

## 세라믹 성형체의 미소구멍 가공 시 다이아몬드 입자 전착 드릴의 공구 수명 예측 모델

이학구\* (KAIST 기계공학과 박사과정), 이대길 (KAIST 기계공학과)

Model for predicting tool life of diamond abrasive micro-drills  
during micro-drilling of ceramic green bodies

H. G. Lee (Mecha. Eng. Dept., KAIST), D. G. Lee (Mecha. Eng. Dept., KAIST)

### ABSTRACT

Ceramic plates containing many micro-holes are used in diverse applications such as MCP (Microchannel Plate), catalytic converters, filters, electrical insulators in integrated circuits, and so on. One of the efficient methods for machining many holes in ceramic plates is wet drilling of ceramic green bodies followed by sintering them. Since the strength of ceramic green bodies is much lower than the strength of sintered ceramic plate, ceramic green bodies can be drilled with high feed rate. The axial force during micro-drilling of ceramic green bodies increases rapidly at high feed rate, which induces the crack in workpiece. Therefore, the tool life of micro-drill with respect to feed rate may be determined by the predicting increase of axial force. In this work, the axial force during micro-drilling was calculated using the chip flow model on the micro-drill tip, from which the tool life of diamond abrasive micro-drill during micro-drilling of ceramic green bodies was calculated.

**Key Words** : Ceramic green bodies (세라믹 성형체), Micro-drilling (미소구멍 가공), Tool life (공구수명), Sliding wear (미끄러짐 마모), Erosive wear (침식 마모)

### 1. 서론

다수의 미소구멍을 가지는 세라믹 재료는 MCP (Microchannel Plate), 촉매 컨버터 (Catalytic Converter), 필터 (Filter), 집적회로에서의 전기 절연체 등 다양한 분야에 사용되고 있다. 이러한 다수의 미소구멍을 세라믹 재료에 직접 가공하기에는 세라믹 재료의 높은 경도, 낮은 열전도도 및 취성으로 인하여 가공성 (Machinability)이 떨어지기 때문에 이를 해결할 수 있는 새로운 가공 방법에 대한 연구가 필요하다.

세라믹 분말과 고분자 결합체의 혼합물인 세라믹 성형체 (Ceramic Green Body)를 가공 후, 소결 (Sintering)시키는 방법은 기존의 세라믹 가공에 비하여 가공 속도를 크게 증가시킬 수 있는 가공 방법이며, 이에 대하여 기존의 수행된 연구를 요약하면 다음과 같다.

Besshi [1] 등은 왁스 (Wax)가 첨가된 폴리에틸렌 (Polyethylene)을 결합체로 사용한 알루미늄 성형체의 절삭가공에 대하여 연구를 수행하였으며, 성형체 내의 왁스 질량 비에 따른 홈 절삭 (Groove Cutting) 성능 및 성형체로부터 왁스를 제거하는 방법에 대해서 실험을 수행하였다. Maier [2] 등은 알루미늄 성형체의 선삭 가공 실험을 통하여 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이의 변화에 따른 표면 거칠기 변화에 대하여 연구를 수행하였다. Imen [3] 등은 CO<sub>2</sub> laser를 이용하여 PVB (Polyvinyl Butyral) 결합체를 사용한 알루미늄 성형체에 구멍가공을 수행하였으나, 구멍 단면이 기울어진 형상으로 가공되어 채널 입구부와 출구부의 지름이 상당한 차이를 보였다. Lee [4] 등은 알루미늄 성형체에 다이아몬드 입자 전착 드릴과 습식 미소구멍 가공을 이용하여 직경 215  $\mu\text{m}$ , 길이 1.5 mm, 단면 기울기 0.32° 이하의 미소구멍을 수백 회 이상 가공하였으며, 각 이

송속도에서 가공회수에 따른 축방향 힘 (Axial Force)의 증가를 측정하였다.

이와 같이 기 수행된 연구 중 다수의 세라믹 미소구멍 가공에 적합한 방법은 다이아몬드 입자 전착 드릴과 습식 미소구멍 가공을 이용한 방법이다. 하지만, 가공회수에 따른 축방향 힘의 증가 원인 및 가공 조건에 따른 다이아몬드 입자 전착 드릴의 공구 수명에 대한 연구는 미비한 실정이다.

본 연구의 목적은 가공회수에 따른 축방향 힘의 변화를 칩 유동 모델을 통하여 예측하고 이로부터 공구 수명을 결정하는데 있다. 이를 위하여 마이크로 드릴 팁 (Tip)에서 발생하는 미끄러짐 마모 (Sliding Wear)와 침식 마모 (Erosive Wear)로부터 칩 배출에 필요한 마이크로 드릴 팁에서의 압력 분포 변화를 계산하였으며, 이를 바탕으로 축방향 힘 증가를 예측하였다. 또한 가공 실험 결과 및 예측된 축방향 힘으로부터 공구의 수명을 결정하였다.

## 2. 칩 유동 모델

### 2.1 세라믹 성형체의 습식 미소구멍 가공

Fig. 1 은 세라믹 성형체의 습식 미소구멍 가공에 사용된 1000 메시 (Mesh) 다이아몬드 연삭 입자가 텅스텐 카바이드 샹크 (WC Shank)에 니켈 (Nickel) 전착 (Electro-deposition)된 마이크로 드릴의 형상을 나타낸다.

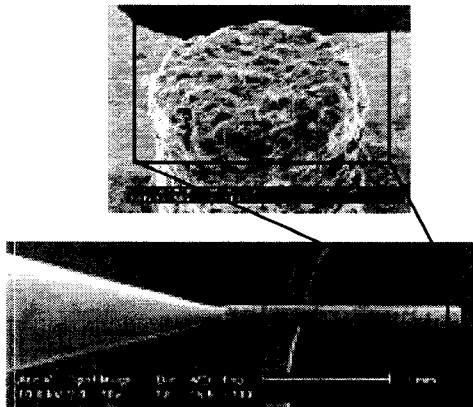


Fig. 1 Diamond abrasive micro-drill

세라믹 분말과 고분자 결합체의 혼합물인 세라믹 성형체는 다공성 재료이기 때문에 연삭액 (Grinding Lubricant)이 기공에 채워진 상태로 습식 미소구멍 가공을 하게 된다. Fig. 2 는 세라믹 성형체의 습식 미소구멍 가공 시 연삭 입자의 절삭 과정을 개략적으로 나타낸 그림이다. 연삭 입자에 의해 고분자 결합체가 끊어지게 되면 세라믹 분말이 칩 (Chip)으로 생성되며, 생성된 칩은 드릴의 모세

(Matrix)와 세라믹 성형체 사이의 공간을 통해 외부로 배출되게 된다. 따라서 세라믹 성형체의 미소구멍 가공 시 측정되는 축방향 힘,  $F$  는 고분자 결합체를 끊는데 필요한 절삭력,  $F_a$ 와 칩 유동을 발생시키는 압력 분포,  $P$  로 나누어 생각할 수 있다. 축방향 힘을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$F = F_a + \int PdA \quad (1)$$

$F_a$  는 단위시간당 끊어지는 고분자 결합체의 수에 비례하므로 이송속도만의 함수이다. 따라서 가공 시간에 따른  $F$  의 증가는  $P$  의 변화에 의해 설명할 수 있으며,  $P$  는 칩 유동 공간의 형상에 의해 결정된다. Fig. 3 은 연삭 입자 및 모재의 마모에 의하여 발생하는 칩 유동 공간의 높이,  $h$  의 변화를 개략적으로 나타낸 것이다.  $h$  는 연삭 입자의 마모량,  $\Delta h_a$ 와 모재의 마모량,  $\Delta h_m$ 의 변화에 관계되며, 연삭 입자 및 모재의 마모는 회전축으로부터의 거리  $r$  및 가공 시간의 함수이다.

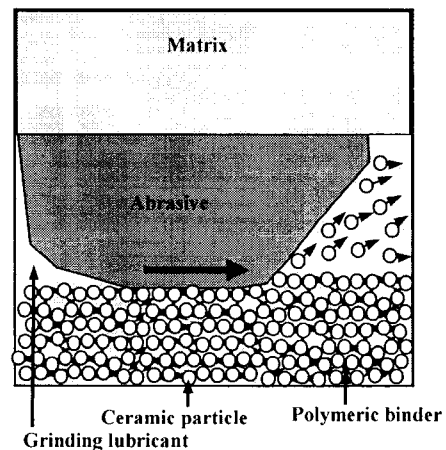


Fig. 2 Schematic cutting operation of the abrasive during micro-drilling of ceramic green bodies.

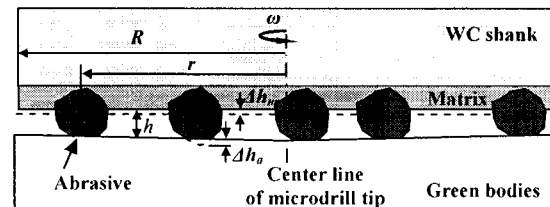


Fig. 3 Change of abrasive height during micro-drilling of ceramic green bodies.

## 2.2 연삭 입자의 마모

세라믹 성형체의 미소구멍 가공에서 발생하는 연삭 입자의 마모 현상은 세라믹 분말에 의한 미끄러짐 마모(Sliding Wear)로 생각할 수 있다. 미끄러짐 마모는 일반적으로 수직항력  $F_n$ 과 미끄러진 길이  $S$ 에 비례하며 재료의 경도,  $H$ 에 반비례한다. Archard의 모델을 사용하여 마모 부피  $V$ 를 나타내면 다음과 같다 [5].

$$V = c_1 \frac{F_n S}{H} \quad (2)$$

여기서  $c_1$ 은 비례상수이다.

연삭 입자의 수직항력은 절삭력의 축방향 성분과 같고, 세라믹 성형체의 가공에서 절삭력은 이송속도  $v_f$ 에 비례한다고 가정하면  $F_n$  및  $S$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_n &= c_2 v_f \\ S &= r \omega t \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $c_2$ 는 비례상수,  $\omega$ 는 회전속도를 나타낸다.

Fig. 4와 같이 마이크로 드릴에 전착된 연삭 입자를 반경이  $r_a$ 인 구로 가정하고, 마모에 의한 연삭 입자의 높이 변화를  $\Delta h_a$ 라하면 마모 부피  $V$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \int_0^{h_a} \pi(2r_a h - h^2) dh = \frac{\pi}{3} (3r_a \Delta h_a^2 - \Delta h_a^3) \quad (4)$$

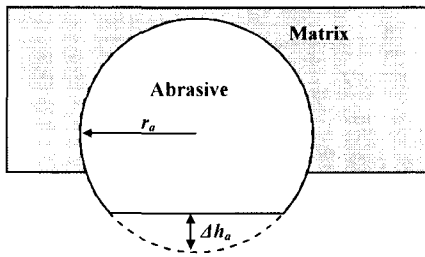


Fig. 4 Simple model of abrasive shape.

식 (3) - (4)를 식 (2)에 대입하면 연삭 입자의 높이 변화  $\Delta h_a$ 는 식 (5)와 같은  $r$  및  $t$ 를 변수로 하는 삼차 방정식으로 표현된다.

$$\Delta h_a^3 - 3r_a \Delta h_a^2 + c_a \frac{v_f r \omega}{H} t = 0 \quad (5)$$

여기서  $c_a = c_1 c_2$ 로 상수이다.

## 2.3 모재의 마모

세라믹 성형체의 미소구멍 가공에서 발생하는 드릴 모재의 마모는 세라믹 분말 칩이 밖으로 배출되는 과정에서 모재를 침식시켜 발생된다. 이러한 침식 마모 (Erosive Wear)는 일반적으로 유동 입자의 운동 에너지에 비례하며, Finnie의 모델을 사용하여 마모 부피  $V$ 를 나타내면 다음과 같다 [5].

$$V = c_3 M U^2 \quad (6)$$

여기서  $M$ 은 도릴 모재 표면을 지나가는 유동 입자의 총 질량,  $U$ 는 유동 입자의 속도,  $c_3$ 는 비례상수이다.

세라믹 성형체의 가공에서  $M$ 은 칩 생성량에 비례하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M = c_4 A v_f t \quad (7)$$

여기서  $c_4$ 는 비례상수,  $A$ 는 가공 면적이다.

모재의 표면을 지나가는 세라믹 분말의 속도는 거리  $r$ 에서의 평균 속도에 비례한다고 생각할 수 있으므로, 연속 방정식으로부터  $U$ 를 구하면 다음과 같다.

$$U = c_5 \frac{\pi r^2 v_f}{2\pi r h} = c_5 \frac{r v_f}{2h} \quad (8)$$

여기서  $c_5$ 는 비례상수이다.

드릴 모재의 마모 부피  $V$ 는 모재의 면적과 모재의 높이 변화  $\Delta h_m$ 의 곱과 같으며, 모재의 면적은 가공 면적과 같으므로,  $V$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = A \Delta h_m \quad (9)$$

식 (7) - (9)를 식 (6)에 대입하면 모재의 높이 변화  $\Delta h_m$ 은 식 (10)과 같은  $r, t, h$ 의 함수로 표현된다.

$$\Delta h_m = c_m \frac{v_f^3 r^2}{h^2} t \quad (10)$$

여기서  $c_m = \frac{c_3 c_4 c_5^2}{4}$ 로 상수이다.

## 2.4 칩 유동 공간의 높이 변화

칩 유동 공간의 높이  $h$ 는 초기 높이  $h_0$ 에서 연삭 입자 및 모재의 마모에 의한 높이 변화를 더한 값으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h = h_o + \Delta h_m - \Delta h_a \quad (11)$$

식 (11)에서와 같이 연삭 입자의 마모는  $h$  를 감소시키며, 모재의 마모는  $h$  를 증가시킨다. 식 (11)에 식 (10)을 대입하여 정리하면,  $h$  는 식 (12)와 같은  $r, t, \Delta h_a$  를 변수로 하는 삼차 방정식으로 표현된다.

$$h^3 + [\Delta h_a(r, t) - h_o] h^2 - c_m v_f^3 r^2 t = 0 \quad (12)$$

## 2.5 마이크로 드릴 팁에서의 압력 분포

칩 유동 공간의 높이  $h$  는 마이크로 드릴의 반경  $R$  에 비하여 매우 작기 때문에 압력 분포  $P$  는 회전축으로부터의 거리  $r$  만의 함수로 가정할 수 있다. 또한, 칩 유동을 정상상태 (Steady State)의 비압축성 (Incompressible) 유동으로 가정하고, 체적력 (Body Force)을 무시하면 Navier-Stokes 방정식 및 연속 방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho \left[ v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right] = -\frac{dP}{dr} + \mu \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) \right) + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right] \quad (13)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (14)$$

변수들을 무차원화 하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{r} &= \frac{r}{R} & \bar{z} &= \frac{z}{h} & \bar{v}_z &= \frac{v_z}{v_f} & \bar{v}_r &= \frac{2hv_r}{Rv_f} \\ \bar{v}_\theta &= \frac{v_\theta}{R\omega} = \frac{r}{R} = \bar{r} & \bar{P} &= \frac{h^2 P}{\mu R v_f} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서  $\mu$  는 점도를 나타낸다.

무차원 변수를 이용하여 식 (13)을 나타내면,

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{P}}{d\bar{r}} &= \left[ \frac{h}{2R} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left( \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} (\bar{r}\bar{v}_r) \right) + \frac{R}{2h} \frac{\partial^2 \bar{v}_r}{\partial \bar{z}^2} \right] \\ &\quad - \left[ \frac{R\rho v_f}{4\mu} \bar{v}_r \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial \bar{r}} + \frac{R\rho h}{2\mu} \frac{\bar{v}_\theta}{\bar{r}} \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial \theta} - \frac{R\rho \omega^2 h^2}{\mu v_f} \frac{\bar{v}_\theta^2}{\bar{r}} + \frac{R\rho v_f}{2\mu} \bar{v}_z \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial \bar{z}} \right] \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 각항의 계수 (Order) 크기를 비교하여 작은 항들을 무시하면 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\bar{P}}{d\bar{r}} = \frac{R}{2h} \frac{\partial^2 \bar{v}_r}{\partial \bar{z}^2} + \frac{R\rho \omega^2 h^2}{\mu v_f} \bar{r} \quad (17)$$

마찬가지로 식 (14)를 무차원 변수를 이용하여 나타내면 식 (18)과 같다.

$$\frac{1}{2\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} (\bar{r}\bar{v}_r) + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{z}} = 0 \quad (18)$$

경계조건 (Boundary Condition)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{v}_r(\bar{r}, 0) &= \bar{v}_r(\bar{r}, 1) = 0, & \bar{v}_z(\bar{r}, 0) &= 1, & \bar{v}_z(\bar{r}, 1) &= 0 \\ \bar{P}|_{\bar{r}=1} &= 0, & \left. \frac{d\bar{P}}{d\bar{r}} \right|_{\bar{r}=0} &= 0 \end{aligned} \quad (19)$$

식 (17)을  $\bar{z}$  에 대하여 적분하면,

$$\bar{v}_r = \left( \frac{h}{R} \frac{d\bar{P}}{d\bar{r}} - \frac{\rho \omega^2 h^3}{\mu v_f} \bar{r} \right) \bar{z}^2 + f(\bar{r})\bar{z} + g(\bar{r}) \quad (20)$$

식 (19)의 경계조건으로부터

$$\begin{aligned} g(\bar{r}) &= 0 \\ f(\bar{r}) &= - \left( \frac{h}{R} \frac{d\bar{P}}{d\bar{r}} - \frac{\rho \omega^2 h^3}{\mu v_f} \bar{r} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

따라서,  $\bar{v}_r$  은 다음과 같다.

$$\bar{v}_r = \left( \frac{h}{R} \frac{d\bar{P}}{d\bar{r}} - \frac{\rho \omega^2 h^3}{\mu v_f} \bar{r} \right) (\bar{z}^2 - \bar{z}) \quad (22)$$

식 (18)을  $\bar{z}$  에 대하여 적분하면,

$$\begin{aligned} \int_0^1 \frac{1}{2\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} (\bar{r}\bar{v}_r) d\bar{z} + \int_0^1 \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{z}} d\bar{z} \\ = \frac{1}{2\bar{r}} \left( \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \int_0^1 \bar{r}\bar{v}_r d\bar{z} \right) - 1 = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

여기에 식 (22)를 대입하여 정리하면,

$$\frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left[ -\frac{\bar{r}}{6} \left( \frac{h}{R} \frac{d\bar{P}}{d\bar{r}} - \frac{\rho \omega^2 h^3}{\mu v_f} \bar{r} \right) \right] = 2\bar{r} \quad (24)$$

식 (24)를  $\bar{r}$  에 대하여 적분하면,

$$\frac{d\bar{P}}{d\bar{r}} = \frac{R}{h} \left[ -6\bar{r} - \frac{6}{\bar{r}} b(\bar{z}) + \frac{\rho\omega^2 h^3}{\mu\nu_f} \bar{r} \right] \quad (25)$$

경계조건으로부터  $b(\bar{z})=0$  이므로, 칩 유동의 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d\bar{P}}{d\bar{r}} = \left( -\frac{6R}{h} + \frac{\rho\omega^2 h^3 R}{\mu\nu_f} \right) \bar{r} \quad (27)$$

따라서, 연삭 입자의 마모에 의한 높이 감소를 식 (5)로부터 구한 후, 이를 이용하여 칩 유동 공간의 높이 변화를 식 (12)로부터 구하고, 식 (27)의 압력 구배를 풀면 압력 분포가 얻어진다.

### 3. 공구 수명의 수명 예측

#### 3.1 이송속도에 따른 축방향 힘

알루미늄 대 에폭시 결합체의 무게 비 95 wt%: 5wt%를 갖는 밀도  $2.0 \text{ g/cm}^3$ 의 알루미늄 성형체에 직경  $200 \mu\text{m}$ 의 다이아몬드 입자 전착 드릴을 사용하여 이송속도 10, 25, 30 mm/min 으로 가공실험을 수행하였다. 최소자승법 (Least Square Mehtod)을 사용하여 측정된 축방향 힘으로부터 연삭 입자의 마모와 관련된 상수  $c_a$ , 모체의 마모와 관련된 상수  $c_m$ , 칩 유동의 점도  $\mu$ 를 결정하였다.

$$\begin{aligned} c_a &= 9.936 \times 10^{-7} \text{ [kg} \cdot \text{s/m]} \\ c_m &= 2.223 \times 10^{-4} \text{ [s}^2 \text{/m}^2] \\ \mu &= 2.558 \text{ [Pa} \cdot \text{s]} \end{aligned} \quad (28)$$

Fig. 5는 각각 이송속도 10, 25, 30 mm/min 에서 측정된 축방향 힘과 모델로부터 계산된 축방향 힘을 나타내며, 모델에 의한 증가 경향과 실험 값의 증가 경향이 일치하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 이송속도에 따른 축방향 힘의 증가 경향을 나타낸다. 이송속도가 증가할수록 축방향 힘이 급격히 증가가 빨리 발생하는 것을 볼 수 있다.

#### 3.2 이송속도에 따른 공구의 수명

가공 실험으로부터 축방향 힘의 증가율  $0.02 \text{ N/min}$  부근에서 축방향 힘의 급격한 증가가 나타나는 것을 볼 수 있었다. 축방향 힘의 급격한 증가는 마이크로 드릴의 파손 및 세라믹 성형체에 균열을 발생시킬 수 있기 때문에 공구의 수명은 축방향 힘의 증가율이  $0.02 \text{ N/min}$ 에 도달할 때까지의 가공시간으로 정의할 수 있다.

Fig. 7은 모델로부터 예측된 축방향 힘의 증가율  $0.02 \text{ N/min}$ 까지의 가공 시간을 나타낸다. 이것을

가공 깊이 1.5 mm 일 때 가공할 수 있는 미소구멍의 수로 환산하여 나타내면 Fig. 8과 같다. Fig. 8로부터 가공할 수 있는 미소구멍 수는 이송속도 증가에 따라 선형 감소 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

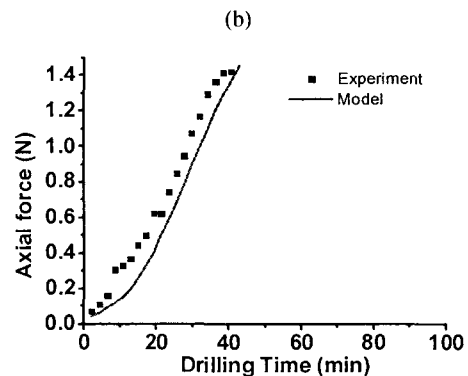
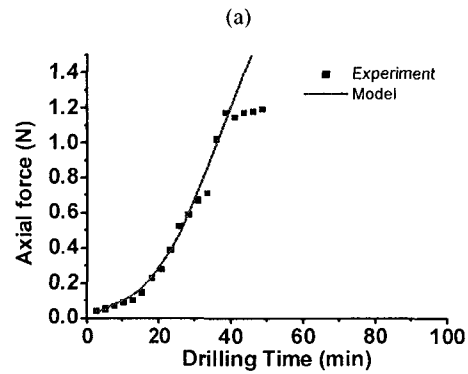
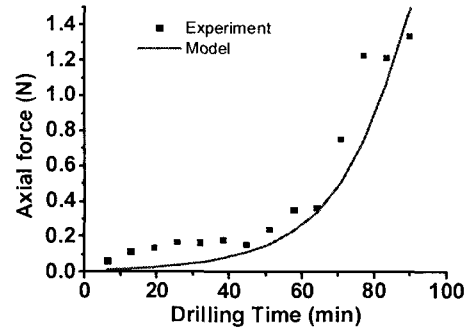


Fig. 5 Axial forces measured from experiment and calculated by chip flow model: (a) Feed rate of 10 mm/min; (b) Feed rate of 25 mm/min; (c) Feed rate of 30 mm/min.

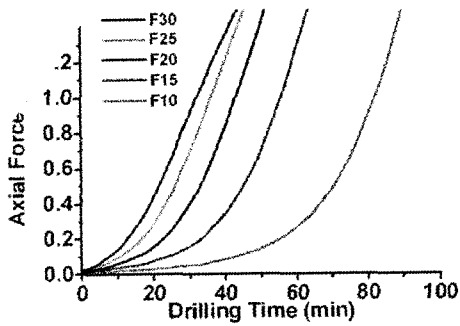


Fig. 6 Axial forces with respect to feed rate.

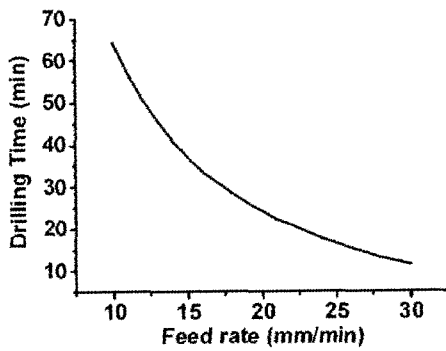


Fig. 7 Drilling time up to tool life with respect to feed rate.

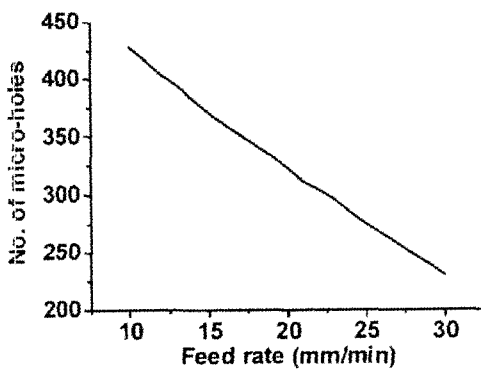


Fig. 8 Number of micro-holes drilled up to tool life with drilling length of 1.5mm.

#### 4. 결론

세라믹 성형체의 습식 미소구멍 가공에서 가공 시간에 따른 축방향 힘의 증가는 칩 유동 공간의 높이 감소가 원인이며, 이는 연삭 압자 및 드릴 소재의 마모로부터 결정된다. 따라서 칩 유동 모델로부터 각 이송속도에서 가공시간에 따른 축방향 힘의 증가를 예측할 수 있으며, 이로부터 공구의 수명을 예측할 수 있다.

#### 참고문헌

1. Besshi, T., Sato, T., and Tsutsui, J., "Machining of alumina green bodies and their dewaxing," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 95, pp.133-138, 1999.
2. Maier, H. R., and Michaeli, N., "Green Machining of Alumina," *Key Engineering Materials*, Vols. 132-136, pp. 436-439, 1997.
3. Imen, K., and Allen, S. D., "Pulse CO<sub>2</sub> Laser Drilling of Green Alumina Ceramic," *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, Vol. 22, No. 4, pp.620-623, 1999.
4. Lee, D. G., Lee, H. G., Kim, P. J., and Bang, K. G., "Micro-drilling of alumina green bodies with diamond grit abrasive micro-drills," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, pp. 551-558, 2003.
5. Suh, N. P., *Tribophysics*, Prentice-hall, inc., New Jersey, 1986