

CBN과 WA숫돌에 의한 연삭에서 연삭력과 표면거칠기 특성

하만경*, 광재섭*, 양재용**, 정영득*, 심성보*, 류인일*

Characteristics of Grinding Force and Surface Roughness by CBN and WA Wheel

M.K.Ha*, J.S.Kwak*, J.Y.Yang**, Y.D.Jung*, S.B.Sim*, I.I.Ryoo*

Abstract

In this study an experimental investigation was conducted to find the grinding characteristics of ceramics, STD11 and STS304 materials. The grinding force and the microscopic observation of the workpieces were obtained in surface grinding. Grinding characteristics of ceramics were inspected through the microscopic examination, the cutting force, and the surface roughness. It has been found that the grinding force of ceramics is relatively low as compared to that of steels and that CBN wheel has an excellent performance. The surface roughness was measured according to the feedrate and the depth of cut.

Key Words : Ceramics(세라믹), CBN Wheel(입방정질화붕소 숫돌), Grinding Force(연삭력), Surface Roughness(표면거칠기), Feedrate(이송속도), Depth of Cut(절입깊이)

1. 서론

최근 산업분야에서는 고정밀 부품을 고속가공을 통하여 생산성을 증대시킬 수 있는 연구를 지속적으로 진행하고 있다. 의료, 항공, 우주 관련산업 등 각종 산업분야에서는 높은 정밀도와 함께 생산성을 증대시키는 가공공정을 요구하고 있고, 연삭기술 또한 그의 한 분야로서 중요한 위치를 차지하고 있다. 그에 따라 고정밀 연삭을 위해 연삭조건과 요구

조건에 따른 생산성 증대와 고품위 연삭공정의 연구가 필요하게 되었다¹⁾.

연삭가공(Grinding operation)은 입자(Grain)에 의한 고속절삭으로 초경합금, 티타늄, 텅스텐 등과 같은 고경도강에서 경질고무, 알루미늄 등과 같은 비교적 연질의 재료까지 다양한 종류의 공작물을 가공할 수 있는 절삭가공으로 아주 적은 양의 절입깊이를 사용하므로 형상 및 가공정도가 높고, 가공품위와 표면거칠기가 양호한 마무리 가공법으

* 부경대학교 기계공학부
(하만경 hmk@pknu.ac.kr)

** 부경대학교 기계공학과 대학원

로 널리 사용되고 있다⁽²⁾.

연삭숫돌은 연삭입자에 따라 알루미나(Al_2O_3)계와 탄화규소(SiC)계가 범용적으로 사용되어 왔다. 알루미나계를 대표하는 WA(White Aluminium Oxide) 숫돌은 1901년 놀턴 회사에서 알루미나질 연삭재 (Aluminium oxide)를 제조한 것이 출발이었다. 그러나 미국의 GE사가 초연마재(Super abrasive)라 할 수 있는 다이아몬드와 CBN(Cubic Boron Nitride, 입방정 질화붕소)을 60년대 후반부터 합성 제조하면서 연삭분야에 본격적으로 이용되기 시작하였다. 이중 특히 CBN은 고경도이며 열전달률이 높아 입자가 연삭열에 의해 쉽게 마모되지 않고, 연삭날을 잘 유지하므로 매우 양호한 연삭이 가능하다⁽⁵⁾.

세라믹 재료는 현재 다양한 분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 세라믹 공작물 중 Al_2O_3 는 대표적인 세라믹 구성 성분으로 분자량이 101.96이고, 비중이 3.965이며, 용융점이 2,072℃로서 백색의 분말인 육방정 구조이다. 높은 내열성과 내화학성, 내식성, 고강도를 가지는 우수한 특성 때문에 내마모재, 열교환기 부품, 내화물, 섬유, 절삭공구, 연마재 등에 적용되고 있다⁽³⁻⁴⁾. 전 세계적으로 연간 4,500만톤 정도의 알루미나가 생산되어지고 있으며, 그중 90%정도가 AI급속을 만드는데 사용되고 있어서 향후 세라믹 재료의 가공에 대한 연구가 증가할 것으로 생각된다.

최근 연삭가공 특성과 관련된 연구동향으로는 다양한 숫돌과 공작물에 대한 연삭실험을 통하여 그에 알맞은 최적 가공조건을 찾기 위한 연구들이 이루어지고 있다. 그 일례로 허⁽⁶⁾ 등은 다이아몬드 숫돌로 세라믹 공작물을 가공하여 거칠기와 비연삭 에너지를 측정하였고, 원⁽⁷⁾ 등은 CBN 숫돌로 5가지 공작물(SM20C, STC7, SC360, STD11, STB1)을 연삭하여 연삭력과 표면거칠기를 측정하였다.

본 논문에서는 난삭재(STD11, STS304, 세라믹)를 CBN 숫돌과 WA 숫돌로 평면연삭 하여 연삭력과 표면거칠기를 측정하고, 숫돌의 종류에 따른 연삭특성을 비교·분석하여 난삭재의 가공에 적합한 가공조건에 관한 기초 자료를 제시하고자 하였다.

2. 연삭력 및 표면거칠기 개요

2.1 연삭력

연삭가공에서 공작물을 가공하기 위해서 필요한 연삭력은 접선성분, 이송성분, 수직성분으로 구성된다. 이중 특히 수직성분(Normal force)이 연삭가공의 성능에 지배적인 영향을 미친다. 수직성분은 식 (1)과 같이 공작물을 절삭하는

데 필요한 힘과 미끄럼(Sliding)을 일으키는 힘의 합으로 나타낼 수 있다⁽⁸⁻⁹⁾.

$$F_n = F_c + F_s \quad (1)$$

위 식을 평균접촉응력(\bar{p})과 실접촉면적(A_a)의 항으로 수직력의 관계를 나타내면 다음과 같다.

$$F_n = F_c + \bar{p}A_a \quad (2)$$

$$A_a = b(d \cdot t)^{1/2}A \quad (3)$$

여기서, b 와 d 는 숫돌의 폭과 직경을 나타내고, t 는 절입 깊이, A 는 연삭숫돌 접촉표면적에서 마모에 의해 평탄화(Wear flat)된 영역이 차지하는 비율을 나타내는 상수이다. 또한 비연삭 에너지(u)를 이용하여 F_c 를 나타내면 다음과 같은 식이 완성된다.

$$F_n = \frac{k \cdot u \cdot v_w \cdot b \cdot t}{v_s} + \bar{p} \cdot b \cdot (d \cdot t)^{1/2} \cdot A \quad (4)$$

위 식에서 이론적인 연삭력의 수직성분은 공작물의 속도(v_w)가 빨라질수록 증가하고, 연삭 숫돌의 속도(v_s)가 빨라질수록 연삭력은 감소함을 알 수 있다. 또 절입 깊이와 절삭폭이 커질수록 연삭력은 증가하고, 평균접촉응력의 영향을 받을 수 있다.

2.2 표면거칠기

Fig. 1은 표면거칠기를 나타내는 개략도이다. 특정한 형상으로 가공된 제품의 표면에는 비교적 주기가 긴 표면 굴곡이 존재하는데 이를 파상도(Waviness)라하고, 파상도 보다 더 짧은 주기를 갖는 표면상에서 고주파수의 요철을 표면거칠기(Surface roughness)라 한다.

표면거칠기의 측정은 일반적으로 촉침식 조도계를 이용하고, 표면거칠기의 정량적인 평가를 위해 충분한 표본수를 검출할 수 있는 샘플 길이를 선택한다. 연삭가공과 같은 다듬질 가공된 표면의 거칠기 측정에 사용되는 샘플 길이는 0.8mm정도가 일반적으로 사용되고 있으며, 본 연구에서도 Mitutoyo사의 촉침식 조도계를 사용하였고, 샘플길이 0.25mm, 0.8mm, 2.5mm, 8mm의 네가지 타입중에 일반적으로 사용되고 있는 샘플길이인 0.8mm로 하여 평균 거칠기인 Ra값을 측정하였다⁽⁹⁾.

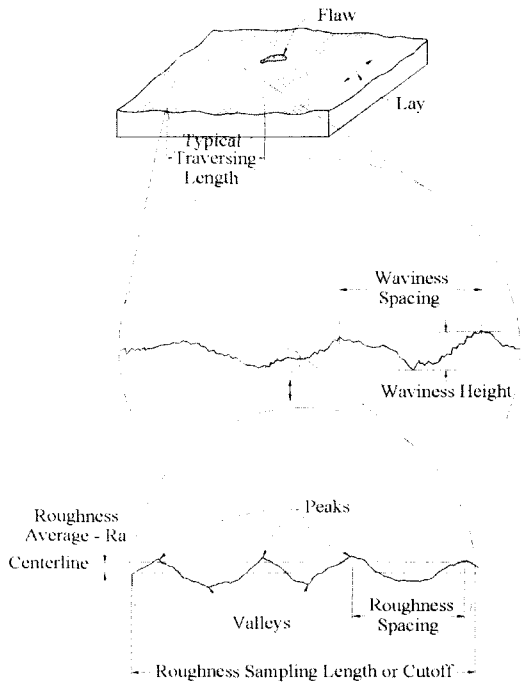


Fig. 1 Schematic diagram of surface roughness

3. 실험 및 고찰

3.1 장치 구성도

Fig. 2는 본 연구에 사용된 실험 장치도를 나타낸 것이다. WA 슛돌과 CBN 슛돌을 이용하여 난삭재인 세라믹과 금형강 그리고 스테인레스 재료를 마그네틱 테이블에 고정하

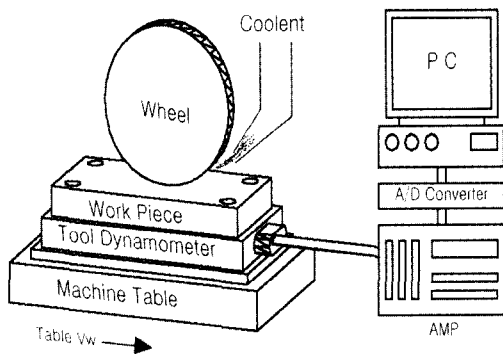


Fig. 2 Experimental set-up

여 평면 플런지연삭을 하였으며, 이송속도와 절입깊이에 따른 연삭력과 표면거칠기를 평가하였다. 연삭력의 측정은 Kistler사의 9257B 타입의 공구동력계를 사용하였으며, 연삭력 신호를 증폭하기 위해서 전하증폭기(Charge amplifier)를 사용하였다. 오실로스코프를 이용하여 검출되는 연삭력 신호의 변화거동을 시각화하였고, 12비트의 분해능을 갖는 A/D변환기를 사용하여 얻어진 데이터를 컴퓨터에 저장하였다.

3.2 실험 조건

실험에 사용된 조건은 Table 1과 같다. 주축 회전수가 1,800rpm인 평면연삭기에서 플런지 하향연삭(Down grinding)으로 가공하였으며, 이송속도와 절입깊이를 변화시키면서 연삭하였다. 연삭유제는 Shell사의 수용성 절삭유와 물을 10:1의 비율로 희석하여 공급하였다.

Table 2는 각 공작물들의 화학적 조성을 나타낸 것이다. 세라믹은 순도 98%의 Al₂O₃가 함유되어 있는 알루미늄 결정이 매우 안정된 세라믹을 사용하였으며, 다른 공작물들은 Table 2와 같이 탄소, 크롬, 몰리브덴, 구소, 망간, 질소, 등의 성분들이 함유되어 있다. 이와 같이 각 공작물의 조성성분이 다르기 때문에, 공작물 각각의 연삭성과 특성에 차이가 발생한다. 또한 Table 3은 공작물의 경도를 브리넬경도로 나타내었다.

Table 1 Experimental condition

Items	Type
Grinding machine	Spindle speed : 1,800rpm Surface grinder
Grinding condition	Plunge, wet, down grinding
Wheel	CBN200lmV, WA100lmV
Feedrate	0.02m/s, 0.03m/s, 0.04m/s
Depth of cut	5 μ m, 10 μ m, 15 μ m, 20 μ m
Grinding fluid	Shell lubricant (10:1)

Table 2 Chemical composition of specimens

Elements	C	Cr	Mo	V	Bal.
Composition (wt.%)	1.4	1.1	0.8	0.2	96.5

(a) STD11

Elements	C	Si	Mn	P	Ni	Cr	Bal.
Composition(wt.%)	0.08	1.0	2.0	0.045	10	18	68.875

(b) STS304

Elements	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	Moisture	LOI	Bal.
Composition (wt.%)	98	0.3	0.03	0.5	0.1	1.07

(c) Al₂O₃ Ceramics

Table 3 Hardness of workpiece

Workpiece	STS304	STD11	Ceramics
HB(kgf/mm ²)	200	320	1100

3.3 결과 및 고찰

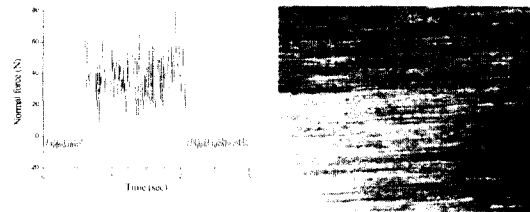
3.3.1 연삭력 특성

Fig. 3은 가공시간에 따른 연삭력 변화와 가공물의 표면 사진을 개략적으로 나타낸 것이다. 공작물은 STS304, 세라믹, STD11을 사용하였고, 스톨은 CBN을 사용하였다. 실험조건은 0.04m/s의 feedrate와 5 μ m절입깊이로 가공한 연삭력 값이며, (a)는 STD11 공작물의 연삭력을 측정할 값과 배율 100배의 공작물 표면 사진을 나타낸 것이고, (b)는 STS304의 연삭력 측정값과 그 표면사진을, (c)는 세라믹의 연삭력 측정값과 표면사진을 나타낸 것이다.

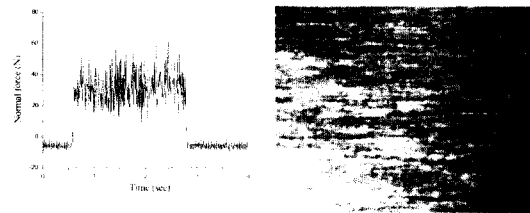
CBN 스톨을 사용했을 때 동일한 조건에서 연삭력은 Fig. 3에 나타낸 것처럼 STD11이 가장 크고, STS304, 세라믹의 순으로 나타났다. 표면사진을 살펴보면 연삭력은 세라믹의 표면사진이 가장 양호하게 나타났다. 이것은 CBN 스톨이 고경도의 난삭재인 세라믹의 연삭에 적합함을 보여주는 것이다.

Fig. 4는 WA 스톨로 가공했을 때 연삭력을 나타낸 것이다. 가공조건으로는 절입깊이가 5 μ m이고, 이송속도 0.02m/s, 0.03m/s, 0.04m/s로 변화시켰을 때의 연삭력을 나타낸 것이다. 각 공작물에서 이송속도가 증가할수록 연삭력은 증가하였다. WA 스톨로 연삭했을 때 연삭력의 크기는 세라믹, STD11, STS304의 순서로 나타났다. 이것은 범용으로 사용되는 WA 스톨로는 고경도의 난삭재인 세라믹을 가공하기 어렵다는 것을 보여주는 일례이다.

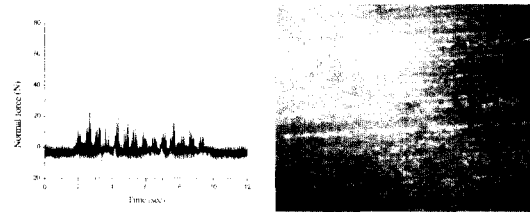
Fig. 5는 절입깊이를 10 μ m로 고정하고, 이송속도를 증가시켰을 때의 연삭력을 나타낸 것이다. 이송속도가 증가할수



(a) STD11 in CBN wheel



(b) STS304 in CBN wheel



(c) Ceramics in CBN wheel

Fig. 3 Normal force and microscopic photo on specimens (feedrate : 0.04m/s, depth of cut : 5 μ m)

록 연삭력이 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 세라믹은 그러나 그 크기에 있어서 Fig. 4의 결과와 비교하여 볼 때 절입깊이가 큰 Fig. 5가 상당히 높은 연삭력을 보여주고 있다. 이는 절입깊이가 깊어짐에 따라 절삭날당 절삭량이 많아지고, 이것이 연삭력의 상승으로 이어짐을 보여주는 것이다. 그러나 절삭면적이 2배로 증가하더라도 연삭력은 2배까지는 증가하지 않음을 알 수 있다. 이것은 절입깊이가 증가할수록 비절삭 저항이 감소하는 치수효과(Size effect)에 기인한 것으로 사료된다.

또한 STS304의 경우에는 절입깊이가 깊어져도 연삭력은 거의 변화하지 않았다. 이것은 스테인레스강의 비절삭 저항의 감소가 급격히 이루어짐을 보여주는 것이다. STD11의 경우도 절입깊이가 5 μ m 일 때와 연삭력의 변화가 크게 나타나지 않았다.

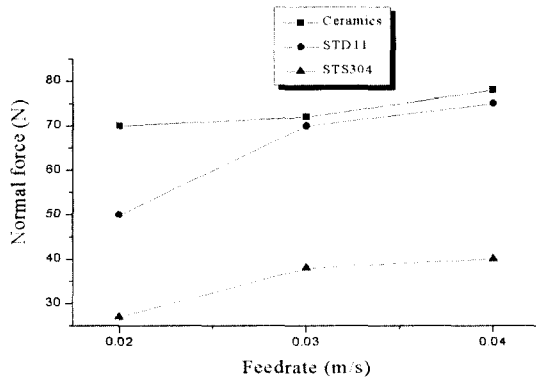


Fig. 4 Relationship between normal force and feedrate in WA (depth of cut : 5 μ m)

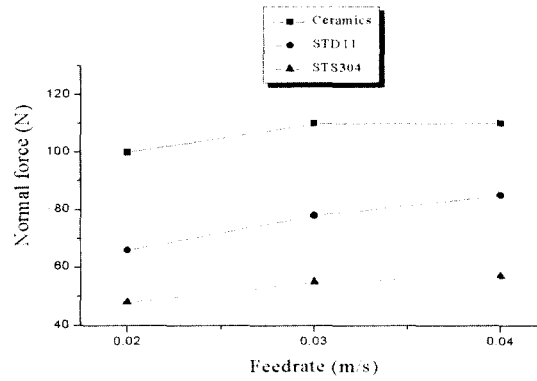


Fig. 5 Relationship between normal force and feedrate in WA (depth of cut : 10 μ m)

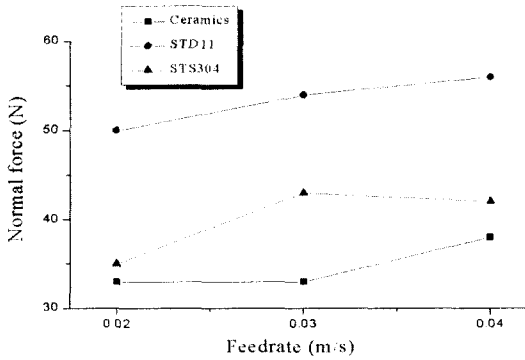


Fig. 6 Relationship between normal force and feedrate in CBN (depth of cut : 5 μ m)

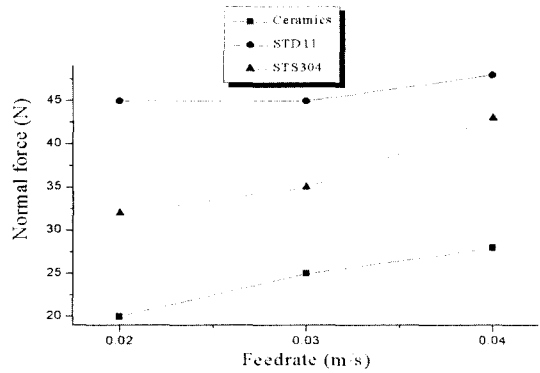


Fig. 7 Relationship between normal force and feedrate in CBN (depth of cut : 10 μ m)

한편 WA 슷돌로서 세라믹을 연삭할 때는 대체로 연삭력이 다른 공작물에 비해서 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 세라믹과 같은 고경도, 취성의 난삭재는 범용의 WA 슷돌로는 가공하기가 어렵다는 것을 의미한다. 세라믹을 WA 슷돌로 연삭하면 세라믹 재료의 고경도 특성에 따라서 슷돌 절인의 과도한 마모현상이 쉽게 일어나고, 그 결과 연삭이 정상적으로 행해질 수 없기 때문에 연삭력이 증가하게 된다. Fig. 4와 Fig. 5의 결과로부터 세라믹과 같은 난삭재는 WA 슷돌로서는 절인의 마모가 심해서 가공이 어렵다는 것을 본 실험을 통해 알 수 있다.

Fig. 6과 7은 CBN 슷돌을 이용하여 연삭가공 했을 때의 연삭력 변화를 나타낸 것이다. 절입깊이가 5 μ m와 10 μ m 일 때 모두 이송속도가 증가할수록 WA 슷돌과 마찬가지로 연삭력은 증가함을 알 수 있다. 그러나 WA 슷돌과는 달리 다

소의 차이는 있지만, CBN 슷돌에 의한 연삭에서는 절입깊이가 증가함에 따른 연삭력은 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

또한 WA 슷돌의 연삭과 비교하여 중요한 차이점은 각 재료에 따른 연삭력의 크기 관계이다. 세라믹 재료의 경우를 살펴보면 WA 슷돌에서는 세가지 공작물중에서 가장 큰 연삭력을 나타내었지만, CBN 슷돌로 연삭을 했을 경우에는 다른 공작물과 비교하여 가장 작은 연삭력 값을 보여주고 있다. 이와 같이 CBN 슷돌로 세라믹 재료를 연삭했을 때 연삭력이 작다는 것은 고경도, 취성 재료인 세라믹 재료를 CBN 슷돌로 효과적으로 가공할 수 있음을 나타낸다. 이러한 결과는 Fig. 3의 결과에서도 확인 할 수 있었다.

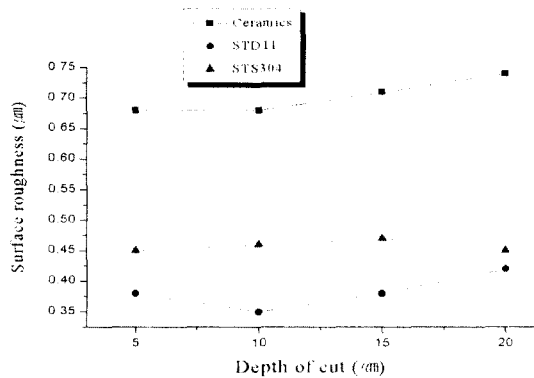


Fig. 8 Variation of surface roughness in accordance with depth of cut

3.3.2 표면 거칠기 특성

Fig. 8에서는 CBN 슛돌로 5 μ m, 10 μ m, 15 μ m, 20 μ m의 절입깊이 변화에 따른 각 공작물의 표면거칠기 Ra값을 측정하여 도시하였다. 각 공작물의 특성에 따라 표면거칠기가 다르게 나타났으며, 특히 STD11과 STS304의 경우에는 표면거칠기가 상당히 양호하게 나타났다. 이에 반해서 세라믹 재료는 표면거칠기가 상대적으로 나쁘게 나타났다. Fig. 6과 7에서 살펴본 바와 같이 상대적으로 연삭력이 낮았던 세라믹 재료가 표면거칠기가 더 나쁜 이유는 소결된 세라믹 재료가 철계 금속보다 쉽게 취성모드에서 가공이 일어나고 따라서 가공면의 표면은 거칠어지는 것으로 생각된다. 그러나 기존의 가공방법으로 얻어지는 표면거칠기에 비해서 상당히 양호한 표면거칠기가 얻어졌으므로 CBN 슛돌에 의한 세라믹 재료의 가공성은 매우 우수하다고 사료된다.

4. 결론

연구는 경취성 난삭재료인 세라믹과 STS304, STD11을 WA 슛돌과 CBN 슛돌로 연삭가공 하는데 있어서, 가공조건 변화에 따라서 연삭력과 표면거칠기를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) WA 슛돌로 세라믹 재료를 가공하여 그 연삭특성을 평가하였다. WA 슛돌로 가공했을 때 연삭력은 세라믹, STD11, STS304의 순으로 크게 나타났다. 특히 고경도, 취성 재료인 세라믹은 WA 슛돌의 절인을 쉽게 마모시켜 연삭력이 상승하고 양호한 표면을 얻을

수 없었다.

- (2) CBN 슛돌로 공작물을 연삭가공 했을 때 연삭력의 크기는 STD11, STS304, 세라믹의 순으로 나타났다. 이러한 결과는 WA 슛돌과는 다소 차이가 있으며, 세라믹 재료의 연삭력이 상당히 저하 하였다. 이것은 CBN 슛돌에 의한 세라믹 재료의 연삭이 가능함을 보여주는 것이다. 그러나 표면 거칠기는 세라믹 재료가 다른 공작물에 비해 좋지 못하였다. 이는 세라믹 재료의 특성으로 취성모드에서 연삭이 이루어지기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 실용적으로 평가해 볼 때 CBN 슛돌에 의한 세라믹 재료의 연삭성은 우수하고, 산업현장에 적용 가능할 것이다.

참고 문헌

- (1) S. B. Ha, "A Study on the Surface Integrity of Grinding of Ceramics," Journal of Applied Mechanics, pp. 337 ~ 342, 2000.
- (2) 원종호, "비트리파이트 본드 CBN 휠의 연삭특성," 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp. 787~792, 2000.
- (3) Smith, "Structure and Properties of Engineering Alloys," Second Edition, pp. 571 ~ 589, 1993.
- (4) S. B. Ha, Y. K. Jeon, W. Choi, J. C. Lee, "A Study on the Grinding Characteristics of Ceramics," J. of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 16, No. 10, pp. 182 ~ 186, 1999.
- (5) 이종찬, 유인석, 초연마재를 이용한 연삭·절삭 가공, 문운당, pp. 41 ~ 160, 1998.
- (6) 하상백, "세라믹연삭에 있어서 표면품질에 관한 연구," 한국공작기계학회 추계학술대회논문집, pp. 337~342, 2000.
- (7) 원종호, "CBN휠에 의한 5종 재료의 연삭 특성 비교," 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp. 925~929, 2001.
- (8) 광재섭, 하만경, "연삭 동력신호를 이용한 결함진단에 관한 연구," 한국공작기계학회지, Vol. 9, No. 4, pp. 108 ~ 116, 2000.
- (9) S. Malkin, Grinding Technology Theory and Applications of Machining with Abrasives, John Wiley & Sons, pp. 18~41, 1989.