

M/C 가공과 회귀분석방법에 의한 가공성 세라믹의 특성 평가

장성민[†] · 윤여권^{*}

유한대학 기계과 · *유한대학 기계설계과
(2008. 2. 1. 접수 / 2009. 1. 10. 채택)

A Property Evaluation of Machinable Ceramics by M/C Machining and Multiple Linear Regression Method

Sung-Min Jang[†] · Yeo-Kwon Yun^{*}

Department of Mechanical Engineering, Yuhan College

^{*}Department of Mechanical Design, Yuhan College

(Received February 1, 2008 / Accepted January 10, 2009)

Abstract : In machining of ceramic materials, they are very difficult-to cut materials because of their high strength and hardness. Machining of ceramics are characterized by cracking and brittle fracture. Generally, ceramics are machined using conventional method such as grinding and polishing. However these processes are generally costly and have low MRR(material removal rate). This paper focuses on machinability evaluation of machinable ceramics for products with CNC machining center. Thus, in this paper, experiment applying cutting parameters is performed based on experimental design method. A design and analysis of experiments is conducted to study the effects of these parameters on the surface roughness by using the S/N ratio, analysis of ANOVA, and F-test. And multiple linear regression analysis is applied to compare experimental with predicted data in consideration of surface roughness. Cutting parameters, namely, feed, cutting speed and depth of cut are used to accomplish purpose of this paper. Required experiments are performed, and the results are investigated.

Key Words : difficult-to cut material, cracking and brittle fracture, machinable ceramics, MRR, experimental design method

1. 서론

세라믹은 매우 높은 용융점을 가지고 있어 크리프 저항에 우수한 전형적인 특성과 내마멸성이 우수해 베어링이나 기계공구류 등에 사용되고 있다. 대부분의 세라믹은 임계 하중 작용 시 무리가 따른다. 이것은 세라믹이 항복(yield)하지 않고 매우 낮은 파괴 인성과 취성이 강한 재료이기 때문이다.

세라믹은 소결에 의해 제조되는 것이 일반적이다. 용도에 따라 고 강도를 요구할 경우에는 분말의 세라믹 입자를 고온, 고압 조건으로 적절히 가압하여 제조한다. 그러나 소결 공정에 의해 생산된 세라믹은 제조과정 중 변형이 발생하여 형상 및 치수정밀도가 떨어진다. 그러므로 정밀한 세라믹을 요구할 경우, 부차적인 기계가공 공정을 필요로 한

다. 그러나 M/C(Machining Center), 선반, 드릴, 연삭 등의 기계적 방법에 의해 세라믹을 생산할 경우 가공 후에 그 기계적 강도가 약화된다는 단점이 있다.

세라믹 가공에 관련된 연구논문을 살펴보면 Zhang¹⁾ 등은 세라믹스의 그레인 크기(grain size)에 의한 구조적 특징과 절삭조건 선택이 세라믹 재료의 취성 파괴와 변형을 조절할 수 있고, 덴탈 세라믹(Dental ceramics)을 대상으로 한 엔드밀 가공에서는 운모 사이즈에 따른 가공성과 가공전후의 기계적 특징을 비교하였다²⁾. 절삭가공 공정을 통해 세라믹스를 생산할 경우, 칩은 공구와 공작물간에 지립자로 작용하여 공구의 마멸을 촉진시킨다. 이를 억제하기 위해 가공 중 발생하는 칩을 뜨거운 공기로 흡입하여 효율적으로 제거토록 하였다³⁾. 또한 Si₃N₄ 세라믹을 PCBN공구를 사용한 가공에서 가공 온도는 공구마멸에 영향을 미치게 되며, 액화질소 냉각(Liquid nitrogen coolant)을 적용한 가공에서는 시

[†] To whom correspondence should be addressed.
twkjsm@yuhan.ac.kr

편의 표면거칠기가 훨씬 더 양호해 짐을 보였다⁴⁾.

금속재료의 M/C 공정에 의한 가공의 경우 연속적인 전단소성변형의 절삭 메카니즘을 갖는다. 그러나 일반적인 세라믹은 금속재료와는 달리 전위운동을 발생시키는 밀집한 평면구조가 아니므로 취성이 매우 강한 경향이 있다. 그러므로 세라믹의 경우 공구가 세라믹에 접촉이 시작되면서 초기 미세균열이 발생하고 이송과 회전력이 세라믹에 계속해서 전달되면서 균열이 성장, 취성파괴에 도달하게 된다. 취성파괴로 인해 칩은 미세 조각이 혼합된 분말형태로 발생한다. 이때 미세 조각은 작업자의 안전을 위협하여 안전가공을 저해한다. 종종 공구의 파손이 미세 조각에 섞이기도 한다. 세라믹의 이러한 파괴모드는 금속재료에 비하여 우수한 강도, 내마멸성, 내열성 등 뛰어난 특성을 갖고 있어 그 용도가 광범위함에도 널리 사용되지 못하고 있는 이유이다. 기계가공이 반드시 요구되는 세라믹의 경우에는 다이아몬드 휠을 장착하여 연삭가공을 하는 것이 보통이다. 그러나 연삭공정은 복잡한 형상의 제품을 생산하기에는 공정 자체가 단조롭고 재료제거에 장시간 소요된다는 단점이 있어 대부분 표면의 마무리를 위한 최종 공정에 적용되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 고 정밀 세라믹 생산의 어려운 현실을 극복하여 제품에 대한 소비자의 신뢰를 높이고 세라믹의 용도에 따라 고유의 특성을 조절하는 대신 기계 가공성을 개선시키기 위해 hBN을 함유한 Si_3N_4 의 머시너블 세라믹을 제조하여 M/C 공정에서 기계 가공성 및 가공후 절삭선단의 상태와 세라믹 표면 상태를 작업자의 안전 관점에서 실험적으로 연구하였다.

2. 세라믹의 제조 및 절삭 메카니즘

BN을 혼합한 Si_3N_4 의 머시너블 세라믹을 Fig. 1과 같은 공정에 의해 제조하였다⁵⁾. 절삭 선단이 머시너블 세라믹에 접촉하면 절삭력이 발생하기 시작하고 세라믹에 임계응력값이 도달할 때 초기의 미세 균열이 확장되어 세라믹의 자유표면에 도달함으로써 칩이 발생하는 절삭 메카니즘을 갖는다. Fig. 2는 절삭공구를 사용한 가공에서 세라믹의 칩 발생 메카니즘을 대략적으로 나타내기 위한 그림이다.

세라믹의 경취성은 MRR(Material Removal Rate)를 크게 하는 것을 물리적으로 불가능하게 한다. 이로 인하여 절삭조건에 따른 구체적인 특성에 관한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 머시너블 세라믹의 절삭조건에 따른 특성을 세라믹 표면과

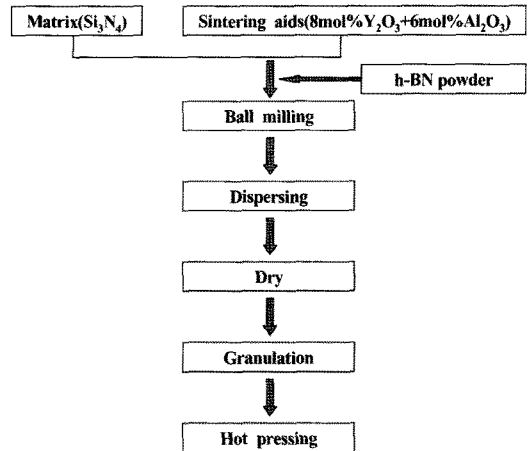


Fig. 1. Flow chart of Si_3N_4 -hBN Machinable ceramics Manufacturing.

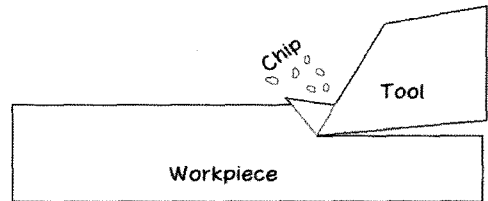


Fig. 2. Machining mechanism mode of machinable ceramics.

공구파손 관점에서 분석하였다. 실험적 분석을 위해 본 연구에서는 공작물인 머시너블 세라믹을 대상으로 인서트 형태의 초경 선단(TECN32TR)을 생크에 고정된 엔드밀 공구를 사용하였다.

3. 실험 및 결과 분석

3.1. 장치 및 조건

Fig. 3은 머시너블 세라믹의 기계가공성을 평가하기 위해 M/C의 주축에 공구를 장착하고 세라믹 시편을 바이스에 고정된 상태를 나타낸 사진이다.

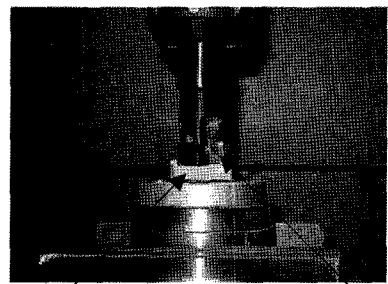


Fig. 3. Schematic diagram of experimental equipments.

연구에 적용된 실험조건은 절삭속도(m/min) 40, 이송속도(mm/min) 30과 60, 절삭깊이(mm)는 축 방향으로 0.1, 0.2 그리고 반경방향은 8로 하였다.

3.2. 공구파손

절삭성을 평가하기 위한 기초실험으로, 엔드밀 가공 후 공구파손 상태를 공구현미경으로 확인하여 Fig. 4~7에 나타내었다. Fig. 4, 5는 이송속도(mm/min) 30, 절삭깊이(mm)를 각각 0.1, 0.2의 조건으로 절삭한 후 공구파손 상태를 나타내는 것으로서 절삭깊이가 큰 경우, 칩핑에 의한 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. Fig. 6, 7은 Fig. 4, 5에 비교하여 이송속도를 60mm/min으로 증가시켜 절삭한 것으로서 이송속도의 증가가 칩핑을 더 크게

발생시킨다는 것을 실험적으로 파악하였다. Fig. 4~7의 공통 결과로서 특히, BN 함유량이 적은 시편의 경우 칩핑에 의한 이상 손상이 확연하게 나타나 작업자의 안전을 위협할 수 있는 것으로 판단되었다. BN의 함유량이 많은 경우에는 칩핑(chipping)과 함께 지립자(abrasive)에 의한 마손(galling)의 영향을 받는 복합손상의 영향으로 공구가 파손 되는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 BN의 함유량 증가가 세라믹의 경도를 떨어뜨리는데 기인하며, 특히 BN 함유량이 10%와 30%의 경우에는 그 정도 차이가 2배 이상⁵⁾ 나는 데에서 그 원인을 분석할 수 있다.

3.3. 세라믹 표면

본 연구에서 절삭성을 평가하기 위한 또 다른 관점으로 M/C가공 후 세라믹의 표면상태를 SEM에 의한 관찰 후 Fig. 8~11에 그 결과 사진을 나타내었다.

Fig. 8, 9는 이송속도(mm/min) 30, 절삭깊이(mm)를 각각 0.1, 0.2의 조건으로 절삭한 후 세라믹의 표면상태를 나타낸 것으로서 절삭깊이가 상대적으로 큰 경우, 세라믹의 표면을 다소 거칠게 하였다. Fig. 10, 11은 Fig. 8, 9에 비하여 이송속도(mm/min)를 60으로 증가시켜 절삭한 것으로서 Fig. 8, 9에 비해 가공 후 세라믹의 표면을 더욱 거칠게 하였다. 절삭조건에 따른 실험적 분석은 이송속도와 절삭깊이의 증가가 세라믹의 표면을 거칠게 하는 것으로 파악되었다. 이것은 이송속도와 절삭깊이의 증가가 공구파손을 초래하여 정상적인 절삭가공을 불가능하게 하였을 뿐만 아니라 세라믹의 표면에 기계적 응력을 증가시켜 사실상 제어가 불가능한 상황에 도달하였기 때문인 것으로 판단된다. BN의 함유량에 따른 관점에서 살펴보면 BN의 함유량이 많을수록 표면상태가 부드럽고 깨끗하게 나타났다. 특히 Fig. 8의 (c)에서와 같이 BN의 함유량이 30%인 경우, 이송속도가 느리고 절삭깊이가 작은 조건에서 가공 후 표면에는 공구의 이송흔적이 남아있는 것을 볼 수 있다. 그러나 칩의 발생이 취성파괴

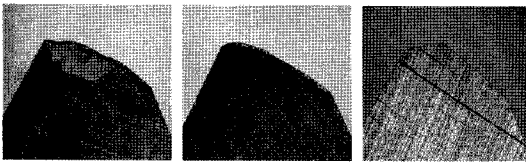


Fig. 4. Tool breakage photograph of tool(feed rate 30mm/min, depth of cut 0.1mm).

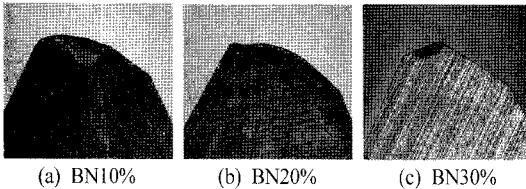


Fig. 5. Tool breakage photograph of tool(feed rate 30mm/min, depth of cut 0.2mm).

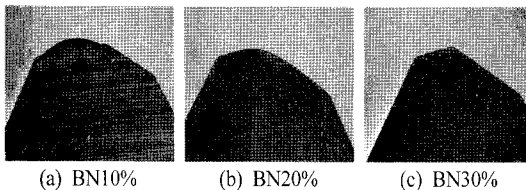


Fig. 6. Tool breakage photograph of tool(feed rate 60mm/min, depth of cut 0.1mm).

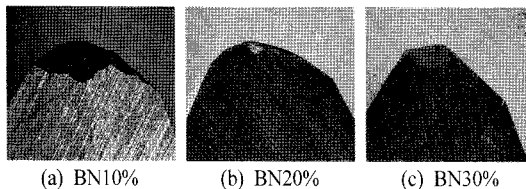


Fig. 7. Tool breakage photograph of tool(feed rate 60mm/min, depth of cut 0.2mm).

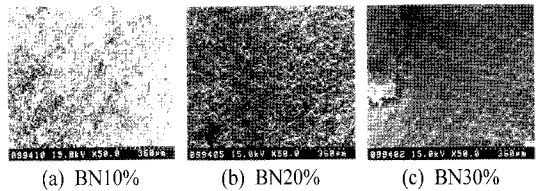


Fig. 8. Tool breakage photograph of tool(feed rate 30mm/min, depth of cut 0.1mm).

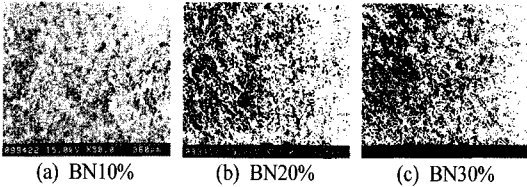


Fig. 9. Tool breakage photograph of tool(feed rate 30mm/min, depth of cut 0.2mm),

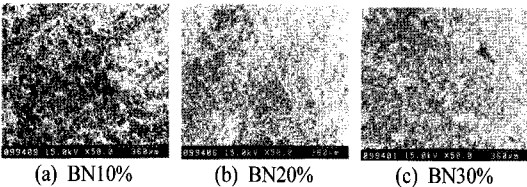


Fig. 10. Tool breakage photograph of tool(feed rate 60mm/min, depth of cut 0.1mm),

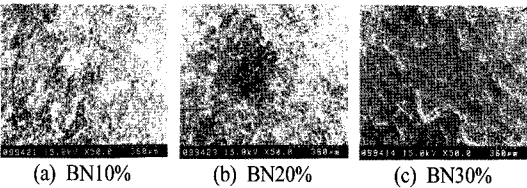


Fig. 11. Tool breakage photograph of tool(feed rate 60mm/min, depth of cut 0.2mm),

모드에 의한 분말 형태이므로 금속재료의 공구 이송흔적 주변에서 볼 수 있는 소성유동의 흔적은 발견할 수 없었다.

3.4. 실험계획법에 의한 실험

실험계획법 이론을 적용하여 MMCs(Metal-matrix composites)의 드릴링에서 절삭력과 표면거칠기에 관한 파라미터 분석⁶⁾, 선삭공정에서 절삭 파라미터의 최적화를 위한 목적^{7,8)} 그리고 코팅공구에서 텅스텐 카바이드 밀링커터의 마멸 최소화⁹⁾를 위한 파라미터 분석 등 폭 넓은 분야에서 파라미터의 최적화 및 데이터의 분석을 위한 실험적 연구를 수행할 수 있다.

본 연구에서는 절삭 파라미터로 이송속도(mm/min), 절삭속도(m/min), 절삭깊이(mm)를 적용하였다. BN 10, 20, 30% Vol이 함유된 Si₃N₄-hBN 세라믹을 시편으로 하였고 표면거칠기를 실험 데이터로 획득하였다. 표면거칠기는 Taylor Hobson Surtronic 3+를 사용하여 측정하였다. 특성함수는 망소특성이므로 S/N비는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$S/N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

Table 1. Orthogonal array of Taguchi for cutting conditions

Experimental number (No)	Feed rate (mm/min)	Cutting speed (m/min)	Depth of cut (mm)
1	30	40	0.05
2	30	80	0.1
3	30	120	0.2
4	60	40	0.2
5	60	80	0.05
6	60	120	0.1
7	90	40	0.1
8	90	80	0.2
9	90	120	0.05

변수설계를 위해 실험에 도입된 직교배열표는 Table 1과 같이 L₉(3⁴)가 적용되었으며 상향, 건식 절삭하였다.

3.5. 표면 거칠기 모델

본 연구목적은 Si₃N₄-hBN 세라믹의 가공특성을 평가하고 안전한 가공을 위한 기초 연구 자료로 활용하고자 한 것이다. 그 방법 중 하나로 각 재료에 따른 다중 회귀분석방법을 이용하여 주어진 절삭조건을 다양하게 활용하였을 때 표면 상태를 예측하기 위한 수학적 모델을 유도함으로써 BN함유량에 따른 특성을 분석하기 위한 것이다. 먼저 실험적 결과를 바탕으로 모델식을 유도하기 위해 실험조건과 그 결과를 이용하였다. 엔드밀 공구의 이송에 의해 세라믹 표면에 남겨진 거칠기는 절삭조건에 따라 변화된다. 이때 평균 거칠기 값을 R_a 이송속도 f, 절삭속도 v, 절삭깊이를 d라고, α, a, b, c를 상수라 하면 표면 거칠기와 각각의 절삭 파라미터와의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_a = \alpha f^a v^b d^c \quad (2)$$

실험에 적용된 3수준 파라미터들의 계산을 단순화하기 위해 통계적 코딩 후, 변환된 식은 다음과 같다.

$$X_n = \frac{2(\ln F - \ln F_{\max})}{(\ln F_{\max} - \ln F_{\min})} + 1 \quad (3)$$

변환 식을 이용하여 각각의 파라미터들에 관한 수준을 구할 수 있다. 여기서 n은 실험에 적용된 파라미터의 수준, F는 적용 파라미터 즉, f, v, d를 의미한다. 그리고 F_{max}, F_{min}는 각 수준별 파라미터

의 최대값과 최소값이다.

식 (3)을 식 (2)에 대입하면 다음과 같이 식 (4)를 구할 수 있다.

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 \quad (4)$$

3 수준을 갖는 각각의 파라미터들을 통계적으로 코딩, 변환 한 후 표면 거칠기에 대한 1차 모델을 BN함유량 10%, 20%, 30%에 관하여 각각 식 (5), (6), (7)에 다음과 같이 얻었다.

$$\ln R_a = 0.2459 + 0.0226X_1 - 0.1133X_2 + 0.1257X_3 \quad (5)$$

$$\ln R_a = -0.3392 + 0.1083X_1 - 0.1799X_2 + 0.0623X_3 \quad (6)$$

$$\ln R_a = -0.3458 + 0.1633X_1 - 0.1064X_2 - 0.0366X_3 \quad (7)$$

각각의 파라미터들을 대상으로 특성치에 관한 통계적 회귀분석 결과 식은 BN함유량 10%, 20%, 30%에 관하여 각각 식 (8), (9), (10)과 같다.

$$R_a = 3.9563f^{0.0412} v^{-0.2063} d^{0.1813} \quad (8)$$

$$R_a = 1.6131f^{0.1971} v^{-0.3276} d^{0.0899} \quad (9)$$

$$R_a = 0.4403f^{0.2973} v^{-0.1938} d^{-0.0528} \quad (10)$$

유도된 식 (8)~(10)을 이용하면 BN함유량에 따른 Si₃N₄-hBN 머시너블 세라믹의 엔드밀 가공 후 표면 상태의 예측은 가능하다. 이송속도가 작고 절삭속도가 빠를수록 표면상태가 좋아진다는 것을 유도식을 통해 알 수 있다. 이것은 일반적인 금속 절삭과 유사한 경향을 갖는 결과이다. 그러나 절삭깊이의 측면에서 BN의 함유량이 10%와 20%인 경우에는 절삭깊이가 작을수록 표면상태가 좋아지고, 30%인 경우에는 절삭깊이가 클수록 표면거칠기가 좋아지는 것으로 나타났다. 이것은 BN의 함유량이 적을수록 절삭깊이가 많아지면 칩핑에 의한 공구 파손이 크게 발생하였기 때문이며, BN을 30%함유한 Si₃N₄-hBN 세라믹의 경우에는 절삭깊이가 증가되어도 상대적으로 칩핑에 의한 파손이 적게 발생하였기 때문인 것으로 분석된다. Fig. 12~14는 실험적으로 획득된 표면거칠기와 다중 회귀분석방법에 의해 유도된 식에서 예상되는 표면거칠기 값을 비교하기 위해 나타낸 것이다. Fig. 12는 13과 14에 비해 실험적으로 획득한 데이터와 예상 데이터

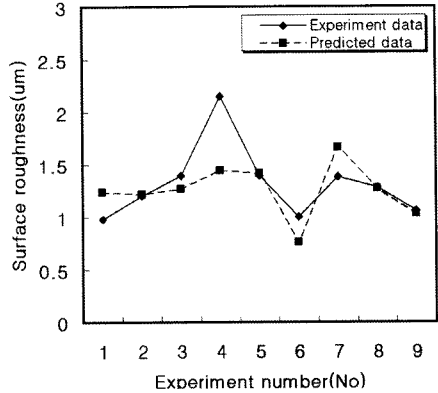


Fig. 12. Comparison of experimental vs. predicted surface roughness for Si₃N₄-hBN ceramics(BN10%).

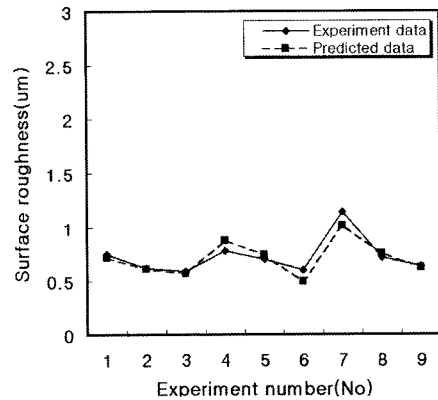


Fig. 13. Comparison of experimental vs. predicted surface roughness for Si₃N₄-hBN ceramics(BN20%).

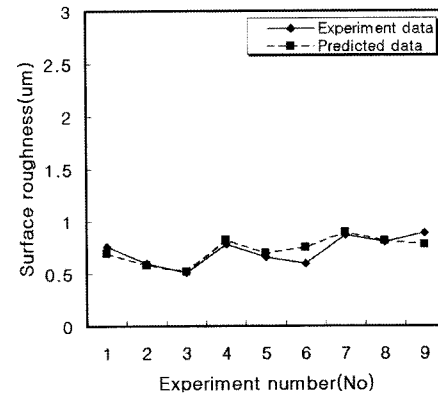


Fig. 14. Comparison of experimental vs. predicted surface roughness for Si₃N₄-hBN ceramics(BN30%).

간의 편차가 다소 크게 발생하는 것을 알 수 있는데, 이것은 BN의 함유량이 적은 시편의 경우 공구 파손이 쉽게 발생하여 표면거칠기의 편차를 크게 하였으며 안전을 저해하는 제어 불가능한 인자의

영향이 크게 작용하였기 때문인 것으로 사료된다. 반면에 Fig. 13과 14는 예상 데이터가 실험 데이터와 유사한 결과를 보이고 있어 식 (9)와 (10)에 대한 높은 신뢰도를 보이고 있다. 이와 같이 머시너블 세라믹 가공에서 직교계획과 회귀분석방법을 이용하면 표면거칠기의 예측이 가능하다. 표면거칠기가 양호하다는 것은 칩핑 등에 의한 파손이 적다고 할 수 있으므로 작업자의 안전과 표면품위의 향상을 위한 최적의 조건 도출도 가능하다. 위와 같은 결과는 향후 머시너블 세라믹에 관한 연구 개발에 도움이 되는 자료로 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 Si_3N_4 -hBN 머시너블 세라믹을 대상으로 절삭가공 후 작업자의 안전을 위한 표면상태 및 공구파손 관점에서 절삭특성을 평가하였고 직교배열과 회귀분석방법을 적용하여 표면거칠기 모델을 유도, 예측 가능성을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) BN의 함유량이 적을수록 공구는 칩핑에 의해 크게 파손하였고, 이송속도와 절삭깊이의 증가에 크게 영향을 받아 작업자의 안전을 저해할 수 있다. BN의 함유량이 많을수록 지립자(abrasive)에 의한 마손(galling)의 영향이 증가되었다.

2) 가공 후 표면상태는 이송속도와 절삭깊이의 증가에 따라 저칠게 나타났다. BN의 함유량 증가는 세라믹의 경도를 저하시켜 가공을 쉽게 하므로 표면상태를 향상시킨다. 특히, 30%의 BN을 함유한 경우, 저속이송, 작은 절삭깊이 조건에서 공구의 이송 흔적이 남아있었으나 소성유동의 흔적은 발견할 수 없었다.

3) BN의 함유량이 적은 경우 공구파손 등으로 인한 잡음의 영향을 크게 받아 표면거칠기의 예측 신

뢰도를 저하시킨다. 반면에 BN의 함유량이 많은 경우 직교계획과 회귀분석방법을 이용한 표면거칠기의 예측이 가능하다.

참고문헌

- 1) G. Zhang, Y. Cao and L. Qi, "Single Point Cutting of Machinable Glass Ceramics", Trans. of NAMRI/SME, Vol. 27, pp. 159~164, 1999.
- 2) G. Zhang, L. Qi and Y. Cao, "Assessment of Machining Performance of Dental Ceramics", Trans. of NAMRI/SME, Vol. 26, pp. 105~110, 1998.
- 3) B. H. Yan, F. Y. Guang and H. M. Chow, "Study on the Turning Characteristics of Alumina-based Ceramics", J. of MPT, Vol. 54, pp. 341~347, 1995.
- 4) Z. Y. Wang, K. P. Rajurkar and M. Murugapan, "Cryogenic PCBN turning of ceramic(Si_3N_4)", Wear, Vol. 196, pp. 1~6, 1996.
- 5) S. M. Jang, M. W. Cho, W. S. Cho and J. H. Lee, "Evaluation of R-curve Behavior Analysis and Machinability of Si_3N_4 -hBN Machinable Ceramics", KSPE, Vol. 21, No. 1, pp. 61~70, 2004.
- 6) J. P. Davim, "Study of drilling metal-matrix composites based on the Taguchi Techniques", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 132, pp. 250~254, 2003.
- 7) W. H. Yang and Y. S. Tarng, "Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 84, pp. 122~129, 1998.
- 8) M. S. Hong and Z. M. Lian, "The optimal selection of cutting parameters in turning operations", Transaction of NAMRI/SME, Vol. XXIX, pp. 319~325, 2001.
- 9) Y. L. Su, S. H. Yao, C. S. Wei and Wu. C.T, "Analyses and design of a WC milling cutter with TiCN coating", Wear, Vol. 215, pp. 59~66, 1998.