

다이아몬드 입자 전착 드릴에 의한 알루미나 성형체의 미소구멍가공

이학구*, 방경근, 김포진 (KAIST 기계공학과), 이대길 (KAIST 기계공학과 교수)

Micro-drilling of alumina green body with diamond abrasive drills

H. G. Lee, K. G. Bang, P. J. Kim (Mecha. Eng. Dept. KAIST), D. G. Lee (Professor Mecha. Eng. Dept. KAIST)

ABSTRACT

Although ceramic plates with many micro-holes are used as MCP (Micro-channel plate) for electron amplification, catalytic converters, filters, electrical insulators and thermal conductors in integrated circuits, the drilling of micro-holes in the ceramics is difficult because of their low thermal conductivity, high hardness and brittleness. Therefore, in this work, the machining of ceramic green body followed by sintering of green body was employed for fabricating ceramic plates with many micro-holes. The micro-drilling of alumina green body was performed with diamond abrasive WC drills, and the cutting force w.r.t. drilling times was measured for the determination of tool life. From the investigation of the wear of micro-drill tip w.r.t. drilling times, the wear mechanism of tip during micro-drilling of ceramic green body was suggested.

Key Words : Micro-drilling (미소구멍가공), Alumina green body (알루미나 그린 바디), Wear (마모), Drilling times (가공회수), Micro-drill tip (마이크로 드릴 팁)

1. 서론

다수의 미소구멍 (Micro-hole)을 가지는 세라믹 재료는 전자의 수를 증폭하는 장치인 MCP (Micro-channel Plate), 촉매 컨버터 (Catalytic Converter), 필터 (Filter), 집적 회로에서의 전기적 절연체와 열전도체 등 다양한 분야에 사용되고 있다.

세라믹 재료는 높은 경도, 낮은 열전도도 및 취성으로 인하여 가공성이 나쁘기 때문에 세라믹 재료의 미소구멍은 일반적으로 고분자 결합재 (Polymer Binder)와 세라믹 분말의 혼합물인 세라믹 성형체 (Ceramic Green Body)에 미소구멍 가공을 수행한 후, 가공된 세라믹 성형체를 소결하여 제조한다 [1]. 얇은 필름 (Film) 형상을 갖는 세라믹 성형체의 경우, 펀칭 (Punching) 방법을 이용하여 미소구멍 가공을 수행하고 있다. 하지만, 두꺼운 세라믹의 미소구멍은 펀칭을 이용하여 제작하기 어렵기 때문에, 얇은 세라믹 성형체를 펀칭한 후 세라믹 성형체를 적층하고 소결하여 제조된다. 이 경우 적층과정이 필요하기 때문에 치수 정밀도가 떨어지게 되고 공정이 복잡해지게 된다. 이러한 문제점을 해결하기

위하여 깊은 미소구멍까지 적용이 가능한 세라믹 성형체의 미소구멍 가공방법에 대한 연구가 필요하다 [2].

세라믹 성형체의 물성 및 가공에 대하여 기존의 수행된 연구를 요약하면 다음과 같다. Kumar, D. B. R. [3] 등은 고분자 결합재의 유리전이온도 (Glass Transition Temperature)가 그린 강도 (Green Strength)에 미치는 영향에 대하여 연구를 수행하였으며, 연구 결과로부터 기존의 절삭가공 방법에 적합한 결합재는 아크릴 결합재 (Acrylic Binder)임을 제시하였다. Wu, X. L. K. [4] 등은 결합재의 종류에 따른 성형 강도 차이에 대하여 연구를 수행하였으며, 수분 함유량 증가에 따른 성형 강도의 감소에 대해서도 연구를 수행하였다. Doreau, F. [5] 등은 테이프 (Tape) 형상의 성형체를 사용하여 결합재의 질량비에 따른 기계적 성질과 성형 밀도 (Green Density)의 변화에 대하여 연구를 수행하였으며, 적층 후의 성형밀도 변화에 대해서도 연구를 수행하였다. Besshi, T. [6] 등은 왁스 (Wax)가 첨가된 폴리에틸렌 (Polyethylene)을 결합재로 사용한 알루미나 성형체의 절삭가공에 대하여 연구를 수행하였으며, 성형체 내

의 왁스 질량 비에 따른 홈 절삭 (Groove Cutting) 성능 및 성형체로부터 왁스를 제거하는 방법에 대해서도 실험을 수행하였다. Maier, H. R. [7] 등은 알루미늄 그린 바디의 선반 가공 실험을 통하여 절삭 속도, 이송속도, 절삭깊이의 변화에 따른 표면 거칠기 변화에 대하여 연구를 수행하였다. Imen, I. [2] 등은 CO₂ laser 를 이용하여 PVB (Polyvinyl Butyral) 결합재를 사용한 알루미늄 그린 바디에 구멍가공을 수행하였으나, 채널 단면이 기울어진 형상으로 가공되어 채널 입구부와 출구부의 지름이 상당한 차이를 보였다.

이와 같이 세라믹 성형체의 물성 및 가공에 대한 다수의 연구들이 수행되었지만, 일반적인 절삭 가공에서 결합재가 미치는 영향에 대한 연구가 수행되었을 뿐, 그린 바디의 미소구멍가공에 관한 연구는 미미한 실정이다. 또한, 다수의 연구들은 절삭 가공에 적절한 고분자 결합재로 열가소성수지 (Thermoplastic)를 제안하고 있지만, 미소구멍 가공의 경우 절삭면에서 열가소성 수지 결합재가 절삭 열에 의하여 녹은 후, 공구에 붙어 눈매움 (Loading) 현상을 발생시키므로, 세라믹 성형체 미소구멍 가공의 경우 일반가공과는 다른 적절한 결합재의 선정이 필요하다.

본 연구의 목적은 세라믹 성형체에 다수의 미소구멍가공 수행을 위한 마이크로 드릴의 공구 수명 결정이며, 이를 위하여 열경화성수지 (Thermoset)인 에폭시 (Epoxy)를 고분자 결합재로 사용하여 알루미늄 성형체를 제조한 후 미소구멍 가공을 수행하였다. 미소구멍 가공 시 가공회수 증가에 따른 절삭력의 변화를 측정하였으며, 공구 수명 결정을 위하여 절삭력 변화의 원인을 분석하고 마이크로 드릴 팁의 마모 메커니즘 모델 (Mechanism Model)을 제시하였다.

2. 알루미늄 성형체의 미소구멍가공

2.1 알루미늄 성형체의 제조

시편의 재료인 알루미늄 성형체는 알루미늄 분말과 고분자 결합재의 혼합물이며, 알루미늄 성형체의 강도는 결합재의 종류에 따라 달라지지만 일반적으로 10 MPa 이하의 낮은 값을 갖는다 [4]. 본 연구에서는 기계적 성능이 우수하고 점도가 낮은 주물용 (casting) 에폭시를 고분자 결합재로 선정하여 알루미늄 성형체를 제조하였다.

본 연구에서 사용한 알루미늄 분말은 Sumitomo (Osaka, Japan)사에서 제조된 평균입자크기 0.5 μm, 순도 99.99%인 AKP-20 이며, 에폭시 결합재는 세폴 폴리머에서 제조된 주물용 (Casting) 에폭시 수지 SK-3060A 와 경화제 SK-3060B 이다. 알루미늄과 에

폭시 결합재의 혼합비는 연삭 가공용 세라믹 성형체의 일반적인 무게 혼합비인 95 wt% : 5 wt% (부피 분율 85 : 15)로 결정하였다 [4].

알루미늄 성형체 제조 시 에폭시 결합재를 알루미늄 분말과 직접 혼합하기에는 에폭시 결합재의 부피비가 작고 점도가 너무 높기 때문에 에폭시 결합재를 아세톤에 녹여 점도를 낮춘 후 알루미늄 분말과 혼합하였다. 혼합물을 30 mm × 30 mm × 2 mm 의 금형 내부에 4.05 g 채운 후 오토클레이브 (Autoclave) 내에서 Fig. 1 과 같은 알루미늄 성형체의 경화사이클을 이용하여 에폭시 결합재를 경화시켰다. 경화사이클은 60 °C에서 30분 유지시켜 아세톤 제거하는 구간과 120 °C에서 2시간 유지시켜 에폭시 결합재를 경화시키는 구간으로 이루어진다. 경화된 알루미늄 성형체는 두께 1.5 mm 로 가공하고, 2000 메시 (Mesh) 사포 (Sand Paper)로 폴리싱 (Polishing)하여 시편으로 제조하였다.

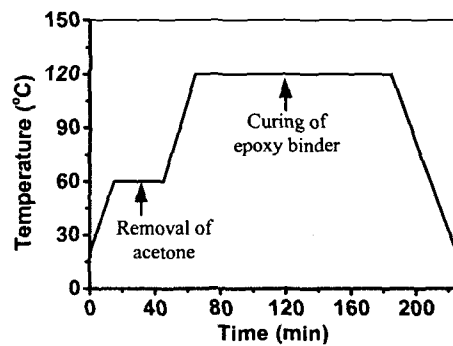


Fig. 1 Curing cycle for alumina green body with epoxy binder

2.2 미소구멍 가공조건

본 연구에서는 알루미늄 성형체의 미소구멍가공에 Fig. 2 와 같은 가공장치를 사용하였다. 미소구멍 가공 장치는 0.1 μm 의 분해능을 갖는 KAIST 기계공학과에서 제작된 CNC 연삭기에 Nakanishi Inc. (Tochigiken, Japan)사의 AMS-1600 고속 에어 터빈 스피들 (High Speed Air Turbine Spindle)을 수직으로 장착하여 제작하였으며, 연삭액 (Grinding Lubricant)을 이용한 습식 구멍가공 (Wet Drilling) 방식을 적용하여 알루미늄 성형체에 미소구멍 가공을 수행하였다. 사용한 연삭액은 Yushiro Chemical Industry (Tokyo, Japan)에서 제조한 ELID NO. 35 수용성 연삭액이다. 마이크로 드릴은 1000 메시 (Mesh)의 다이아몬드 연삭입자 (Diamond abrasive)와 텅스텐 카바이드 샹크 (WC Shank)를 니켈 전착도장 (Nickel

Electro-deposition Coating)하여 결합한 일본 FSK Inc. (Nagoya, Japan)의 AAR72 다이아몬드 마이크로 드릴이며, 직경은 200 μm 이다.

가공조건은 회전속도 150,000 rpm, 이송속도 20 mm/min 이며, 수직 방향의 절삭력은 시편 밑에 장착된 공구 동력계 (Tool Dynamometer)를 이용하여 측정하였다. 공구 동력계와 앰프 (Amplifier)는 Kistler (Winterthur, Switzerland) 사의 9257B 와 5019A 이며, 회전수 측정에 사용한 회전속도계 (Tachometer) 와 광 센서 (Photo Sensor)는 Monarch Instrument (New Hampshire, USA)의 ACT 2A 와 ROS-9P 이다.

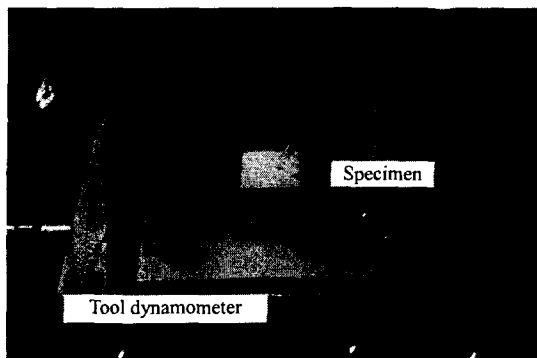
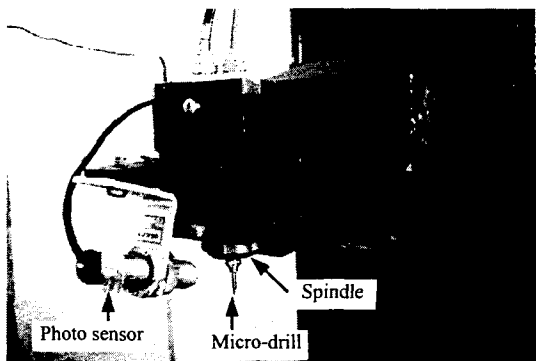


Fig. 2 Photograph of the micro-drilling machine
(a) Spindle, photo sensor and micro-drill
(b) Specimen and tool dynamometer

2.3 가공실험 및 결과

가공 깊이에 따른 절삭력 측정 결과 및 가공회수 증가에 따른 절삭력 변화는 다음과 같다.

Fig. 3 은 알루미나 성형체의 미소구멍가공 시 수직 방향의 절삭력을 가공 깊이에 따라 측정한 결과이다.

Fig. 4 는 Fig. 3 과 같은 절삭력 측정 결과들로부터

터 각 가공회수에서 평균 절삭력을 구한 후, 이를 가공회수의 증가에 따라 나타낸 그래프이다. 각 가공회수에서 절삭력 측정은 4 회 수행하였으며, 그래프는 각각 최대, 평균, 최소값을 나타낸다. 부피 제거량 (Volume of Cut)은 한번의 미소구멍가공으로 제거되는 알루미나 성형체의 부피와 가공회수의 곱으로부터 계산되며, 식(1)은 가공회수와 부피 제거량 사이의 관계를 나타낸다.

$$V_c = \pi r^2 L \times N_d \quad (1)$$

V_c : Volume of cut

r : Radius of micro-drill

L : Length of micro-hole

N_d : Number of drilling times

가공회수 증가에 따른 절삭력의 변화 경향은 다음과 같다. 부피 제거량 45 mm^3 이전에는 절삭력의 증가가 서서히 일어나지만 부피 제거량 45 ~ 50 mm^3 사이에서는 절삭력의 증가가 급격하게 일어났으며, 증가된 절삭력으로 인하여 부피 제거량 68 mm^3 에서 마이크로 드릴의 생크가 파손되었다.

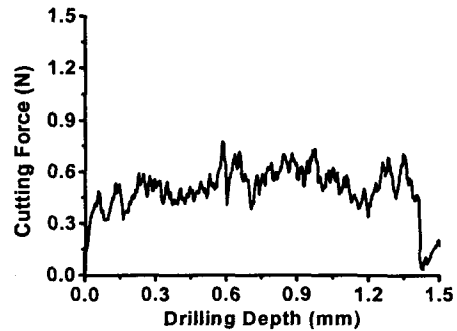


Fig. 3 Cutting force of alumina green body w.r.t. drilling depth

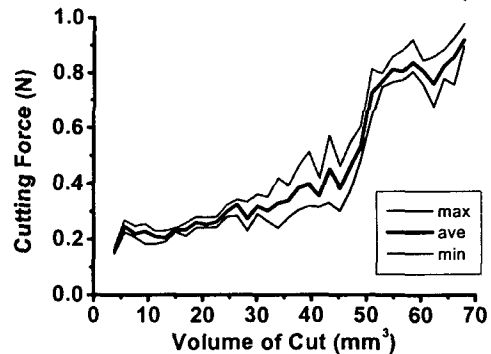


Fig. 4 Change of cutting force w.r.t. increase of drilling times

Fig. 5 는 알루미늄 성형체에 가공된 미소구멍과 소결된 미소구멍의 형상을 광학 현미경을 이용하여 촬영한 것이다. 가공된 미소구멍은 직경 210 μm 의 원형 형상을 가지며, 소결 후 183 μm 로 약 13 % 정도 길이수축이 발생하는 것을 볼 수 있다.

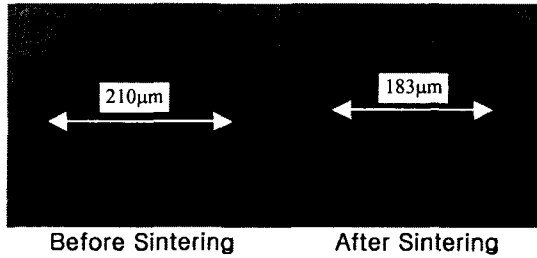


Fig. 5 Micro-hole before and after Sintering

3. 마이크로 드릴의 마모 및 공구수명

3.1 마이크로 드릴의 마모 현상

Fig. 6 는 가공회수 증가에 따른 마이크로 드릴 팁 (Tip)의 형상 변화와 절삭력 변화 사이의 관계를 파악하기 위하여 가공전의 마이크로 드릴 팁, 가공 초기 (Volume of Cut 6 mm^3)의 마이크로 드릴 팁, 절삭력의 급격한 증가가 발생한 후 (Volume of Cut 68 mm^3)의 마이크로 드릴 팁을 SEM (Scanning Electron Microscope)을 사용하여 촬영한 사진이다.

마이크로 드릴의 제조과정에서 다이아몬드 연삭 입자를 니켈 전착도장하기 때문에, 가공전 마이크로 드릴의 경우 다이아몬드 연삭입자에 니켈이 코팅되어 있어 니켈 모재 (Matrix)와 다이아몬드 연삭 입자의 구분이 어렵다. 또한, 마이크로 드릴 팁은 코팅된 니켈로 인하여 부드러운 굴곡을 갖는다. 가공초기의 마이크로 드릴 팁에서는 어두운 색을 갖는 각진 형상의 연삭입자를 볼 수 있다. 절삭력의 급격한 증가가 발생한 후의 마이크로 드릴 팁에서는 연삭입자 수의 감소로 인하여 니켈 모재만으로 이루어진 넓은 면적을 갖는 낮은 부분들이 나타나는 것을 볼 수 있다.

이러한 연삭입자 수 감소의 원인 분석을 위하여 마이크로 드릴 팁에서 가공회수 증가에 따른 연삭 입자의 형상 변화 및 높이 변화를 측정하였다.

Fig. 7 은 가공회수의 증가에 따른 마이크로 드릴 팁의 형상 변화를 광학현미경을 이용하여 촬영한 것이며, Fig. 8 은 가공회수의 증가에 따른 연삭입자의 형상 변화를 나타낸다. 초기의 연삭입자에는 입자 내의 높이 차이로 인하여 어두운 색을 갖는 경계선이 나타나지만, 가공회수가 증가할수록 마모로

인하여 연삭입자의 윗면이 평탄화 되면서 경계선이 사라져가는 것을 볼 수 있다.

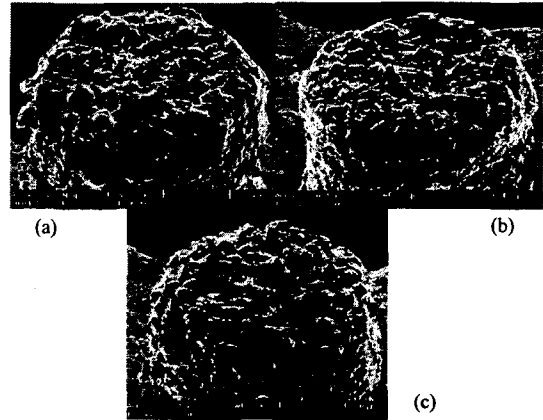


Fig. 6 SEM photograph of the micro-drill tip
(a) Fresh micro-drill tip (b) Volume of cut 6 mm^3
(c) Volume of cut 68 mm^3

Table 1 은 가공회수 증가에 따른 연삭입자의 높이 변화를 3 차원 형상기 (3-D Profiler)를 이용하여 측정한 결과이다. 1000 메시 다이아몬드 연삭 입자의 크기는 약 18 μm 의 값을 갖지만, 가공 초기인 부피 제거량 6 mm^3 의 경우를 제외하면 측정된 최대 높이는 가공회수 증가와 상관없이 약 10 μm 의 일정한 값을 유지한다. 연삭입자의 평균 높이는 증가한 후 다시 감소하는 경향을 보인다.

연삭입자의 마모에도 불구하고 연삭입자의 최대 높이가 계속적으로 줄어들지 않는 것은 연삭입자 뿐만 아니라 니켈 모재에서도 마모가 발생하기 때문이다. Fig. 9 는 연삭입자 주위의 니켈 모재에 나타난 긁힘 (Scratch)을 SEM 을 이용하여 촬영한 사진이다. 이러한 긁힘은 니켈 모재 마모의 원인으로 작용하며, 절삭면에서 생성된 알루미늄 칩 (Chip)이 연삭입자 사이의 공간을 통하여 밖으로 배출되는 과정에서 발생된다.

위와 같이 가공회수의 증가에 따라 다이아몬드 연삭입자와 니켈 모재에 마모가 발생하며, 이러한 마모가 마이크로 드릴 팁의 형상 변화 및 연삭입자 수 감소의 원인으로 작용한다.

3.2 마이크로 드릴 팁의 마모 메커니즘

세라믹 성형체의 미소구멍 가공에서 가공회수 증가에 따른 연삭입자 높이의 변화 및 절삭력의 급격한 증가를 설명하기 위한 마이크로 드릴 팁의 마모 메커니즘 모델은 Fig. 10 과 같다.

가공전의 마이크로 드릴은 Fig. 10 의 (a)와 같은 형상을 가지며, 연삭입자를 덮고 있는 코팅층은 세

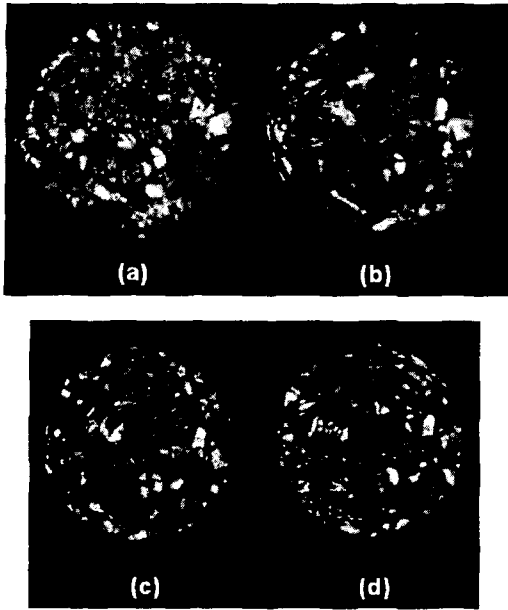


Fig. 7 Change of micro-drill tip w.r.t. drilling times
 (a) Fresh micro-drill tip (b) Volume of cut 9 mm³
 (c) Volume of cut 19 mm³ (d) Volume of cut 28 mm³

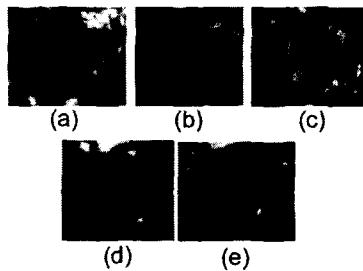


Fig. 8 wear of an abrasive w.r.t. drilling times
 (a) Fresh abrasive (b) Volume of cut 9 mm³
 (c) Volume of cut 19 mm³ (d) Volume of cut 28 mm³
 (e) Volume of cut 38 mm³

Volume of cut (mm ³)	Average height (μm)	Maximum height (μm)
0	5.3	9.4
6	5.3	7.2
28	7.3	10.0
68	4.4	9.8

Table 1 The change of abrasive height w.r.t. drilling times

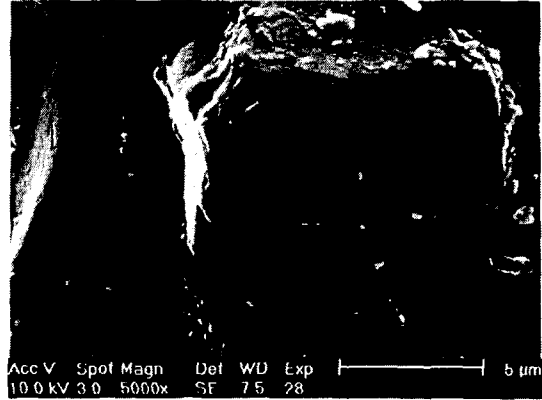


Fig. 9 SEM photograph of scratches on the matrix

라믹 성형체의 미소구멍가공 초기에 마모에 의하여 (b)와 같이 제거된다. 이 과정에서 연삭입자의 최대 높이는 Table 1 과 같이 줄어들며, 코팅층이 제거되어 연삭입자들이 표면에 나타난 후부터 안정적인 미소구멍가공 상태가 된다. (c)와 같은 안정적인 미소구멍가공 상태에서 연삭입자는 절삭면에서의 힘과 열에 의해 마모되어 각진 부분이 평탄화 되고, 이로 인하여 가공회수의 증가에 따라 절삭력이 서서히 증가하는 경향을 갖는다. 절삭면에서 생성된 세라믹 분말 형태의 칩은 연삭입자 사이의 공간을 통해 외부로 배출되고, 이때 발생하는 칩의 흐름에 의하여 모재의 마모가 발생된다. 세라믹 분말에 대한 모재와 연삭입자의 마모 중 모재의 마모량이 더 크기 때문에 연삭입자들의 전체적인 평균 높이는 증가하게 된다. 최대 높이의 경우 연삭입자를 잡고 있는 모재의 두께가 얇아져 절삭면으로부터 받는 힘을 지탱하지 못하게 되면 연삭입자가 모재로부터 제거 되기 때문에 가공회수의 증가에 관계없이 일정한 값을 유지한다. (d)와 같이 가공회수가 증가하여 모재의 마모가 과도하게 일어나면 제거되는 연삭입자의 양이 급격히 증가하게 되고, 이로 인하여 절삭력의 급격한 증가가 발생하게 된다. 다수의 연삭입자가 제거되면 높은 연삭입자에 대한 낮은 연삭입자의 비가 늘어나게 되므로 연삭입자의 평균 높이는 감소하게 된다.

Fig. 10 과 같은 마모 메커니즘에 의하여 Table 1 및 Fig. 4 의 측정결과를 잘 설명할 수 있으며, 따라서 공구의 수명은 연삭입자의 수가 급격히 감소되기 전인 절삭력의 급격한 증가가 시작되는 점까지이다.

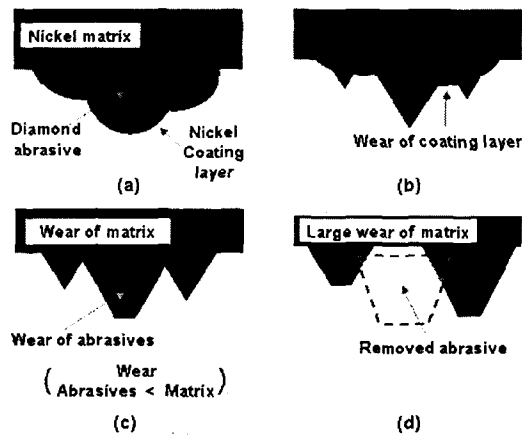


Fig. 10 Wear model on the micro-drill tip during micro-drilling of ceramic green body
 (a) Fresh micro-drill tip (b) Removal of coating layer
 (c) Stable state of micro-drilling (d) Removal of abrasives

4. 결론

알루미나 성형체에 회전속도 150,000 rpm, 이송속도 20 mm/min 의 가공조건으로 다이아몬드 연삭 입자를 WC 생크에 니켈 전착도장하여 결합시킨 직경 200 μm 의 마이크로 드릴을 사용하여 미소구멍 가공을 수행하면서 가공회수 증가에 따른 절삭력 변화를 측정하였다. 이로부터 가공회수 증가에 따라 절삭력이 급격히 증가하는 구간이 나타나는 것을 볼 수 있었다.

절삭력 증가는 마이크로 드릴 팁의 마모와 관련되며, 세라믹 성형체의 미소구멍 가공은 일반적인 연삭 가공과 달리 세라믹 분말 형태의 칩 유동에 의한 모재의 마모가 연삭 입자의 마모와 함께 발생되었다. 마이크로 드릴은 연삭 입자들이 단층으로 되어 있기 때문에 연삭 입자가 팁으로부터 제거되면 연삭 휠 (Grinding wheel)과 달리 새로운 연삭 입자가 팁 표면에 드러나지 않았고, 이로 인하여 연삭 입자 수의 감소는 절삭력의 증가로 이어졌다. 따라서, 절삭력의 급격한 증가는 연삭 입자 수의 급격한 감소가 원인이며, 공구의 수명은 절삭력의 급격한 증가가 발생하기 전까지이다.

회전속도 150,000 rpm, 이송속도 20 mm/min 에서 에폭시 결합제를 사용한 알루미나 성형체의 미소구멍가공 시 다이아몬드 연삭 입자를 니켈 전착도장하여 텅스텐 카바이드 생크에 결합시킨 마이크로 드릴의 공구수명은 부피 제거량 45 mm³ 이다.

1. Tuersley, I. P., Jawaid, A., and Pashby, I. R., "Review : Various methods of machining advanced ceramic materials," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 42, pp.377-390, 1994.
2. Imen, K., and Allen, S. D., "Pulse CO₂ Laser Drilling of Green Alumina Ceramic," *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, Vol. 22, No. 4, pp.620-623, 1999.
3. Kumar, D. B. R., Reddy, M. R., Mulay, V. N., and Krishnamurti, N., "Acrylic co-polymer emulsion binders for green machining of ceramics," *European Polymer Journal*, Vol. 36, pp.1503-1510, 2000.
4. Wu, X. L. K., and McAnany, W. J., "Acrylic Binder for Green Machining," *American Ceramic Society Bulletin*, Vol. 74, No. 5, pp.61-64, 1995.
5. Doreau, F., Tari, G., Guedes, M., Chartier, T., Pagnoux, C., and Ferreira, J. M. F., "Mechanical and Lamination Properties of Alumina Green Tapes Obtained by Aqueous Tape-casting," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 19, pp. 2867-2873, 1999.
6. Besshi, T., Sato, T., and Tsutsui, I., "Machining of alumina green bodies and their dewaxing," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 95, pp.133-138, 1999.
7. Maier, H. R., and Michaeli, N., "Green Machining of Alumina," *Key Engineering Materials*, Vols. 132-136, pp. 436-439, 1997.