

세라믹 재료의 연삭 특성에 관한 연구

정을섭*, 김성청⁺, 김태봉⁺⁺, 소의열⁺⁺⁺, 이근상⁺⁺⁺⁺

(논문접수일 2001. 12. 22, 심사완료일 2002. 4. 17)

A Study on the Grinding Characteristics of Ceramics

Eul-Seob Jeong*, Sung-Chung Kim⁺, Tea-Bong Kim⁺⁺, Eui-Yeol So⁺⁺⁺, Keun-Sang Lee⁺⁺⁺⁺

Abstract

In this study, experiments were carried out to investigate the characteristics of grinding and wear process of diamond wheel for ceramic materials. Normal component of grinding resistance of Al_2O_3 was less than that of Si_3N_4 and ZrO_2 . This seems to be the characteristics of ceramic tools on work pieces both of high hardness. For the case of Si_3N_4 and ZrO_2 , as the mesh number of wheel increases, the surface roughness decreases. For the case of Al_2O_3 , the surface roughness does not decrease. Specific grinding energy decreases as the material removal rate per unit time increases. For the case of Si_3N_4 and ZrO_2 , grinding is carried out by abrasive wear processes. For the case of Al_2O_3 , grinding is carried out by grain shedding process due to brittle fracture.

Key Words : Si_3N_4 (질화규소), Al_2O_3 (알루미나), ZrO_2 (지르코니아), brittle fracture(취성파괴)

1. 서론

최근 세라믹 재료는 우수한 기계적 특성을 가지는 신소재로서 고부가가치의 첨단산업 전반에 걸친 부품의 소재로서 많은 각광을 받고 있다. 그러나, 세라믹 재료는 금속이나 고분자 재료 등에 비하여 높은 강도와 경도 및 취성으로

효율적인 가공이 어려운 단점이 있다. 기계, 전자 등의 각 분야에서 세라믹을 부품 및 재료로서 사용할 때 생산 단가 측면에서 문제점 중의 하나가 기계가공 공정이라 할 수 있다. 취성 특성 때문에 가공면에 있어서 칩핑(chipping)이나 미소 결함(crack)발생 등과 같은 가공결함에 대한 배려가 필요하다. 이러한 가공상의 어려움으로 인하여 세라믹 특히 구

* 주저자, 산자부 기술표준원 시험인정과 (phoenix@ats.go.kr)
주소: 427-010 경기도 과천시 중앙동2, Tel: 031-509-7414 ~6
+ 충북대학교
++ 법무부 제12직업훈련소
+++ 충청대학교
++++ 세인 Eng.

조용 세라믹의 기계가공은 효율이 저하되고, 그에 따른 비용 상승의 문제점을 안고 있는 것이 일반적이라고 할 수 있다^(1,7).

많은 우수한 성질을 갖고 있는 각종 세라믹재료를 다양하게 이용하기 위해서는 기계가공기술을 발전시켜, 고능률화와 저비용 달성이 필수조건이라 하겠다. 따라서 현재 기계구조용 소재로 간주되고 있는 세라믹의 경우, 가공 정도가 좋고 가공능률을 높일 수 있는 적절한 가공공구의 개발과 최적의 가공조건이 필요하다. 이들은 고강도 세라믹의 가공에 있어 다이아몬드 휠에 의한 연삭이 주류라고 일반적으로 생각되고 있지만, 부품제조에 적용될 수 있는 구체적인 가공조건이나 공구특성 등은 아직 명확하게 밝혀져 있지 않다. 이러한 가공특성을 규명하고 데이터화함으로써 고강도 세라믹을 다양하고도 널리 사용할 수 있는 토대를 마련코자 한다⁽²⁾.

본 연구에서는 평면연삭기에서 세라믹 재료를 다이아몬드 휠(diamond wheel)로 연삭가공 할 때 각각의 연삭조건에 따른 연삭저항 및 비연삭에너지와 가공면의 표면거칠기 변화를 검토·고찰하고 가공면의 상태를 전자주사현미경(SEM)으로 촬영하여 이를 고찰하고, 이 때의 데이터를 분석하여 세라믹 재료의 연삭특성 평가를 위한 자료로 제시하고자 한다.

2. 세라믹 재료의 연삭특성

2.1 세라믹의 재료특성

세라믹은 산화물계와 비산화물계로 분류되며 산화물계는 지르코니아(ZrO_2)와 알루미나(Al_2O_3), 비산화물계는 질화규소(Si_3N_4)로 세분한다. 지르코니아(ZrO_2)는 인성이 크고 강도가 높기 때문에 공구, 다이스 등에 많이 사용되며, 알루미나(Al_2O_3)는 열팽창이 크며 내열충격성은 작지만 산화물 중에 경도가 가장 높고 기계적 강도도 우수하기 때문에 절삭공구로서의 사용도 증가하고 있다. 또한, 질화규소(Si_3N_4)는 열팽창이 작기 때문에 내열충격성이 우수하여 고온강도가 요구되는 재료에 많이 사용된다⁽³⁾.

2.2 세라믹의 연삭특성

피삭재로서 세라믹의 특징은 전형적인 취성이 있고, 이 취성 때문에 금속재료에 대한 가공과 비교하면 현저한 상이점이 나타난다. 소결 후의 세라믹에서는 종래의 금속재료에 있어 널리 사용되는 소성가공법의 적용은 전혀 불가능하고, 절삭가공에서는 피가공물의 표면상태가 문제점으로 나타나는 경우가 많다. 이와 같이 금속재료와 크게 다른 세라믹 재

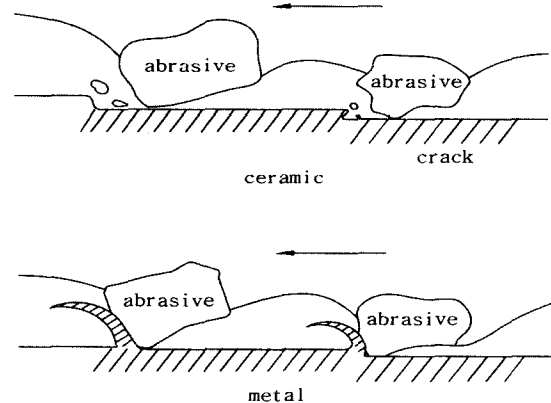


Fig. 1 Grinding mechanism of ceramic and metal

료의 연삭기구 모델은 Fig. 1과 같다. 금속재료는 연삭입자 절삭날에 의한 전단작용에 의해 Fig. 1에서 보이는 것처럼 리본 모양의 칩을 생성시키는데 비해서 세라믹 재료의 경우에는 연삭입자 절삭날의 충돌 순간에 재료 내부에 크랙이 발생되고, 연속되는 이들 크랙에 의해 칩이 형성된다^(4,5).

2.3 비연삭에너지

재료의 연삭성은 다음 식으로 정의되는 비연삭에너지 E 로 평가될 수 있다⁽⁶⁾.

$$E = \frac{Ft \cdot V}{b \cdot v \cdot Z} \quad (1)$$

여기서, Ft는 점선분력, V는 슷들의 원주속도, b는 슷들의 폭, v는 공작물의 속도, Z는 연삭깊이이다. 식 (1)은 가공조건을 변화시켜서 연삭저항을 측정하고 이것으로부터 비연삭에너지를 구한 것이다.

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 제작하였다. 다이아몬드 휠은 본드를 레지노이드(resinoid)와 비트리파이드(vitrified)를 사용하고, 입도(mesh)를 100, 200, 400으로 하고 집중도(concentration)를 100으로 사용하였다. 그리고 휠의 크기는 180(OD)×31.75(ID)×13(W)×3(t)mm로 제작하였다.

Table 1 List of grinding conditions

Item	Conditions
Rotation speed of spindle(rpm)	1500, 2000, 2500, 3000
Feed rate(m/min)	1, 2, 3, 4
Depth of cut(mm)	0.01, 0.02, 0.03, 0.04

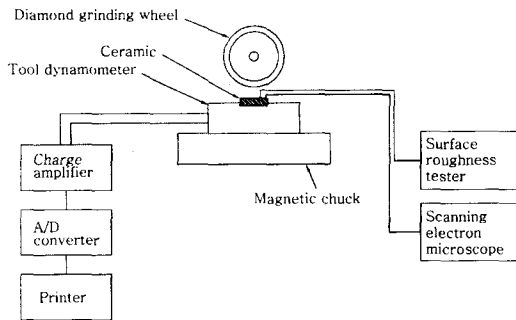


Fig. 2 Block diagram of experimental apparatus

3.2 실험장치 및 방법

본 실험은 주축의 회전수가 변속이 가능하도록 인버터(inverter)를 부착하고, 절입량이 1 μ m까지 디스플레이(display)가 가능한 디지털 장치를 부착한 평면 연삭기(HGS-515XA, Hwacheon)를 사용하였고, 실험에 사용한 실험 기기는 Fig. 2와 같으며, 연삭조건은 Table 1과 같다. 연삭저항을 측정하기 위하여 공구동력계(AST-MM, Satowo)를 마그네틱 척

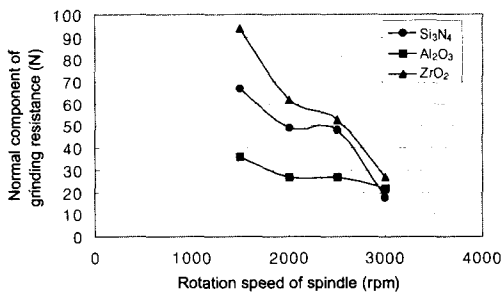


Fig. 3 Variation of normal components of grinding resistance for rotation speed of spindle (feed rate: 3m/min, depth of cut: 0.01mm, mesh number: 100, bond: resinoid)

위에 설치하고, 공구동력계 위에 지그를 설치한 후 가공물을 고정하였다. 공구동력계에서 발생된 신호는 앰프(UCAM-70A, Kyowa)에서 증폭된 후 A/D 변환기를 거쳐 출력장치인 프린터를 통해 출력이 되도록 하였다. 공작물의 표면상태를 측정하기 위하여 촉침식 조도계(Surfest-301, Mitutoyo)를 이용하여 측정하였으며, 연삭 후에 공작물의 표면을 전자주사현미경(PSM-75, Rjlee)으로 촬영하여 영상을 획득하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 세라믹 재료별 연삭저항의 변화

Fig. 3 ~ Fig. 6은 3종의 세라믹 재료를 각각의 다이아몬드 휠로 연삭깊이를 0.01mm, 이송속도를 3m/min으로 선정하고 주축의 회전수를 1500, 2000, 2500 그리고 3000rpm으로 변화시키면서 연삭 가공을 실시하였을 때의 연삭저항의 법선분력 변화관계를 도시한 그림이다. 그림에서와 같이 주축의 회전수를 증가시키면 연삭저항의 법선분력이 모두 감소되는 경향을 나타내고 있다. 알루미늄의 연삭저항은 질화규소나 지르코니아에서의 연삭저항보다 작다. 세라믹 재료라 하더라도 종류에 따라서 그 연삭특성이 다르다. 따라서 같은 휠과 같은 조건을 사용하여 연삭을 한다하더라도 재료에 따라서 연삭저항이 다르다. 이는 상호 고정도의 공구와 공작물간에 발생되어지는 세라믹재료 특성에 기인한 것으로 볼 수 있다.

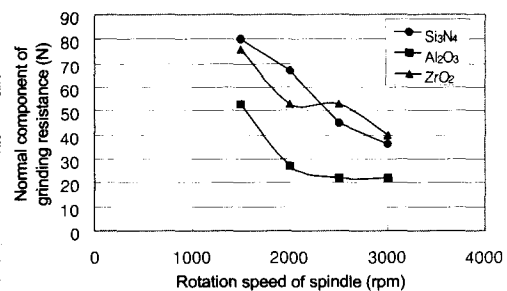


Fig. 4 Variation of normal components of grinding resistance for rotation speed of spindle (feed rate: 3m/min, depth of cut: 0.01mm, mesh number: 100, bond: vitrified)

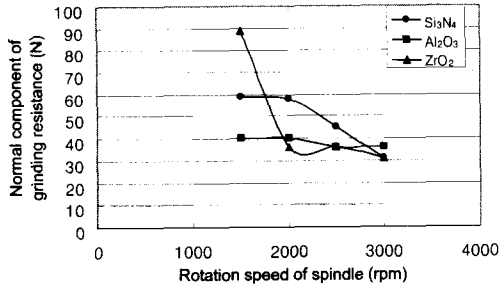


Fig. 5 Variation of normal components of grinding resistance for rotation speed of spindle (feed rate: 3m/min, depth of cut: 0.01mm, mesh number: 400, bond: resinoid)

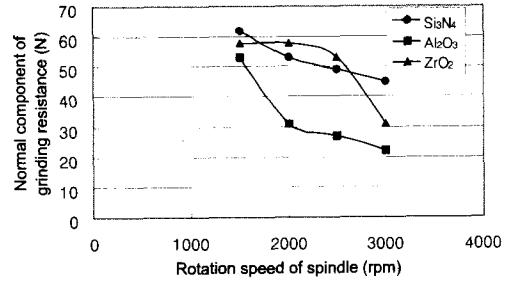


Fig. 6 Variation of normal components of grinding resistance for rotation speed of spindle (feed rate: 3m/min, depth of cut: 0.01mm, mesh number: 400, bond: vitrified)

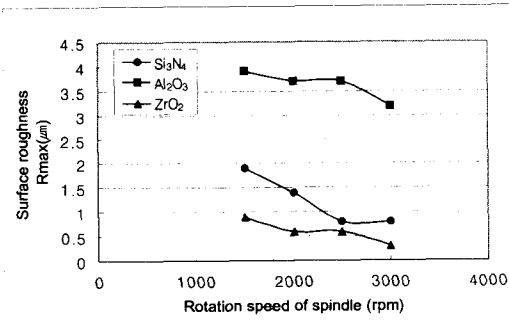


Fig. 7 Variation of surface roughness for rotation speed of spindle (feed rate: 1m/min, depth of cut: 0.01mm, mesh number: 100, bond: resinoid)

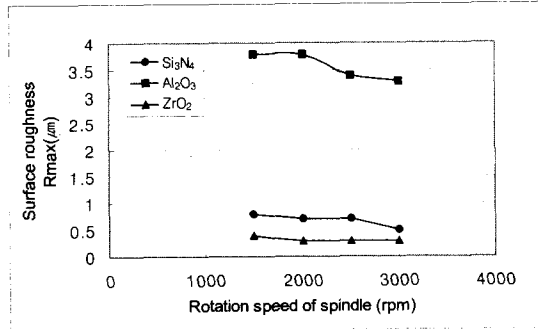


Fig. 8 Variation of surface roughness for rotation speed of spindle (feed rate: 1m/min, depth of cut: 0.01mm, mesh number: 100, bond: vitrified)

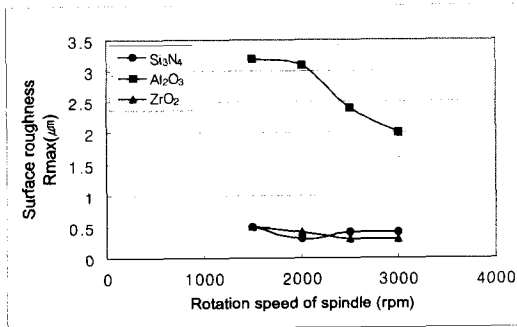


Fig. 9 Variation of surface roughness for rotation speed of spindle (feed rate: 1m/min, depth of cut: 0.01mm, mesh number: 400, bond: resinoid)

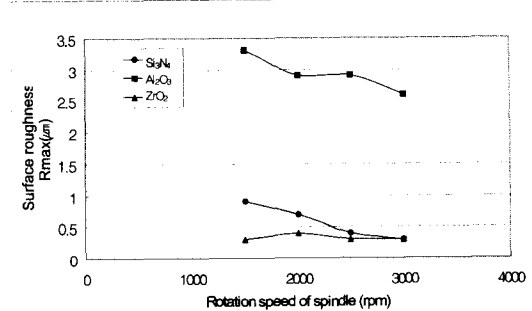


Fig. 10 Variation of surface roughness for rotation speed of spindle (feed rate: 1m/min, depth of cut: 0.01mm, mesh number: 400, bond: vitrified)

4.2 세라믹 재료별 표면 거칠기의 변화

Fig. 7~Fig. 10은 3종의 세라믹 재료를 각각의 다이아몬드 휠로 연삭깊이를 0.01mm, 이송속도를 1m/min으로 선정하고 주축의 회전수를 1500, 2000, 2500 그리고 3000rpm으로 변화시키면서 연삭가공을 실시하였을 때의 표면 거칠기의 변화관계를 도시한 그림이다. 질화규소 및 지르코니아에서는 휠의 번호가 커질수록 표면이 좋아지나, 알루미늄아에서는 표면이 그렇게 좋지 않으며, 표면거칠기는 약간 감소하고 있다. 이와 같이 다른 재료에서와는 달리 알루미늄아의 표면거칠기 변화가 작은 것은 취성파괴가 주원인으로 연삭기구가 다르기 때문이다.

4.3 세라믹 재료별 비연삭에너지의 변화

Fig. 11~Fig. 12는 3종의 세라믹 재료를 각각의 다이아몬드 휠로 이송속도를 2m/min으로, 주축의 회전수를 2500, 3000rpm으로 선정하고 단위시간당의 소재 제거량을 증가시킬 때의 연삭저항의 접선분력의 변화관계를 도시한 그림이다. Fig. 13~Fig. 14는 3종의 세라믹 재료를 각각의 다이아몬드 휠로 이송속도를 2m/min으로, 주축의 회전수를 2500, 3000rpm으로 선정하고 단위시간당의 소재의 제거량을 증가시킬 때의 비연삭에너지의 변화관계를 도시한 그림이다. 그림에서와 같이 단위시간당의 소재 제거량을 증가시키면 접선분력은 증가하는 경향을 나타내고 있으나 변화의 폭은 그리 크지 않다. 그러나 단위시간당의 소재의 제거량을 증가시키면 비연삭에너지는 모두 감소되는 경향을 나타내고 있

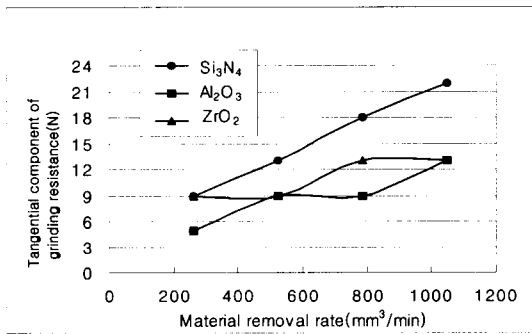


Fig. 11 Variation of tangential components of grinding resistance for material removal rate (rotation speed of spindle : 2500, feed rate : 2m/min, mesh number : 200, bond : vitrified)

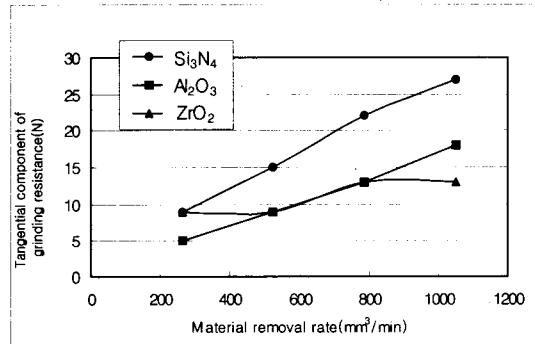


Fig. 12 Variation of tangential components of grinding resistance for material removal rate (rotation speed of spindle : 3000, feed rate : 2m/min, mesh number : 200, bond : resinoid)

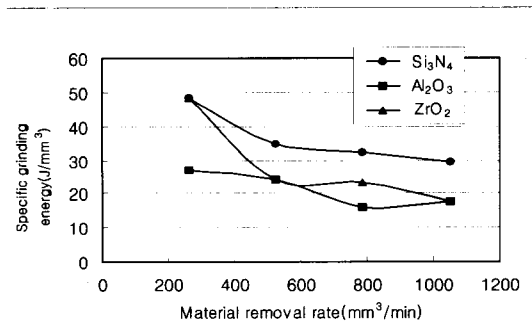


Fig. 13 Variation of specific grinding energy for material removal rate (rotation speed of spindle : 2500, feed rate : 2m/min, mesh number : 200, bond : vitrified)

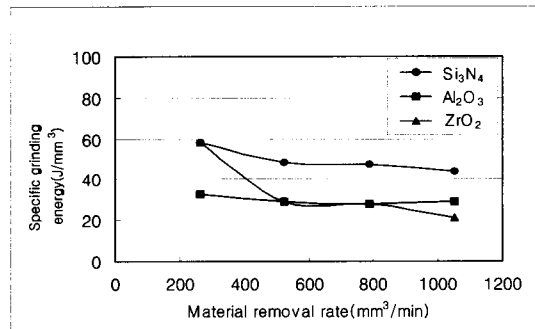


Fig. 14 Variation of specific grinding energy for material removal rate (rotation speed of spindle : 3000, feed rate : 2m/min, mesh number : 200, bond : resinoid)

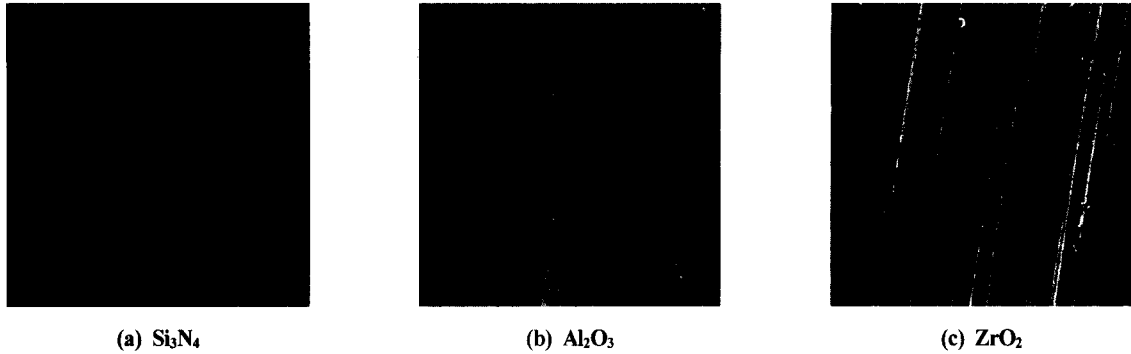


Fig. 15 Photos of scanning electron microscope on the surface of the ceramics after grinding with 400 grit wheel and vitrified bond. ($\times 500$)

다. 질화규소, 지르코니아에서의 비연삭에너지는 알루미늄보다 크게 나타나고 있는데 이는 연삭저항이 크기 때문이다. 일반적으로 연삭성능은 연삭저항의 점선분력값을 기준해서 평가하고, 비연삭에너지는 단위 체적당의 소재를 제거하는데 필요한 에너지를 나타내는 것으로써 비연삭에너지의 값이 낮을수록 연삭성능은 좋은 것으로 평가할 수 있다.

4.4 세라믹 재료의 가공면 비교

Fig. 15는 질화규소, 알루미늄 및 지르코니아를 비트리파이드 본드 휠 400번으로 각각 연삭하였을 때의 연삭 가공면을 촬영한 전자주사현미경사진을 나타내고 있다. 사진에서 보는바와 같이 질화규소 및 지르코니아에서는 결들이 많이 형성되어 있다. 이 결들은 연삭할 때 경도가 높은 날카로운 다이아몬드 입자에 의하여 세라믹의 표면을 누르면서 지나가기 때문에 발생하는 미세한 균열이며, 이는 다이아몬드 휠 입자마모(abrasive wear)에 의해서 공작물 표면에 나타나는 미소 파괴현상이라고 사료된다. 따라서 고경도의 공구와 공작물간에 발생되어지는 세라믹재료 특성에 기인한 것으로 볼 수 있다. 그러므로 이러한 재료는 휠의 입자크기가 작을수록 가공표면이 좋아지며 균열발생도 억제할 수 있다고 본다. 알루미늄에서는 결들의 형성보다는 입자들이 떨어져 나오는 취성파괴에 의한 입자탈락에 의하여 연삭이 일어난다. 이 취성파괴에 의한 입자탈락은 입자의 크기가 작아져도 일어난다. 이러한 재료에서는 휠의 번호가 증가하여도 표면은 좋아지지 않으며, 가공표면의 거칠기는 단순히 재료의 입자크기에 비례하게 된다.

5. 결론

본 연구는 세라믹 재료를 다이아몬드 휠로 연삭가공할 때 연삭성능 및 가공면의 상태를 분석하고 연삭특성을 평가하기 위한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 알루미늄의 연삭저항의 법선분력은 질화규소나 지르코니아보다 작게 나타나는 경향이 있다. 이는 상호 고경도의 공구와 공작물간에 발생되어지는 세라믹 재료 특성에 기인한 것으로 볼 수 있다.
- (2) 질화규소 및 지르코니아에서는 휠의 입도번호가 커질수록 표면이 좋아지나, 알루미늄에서는 표면 거칠기가 약간 감소하고 있다.
- (3) 비연삭에너지는 단위시간당 소재의 제거량을 증가시키면 모두 감소되는 경향을 나타내고 있다.
- (4) 질화규소 및 지르코니아에서는 입자 마모에 의하여 연삭이 진행되고 알루미늄에서는 취성파괴에 의한 입자탈락에 의하여 연삭이 일어남을 알 수가 있다.
- (5) 세라믹재료의 최적 연삭조건은 재료, 휠별로 연삭성능의 차이가 있으나 주축회전수 3000rpm에서 좋다는 것을 알 수가 있다.

참고 문헌

- (1) 유재상 외, "세라믹 형상가공", 요업기술, Vol. 11, No. 2, pp. 73~82, 1996.
- (2) 中川平三郎, "グライインディングセンタによるセラミックスの正面研削加工", 機械技術, 第40卷,

- 第4号, pp. 77~83, 1992.
- (3) 松井正己, “セラミックスの精密研削加工”, 機械の研究, 第38卷, 第3号, pp. 373~379, 1986.
- (4) 杉田忠彰, “セラミックスの機械加工”, 養賢堂, pp. 33~38, 1985.
- (5) 조성래 외, “세라믹 재료의 연삭”, 요업기술, Vol. 11, No. 2, pp. 63~71, 1996.
- (6) 하상백 외, “구조용 세라믹스의 연삭특성에 관한 연구”, 한국정밀공학회, 제16권, 제10호, pp. 182~186, 1999.
- (7) J. C. Lee, et al, “A Study on the Surface Integrity of Grinding of Ceramic”, Trans. of the Korean Society of Tool Engineers, Vol. 10, No. 3, pp. 90~96, 2001.