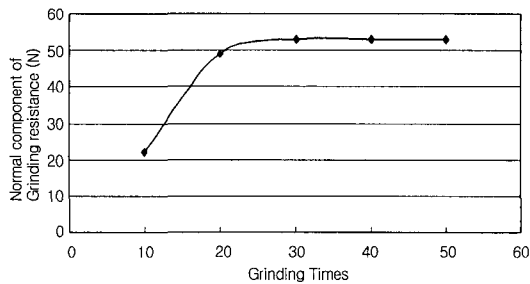


Fig. 5 Variation of normal component of grinding resistance for grinding time (material :  $Si_3N_4$ , bond : vitrified, mesh number : 400)

루미나와 지르코니아의 경우는 연삭저항이 30회 이후 급격히 증가하고 있다. 이것은 휠입자가 마모되어 날무덤(glazing) 현상이 발생되어 평탄한 마모면이 나타나 절삭날 면적율이 일정한 크기가 되면서 연삭저항은 급격히 증가한다고 생각된다.

##### 4.2 연삭비의 변화

Fig. 8 ~ Fig. 10은 연속가공 횟수에 따른 연삭비의 값을 나타낸 그림이다. 입도가 400인 비트리파이드 본드 휠로 연삭하였을 때 질화규소의 경우는 휠의 마멸은 크나, 연속가공 횟수에 따라 거의 비슷한 마멸량을 보이고 있으며, 휠은 적당하게 마멸되면서 원활한 가공이 수행되고 있다고 생각된다. 알루미나와 지르코니아의 경우 처음에는 날교정의 영향으로 큰 마멸이 나타나지만 그 이후 휠은 마멸이 점차로 작아진다. 이것은 휠입자가 마모되어 날무덤 현상이 발생되어 평탄한 마모면이 나타나 절삭날 면적율이 일정한 크기가 되면서 연삭저항은 급격히 증가한다고 생각된다.

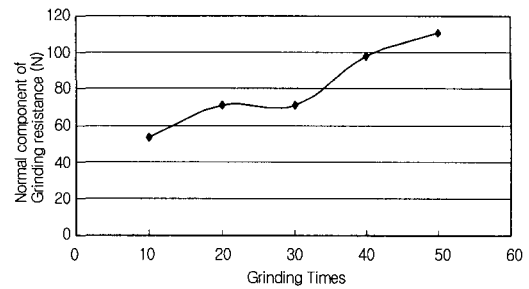


Fig. 6 Variation of normal component of grinding resistance for grinding time (material :  $Al_2O_3$ , bond : vitrified, mesh number : 400)

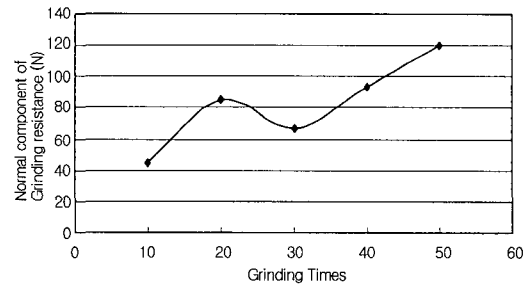


Fig. 7 Variation of normal component of grinding resistance for grinding time (material :  $ZrO_2$ , bond : vitrified, mesh number : 400)

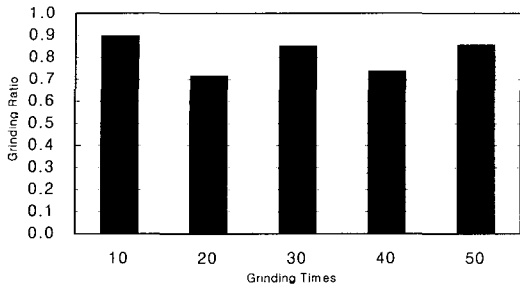


Fig. 8 Variation of grinding ratio for grinding times (material :  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , bond : vitrified, mesh number : 400)

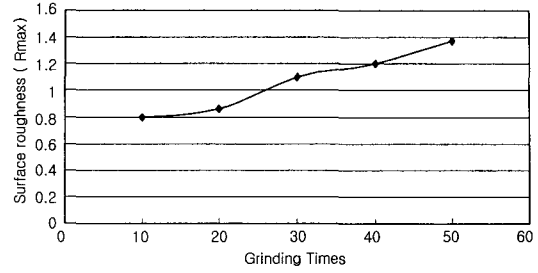


Fig. 11 Variation of surface roughness for grinding times (material :  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , bond : vitrified, mesh number : 400)

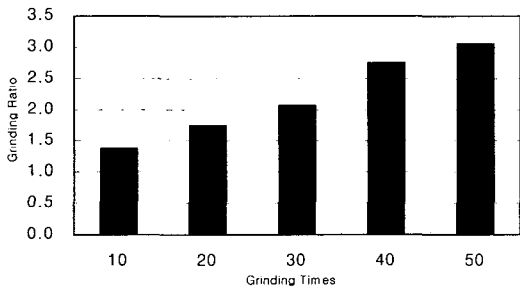


Fig. 9 Variation of grinding ratio for grinding times (material :  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , bond : vitrified, mesh number : 400)

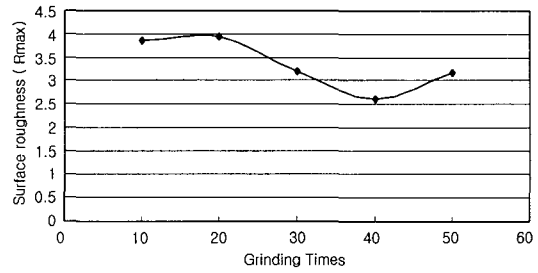


Fig. 12 Variation of surface roughness for grinding times (material :  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , bond : vitrified, mesh number : 400)

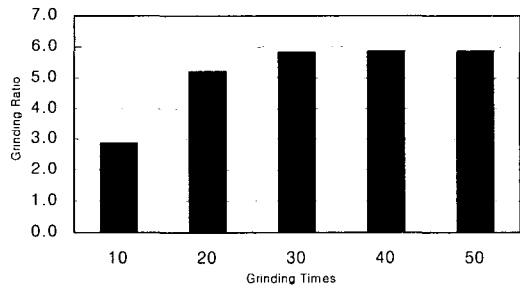


Fig. 10 Variation of grinding ratio for grinding times (material :  $\text{ZrO}_2$ , bond : vitrified, mesh number : 400)

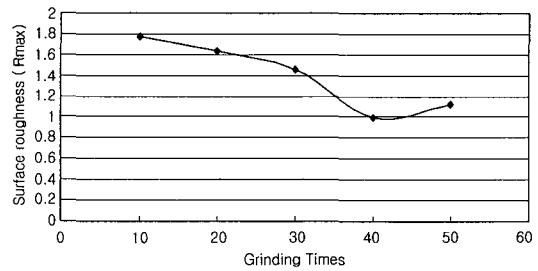


Fig. 13 Variation of surface roughness for grinding times (material :  $\text{ZrO}_2$ , bond : vitrified, mesh number : 400)

### 4.3 표면거칠기의 변화

Fig. 11 ~ Fig. 13은 연속가공 횟수에 따른 표면거칠기의 값을 나타낸 그림이다. 연삭 입자가 400인 비트리파이드 본드 휠로 연삭하였을 때 질화규소의 경우 표면거칠기가 20회 이후 증가하고 있다. 이는 칩의 부착으로 인하여 표면거칠기의 값은 증가하고 있으나 그 이후 변화의 폭은 작다. 알루미나와 지르코니아의 경우 표면거칠기값은 감소하다가

40회 이후 증가하고 있다. 이것은 연삭저항이 증가하면서 입자가 마멸되면서 날무덤 현상이 발생되어 평탄한 마모면이 나타나 절삭날 면적율이 일정한 크기가 되면서 공작물 표면과의 접촉면적이 많아져서 표면거칠기는 좋아진다고 생각된다.

#### 4.4 연삭 휠의 마멸거동

Fig. 14~Fig. 17은 가공이 진행함에 따른 다이아몬드 휠의 마멸 거동이 어떠한 형태로 나타나는지를 관찰하기 위하여, 공작물을 매10회씩 가공한 후 다이아몬드 휠의 원주면을 4등분하여 CCD 카메라로 촬영한 사진을 나타내고 있으며, 영상은 400배로 확대하였다. 각 4분면의 위치에서 4프레임의 영상을 획득한 후 이진화처리를 이용하여 각 프레임의 절삭날 면적율을 계산하여 그 평균치를 측정값으로 사용하였다.

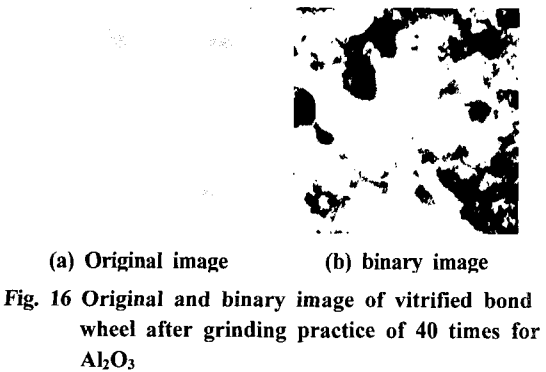
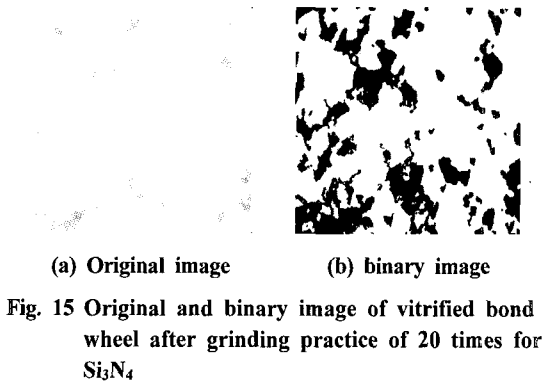
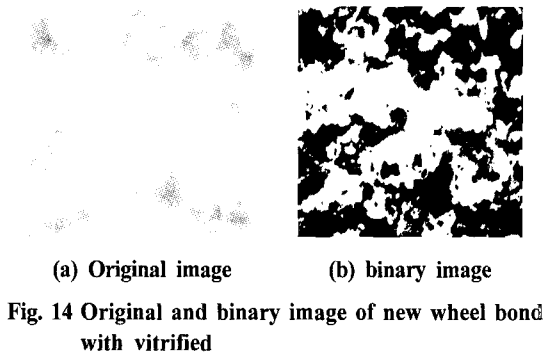


Fig. 14는 연삭하기 전의 입도가 400인 비트리파이드 본드 휠면의 영상과 이진화 처리의 영상이다. Fig. 15는 질화규소를 연속가공 20회 연삭 후의 입도가 400인 비트리파이드 본드 휠면의 영상과 이진화 처리의 영상이다. 그림에서 보는바와 같이 두 영상은 같은 위치는 아니지만 부분적으로 밝은 명암도 값을 나타내는 입자의 반사 현상이 나타나고 있다. 이러한 부분은 두 가지로 해석될 수 있는데 하나는 연삭저항의 변화로 입자의 마멸에 따른 원인으로 해석될 수 있고, 또 하나는 입자에 묻어있는 칩에 의한 영향으로 볼 수 있다. 20회 가공 후 획득한 입자마멸의 영상으로 연삭가공 전의 영상보다는 밝게 빛나는 부분이 많이 관찰되는데 이러한 부분은 칩의 부착으로 인하여 입자의 절삭날 면적율이 증가하는 경향을 나타낸다. Fig. 16은 알루미늄을 연속 연삭가공 40회 후의 연삭 휠면의 영상과 이진화 처리의 영상이다. 이 경우는 가공횟수의 증가에 따라 영상에 밝게 빛나는 입자를 관찰할 수 있으며, 이러한 부분은 연삭저항의 증가에 따른 입자의 마멸에 의한 원인으로 해석된다. Fig. 17은 지르코니아를 40회 연속 연삭가공 후 연삭 휠면의 영상과 이진화 처리의 영상이다. 앞의 두 조건과 마찬가지로 가공횟수의 증가에 따라 밝게 빛나는 입자를 관찰할

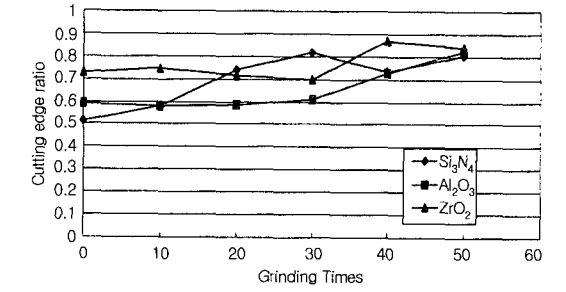
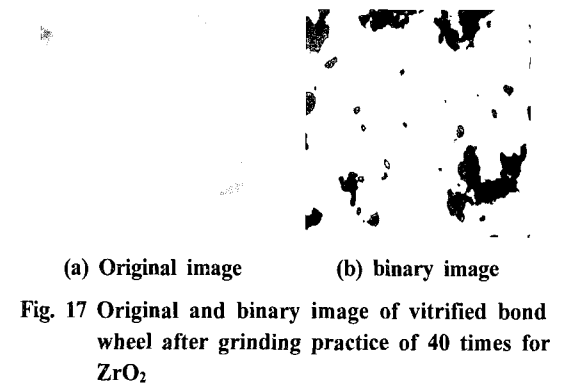


Fig. 18 Variation of cutting edge ratio for grinding times

수 있다. Fig. 18은 가공횟수의 증가에 따른 입자의 절삭날 면적을 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 가공 횟수의 증가에 따라 절삭날 면적은 값은 증가하고 있다. 질화규소의 경우는 칩의 부착으로 인하여 입자의 절삭날 면적이 증가하는 경향을 나타내고 있으나 표면거칠기의 변화를 볼 때 원활한 연삭이 진행된다고 판단된다. 그리고 알루미늄 및 지르코니아의 경우에는 법선분력의 변화를 고려하여 볼 때 날무덤 현상으로 입자의 마멸이 발생한 것으로 해석되며, 이후로는 완만한 변화를 보이고 있는데 이 시점을 기준으로 휠의 입자 마멸이 발생한 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구는 세라믹 재료를 입도 400, 집중도 100, 비트리 파이드 본드의 다이아몬드 휠로 연삭가공할 때 다이아몬드 휠의 마멸을 평가하기 위한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 질화규소는 휠의 마멸은 크나, 연삭력은 비교적 안정적이고, 표면거칠기의 변화의 폭은 작다. 알루미늄 및 지르코니아는 휠의 마멸은 작아지나 연삭력은 증가하고, 표면거칠기 값은 감소하였다.
- (2) 비트리파이드 본드 휠로 연삭 할 경우 질화규소는 입자 사이에 칩이 부착되나 원활한 연삭이 수행되고 있고, 알루미늄 및 지르코니아는 연삭날의 날무덤 현상이 나타났다.
- (3) 연속 연삭가공 실험에서 질화규소는 20회, 알루미늄과 지르코니아는 40회에 연삭 수명점에 도달한다는 것을

알 수 있었다.

- (4) 휠의 마멸은 연삭비, 연삭저항, 표면거칠기 및 절삭날 면적을 이용하여 평가하였으며 실험결과가 일치함을 확인할 수 있었다.

## 참고 문헌

- (1) Kang, J. H., 1996, "Mirror Surface Machining of Ceramic", *Trans. of KICET*, Vol. 11, No. 2, pp. 83~91.
- (2) Lee, J. C., 2001, "A Study on the Surface Integrity of Grinding of Ceramic", *Trans. of KSMTE*, Vol. 10, No. 3, pp. 90~96.
- (3) Malkin, S., 1997, "The Wear of Grinding Wheels", *ASME Trans.*, No. 11, pp. 1129~1133.
- (4) Ha, M. K., 2002, "Characteristics of Grinding Force and Surface Roughness by CBN and WA Wheel", *Trans. of KSMTE*, Vol. 11, No. 1, pp. 26~31.
- (5) Tsuwa, H., 1964, "An Investigation of Grinding Wheel Cutting Edges", *ASME Trans.*, pp. 371~382.
- (6) Choi, S. S., 2002, "Variation of Grinding Force and Wheel Life in Surface Grinding", *Trans. of KSPE*, Vol. 19, No. 3, pp. 59~65.
- (7) Liao, T. W., 1992, "Wear of Diamond Wheels in Creep-Fed grinding of ceramic materials", *J. of Wear*, Vol. 211, pp. 94~103.
- (8) Yasei, H., 1992, "An Investigation of Truing Characteristics of Resin Bond CBN Wheel", *Trans. of JSPE*, Vol. 58, No. 8, pp. 85~90.