

MCP 제조를 위한 미소구멍가공에 관한 연구

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

Micro-drilling for fabricating MCP

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

ABSTRACT

An MCP (Microchannel Plate) is a secondary electron multiplier to detect and amplify electrons. An MCP has many microchannels whose diameters range from 10 to 100 μ m and whose lengths range from 40 to 100times of the diameter. Each microchannel of the MCP amplifies electrons over 1000times by the secondary electron emission. Even though MCPs have high performance for electron amplification, the application of MCPs is limited to high performance electronic equipments because of their high fabricating cost and the limit of increasing their size due to the conventional fabrication process. Therefore, in this work, microchannels of the MCP are manufactured by micro-drilling to reduce the cost of the MCP and to increase their size. Alumina green body with epoxy binder was machined for fabricating microchannels using a high speed air turbine spindle and micro-drills with diamond grinding abrasives. Then alumina MCP was fabricated through the sintering of the machined alumina green body.

Key Words : MCP (미소채널 플레이트), Micro-drilling (미소구멍가공), Alumina green body (알루미나 그린 바디), Sintering (소결)

1. 서론

MCP (Microchannel Plate)는 지름 10 ~ 100 μ m 를 갖는 다수의 미소채널로 이루어져 있으며, 각각의 채널은 연속적인 이차 전자 방출을 통하여 전자의 수를 1000 배 이상 증폭시킨다. 미소채널의 길이는 직경의 40 ~ 100 배이며, 직경에 대한 길이의 비율 (L/D)은 미소채널의 전자 증폭비에 영향을 준다 [1].

기존의 MCP 제조 방법은 다음과 같다. 에칭 (Etching)이 되는 코어 유리섬유 (Core Glass Fiber)와 에칭이 되지 않는 채널 유리섬유 (Channel Glass Fiber)를 조합한 후, 여러 번의 인발 (Drawing) 작업을 통하여 코어 유리섬유의 직경을 줄이고, 직중 및 집합 작업을 통하여 유리 섬유 다발을 만든다. 이 유리 섬유 다발을 얇게 자르고 (Slicing), 연마 (Polishing)하여 웨이퍼 (Wafer)로 만들고, 웨이퍼를 에칭하여 코어 유리섬유를 제거한 후, 웨이퍼의 윗면과 아래면에 전극을 붙이면 MCP 제조가 완료된다. 이와 같은 기존의 방법으로 제조된 MCP 는 유

리 섬유의 인발 작업 및 에칭의 어려움으로 인하여 가격이 높고 대면적 MCP 의 제조가 어렵기 때문에 MCP 의 응용은 고성능의 전자 장비에 국한되었다.

MCP 제조에 적용이 가능한 미소채널 제조 방법은 일부 연구가 수행되었으며, 수행된 연구를 요약하면 다음과 같다. Liu, R. H. 등 [2]은 LIGA (In German : Lithographie, Galvanoformung, Abformung)를 이용하여 유리에 미소구조를 만드는 방법에 대하여 연구를 수행하였으며, Bossel, M. 등 [3]은 포토플라스틱 (Photo-plastic)을 이용하여 미소채널을 제조하는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 하지만, 이러한 미소채널 제조 방법들을 응용한 MCP 제조 방법들은 기존의 MCP 제조단가를 크게 낮추지는 못하였으며 대면적 MCP 제작이 어려운 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 MCP 제조단가를 낮추고 대면적 MCP 의 제조를 가능하게 하기 위하여 미소구멍가공 방법을 이용하고자 한다. 피삭재 (Workpiece)인 MCP 의 재료는 부도체이고, 채널 표면에는 MgO, SiO₂, K 등과 같은 이차전자 방출 물질이 코팅

(Coating)되어야 하기 때문에 MCP의 소재는 최소 400 °C 이상의 고온에서 견딜 수 있는 세라믹 재료가 적합하다 [4,5]. 하지만, 높은 경도, 낮은 열전도도 및 취성을 가지는 세라믹 재료는 난삭재이기 때문에 세라믹 분말 (Powder)과 고분자 결합재 (Polymer Binder)의 혼합물인 알루미늄 그린 바디 (Green body)를 MCP 제조를 위한 미소구멍가공의 피삭재로 선정하였다 [6].

세라믹 그린 바디의 물성 및 가공에 관하여 수행된 연구를 요약하면 다음과 같다. Kumar, D. B. R. 등 [7]은 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. Maier, H. R. 등 [9]은 알루미늄 그린 바디의 선반 가공 실험을 통하여 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이의 변화에 따른 표면 거칠기 변화에 대하여 연구를 수행하였다. Imen, I. 등 [10]은 CO₂ laser를 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 그린 바디의 물성 및 가공에 관한 다수의 연구들이 수행되었지만, 주로 일반적인 절삭가공에서 결합재가 미치는 영향에 대한 연구들만이 수행되었고, 그린 바디의 미소구멍가공에 관한 연구는 미미한 실정이다. 또한, 다수의 연구들은 절삭가공에 적절한 고분자 결합재로 열가소성수지 (Thermoplastic)를 제안하고 있지만, 미소구멍가공의 경우에는 가공면에서 열가소성 수지 결합재가 절삭열에 의하여 녹은 후, 열가소성 수지가 공구에 붙어 눈매움 (Loading)이 발생하게 된다. 따라서, 그린 바디 미소구멍가공의 경우에는 일반가공과는 다른 적절한 결합재의 선정이 필요하다. 또한, MCP의 생산성을 높이기 위해서는 이송속도를 높이고 공구 수명을 늘려야 하므로, 이송속도가 알루미늄 그린 바디의 미소구멍가공에 미치는 영향과 가공 조건에 따른 마이크로 드릴 (Micro-drill)의 수명예측에 대한 연구가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 열경화성수지 (Thermoset)인 에폭시 (Epoxy)를 고분자 결합재로 사용하여 알루미늄 그린 바디를 제조하였고, 제조된 알루미늄 그린 바디에 미소구멍가공을 하여 이송속도 증가에 따른 절삭력의 변화를 측정하였으며, 공구 수명을 예측하기 위한 기초 데이터를 마련하기 위하여 다이아몬드 연삭 입자 (Diamond Grinding Abrasive)가 접촉된 직경 0.2 mm의 마이크로 드릴을 사용하여 이송속도 20 mm/min, 절삭속도 1.6 m/s 가

공조건에서 부피 제거량에 따른 절삭력의 변화를 측정하였다.

2. 미소구멍가공

2.1 시편

시편의 재료인 알루미늄 그린 바디는 알루미늄 분말과 고분자 결합재의 혼합물이며, 알루미늄 그린 바디의 강도는 결합재의 종류에 따라 달라지고 일반적으로 10 MPa 이하의 낮은 값을 갖는다 [8]. 열경화성수지 결합재는 알루미늄 그린 바디의 소결시 결합재 제거가 어려운 단점이 있지만 본 실험에서 사용한 시편의 두께는 1.5mm로 얇기 때문에 결합재의 제거가 용이하다. 따라서 본 연구에서는 기계적 성능이 우수하고 점도가 낮은 주물용 (casting) 에폭시를 고분자 결합재로 선정하여 알루미늄 그린 바디를 제조하였다. 본 연구에서 사용한 알루미늄 분말은 일본 스미토모 (Sumitomo)사에서 제조된 평균입자크기 0.5 μm, 순도 99.99 %인 AKP-20이며 에폭시 결합재는 세풍폴리머에서 제조된 주물용 (Casting) 에폭시 수지 SK-3060A 와 경화제 SK-3060B 이다.

시편의 형상은 미소채널의 배열과 마이크로 드릴의 길이를 고려하여 폭 30mm, 길이 30mm, 두께 1.5mm로 결정하였으며, 알루미늄과 에폭시 결합재의 혼합비는 공구로 사용되는 다이아몬드 연삭 입자가 접촉된 마이크로 드릴의 특성을 고려하여 일반적으로 사용되는 연삭과 구멍가공의 혼합비 사이 값인 95 wt% : 5 wt% (부피분율 85 : 15)로 결정하였다 [8].

알루미늄 그린 바디의 제조에 사용된 에폭시 결합재는 알루미늄 분말에 비해서 사용량이 적고 직접 혼합하기에는 점도가 너무 높기 때문에 에폭시 결합재를 아세톤에 녹인 후, 알루미늄 분말과 혼합하였다. 소결이 잘 이루어지는 최소한의 알루미늄 그린 바디의 밀도를 얻기 위하여 밀도가 서로 다른 알루미늄 그린 바디의 소결 실험을 수행하였고 실험결과로부터 알루미늄 그린 바디의 알루미늄에 대한 상대밀도 65 %를 얻었다. 이로부터 알루미늄 그린 바디 시편의 상대밀도를 65 %로 결정하였으며, 시편제조 시 30mm × 30mm 사각금형에 압축력을 가하여 알루미늄-에폭시 혼합물의 밀도 65 %까지 증가시켰다. 압축된 알루미늄-에폭시 혼합물의 경화는 오토클레이브 (Autoclave) 내에서 90 °C 에서 30 분간 유지시켜 아세톤을 제거한 후, 120 °C 에서 2 시간동안 유지시켰다 <Fig. 1>.

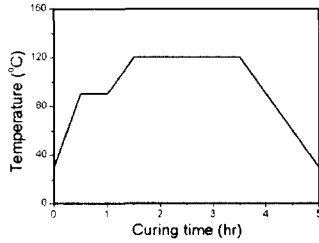


Fig. 1 Curing cycle for alumina green body

2.2 가공조건

본 연구에서는 $0.1 \mu\text{m}$ 의 분해능을 갖는 KAIST 기계공학과에서 제작된 수평형 CNC 연삭기에 일본 NSK (Nakanishi Inc.)사의 AMS-1600 고속 에어 터빈 스피들을 수직으로 장착하여 제작된 미소구멍가공 장치와 습식 구멍가공 (Wet Drilling) 방식을 적용하여 알루미늄 그린 바디에 미소구멍가공을 하였다. 연삭액은 YUSHIRO 화학사의 ELID NO. 35 수용성 연삭액을 사용하였으며, 마이크로 드릴은 1000 메시 (Mesh)의 다이아몬드 입자가 접착된 일본 FSK Inc.의 AAR72 다이아몬드 마이크로 드릴을 사용하였다.

본 연구에서 사용한 고속 에어 터빈 스피들은 회전속도 감소에 따른 파워의 감소가 크기 때문에 스피들의 안정적인 최고 회전속도인 $150,000 \text{ rpm}$ 으로 고정하여 미소구멍가공 실험을 수행하였다. 이송속도 증가에 따른 절삭력 변화를 측정하기 위한 실험은 절삭속도 1.6 m/s , 이송속도 $20 \sim 60 \text{ mm/min}$ 의 가공조건에서 수행하였으며, 공구수명 예측을 위한 기초 데이터를 마련하기 위하여 절삭속도 1.6 m/s , 이송속도 20 mm/min 의 가공조건에서 마이크로 드릴의 파손이 일어날 때까지 미소구멍가공을 수행하였다. 각 실험에서 절삭력은 공구동력계 (Tool Dynamometer)를 이용하여 측정하였으며, 마이크로 드릴 및 가공된 미소구멍의 형상은 SEM 과 광학현미경을 이용하여 촬영하였다.

2.3 실험결과

절삭속도 1.6 m/s , 이송속도 $20 \sim 60 \text{ mm/min}$ 의 가공조건에서 이송속도 증가에 따른 절삭력 변화를 측정된 결과는 다음과 같다.

Fig. 2은 에폭시 결합재 (5wt%)를 사용한 알루미늄 그린 바디의 미소구멍 가공에서 이송속도 변화에 따른 절삭력 변화를 나타내며, 그래프에서 원형으로 표시된 값은 각각의 이송속도에서 4번 측정된 절삭력 값의 평균값이다. Fig. 2에서 절삭력은 이송속도의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3은 $10 \sim 60 \text{ mm/min}$ 의 각기 다른 이송속도로 가공된 미소구멍의 직경과 형상을 나타내며, 표시된 직경은 각 이송속도마다 10개의 미소구멍 직경을 측정하여 평균한 값이다. 미소구멍들의 직경은 이송속도에 관계없이 일정한 값을 갖으며, 가공면에서 생성된 알루미늄 분말 칩이 미소채널 밖으로 배출되는 과정에서 발생하는 미소채널 벽의 마모로 인하여 마이크로 드릴 직경의 측정값 $190 \mu\text{m}$ 보다 약 $20 \mu\text{m}$ 큰 $210 \mu\text{m}$ 정도의 값을 갖는다.

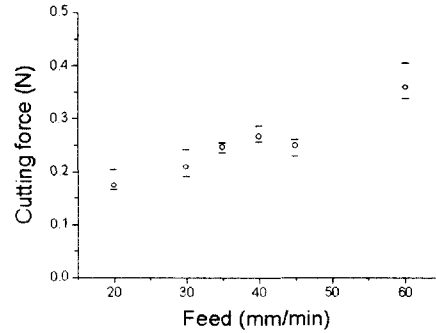


Fig. 2 Cutting force of alumina green body w.r.t. feed

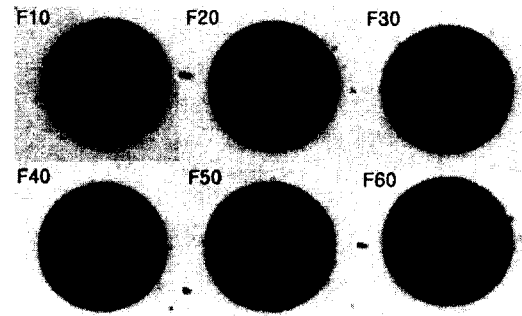


Fig. 3 Micro-hole size of alumina green body according to feed

절삭속도 1.6 m/s , 이송속도 20 mm/min 의 가공조건에서 마이크로 드릴의 파손이 일어날 때까지 부피 제거량 증가에 따른 절삭력을 측정된 결과는 다음과 같다.

Fig. 4는 마이크로 드릴의 파손이 일어날 때까지 부피 제거량 증가에 따른 절삭력의 변화를 나타낸다. Fig. 4에서 부피 제거량 49 mm^3 이전에는 절삭력이 선형적으로 증가하는 경향을 보이며, 부피 제거량 49 mm^3 이후에는 절삭력이 급격히 증가하여 부피 제거량 68 mm^3 에서 마이크로 드릴의 파손이 발생하였다.

Fig. 5은 각각 부피 제거량 $6, 28, 34, 49, 60 \text{ mm}^3$ 에서 측정된 절삭력을 차단주파수 (Cutoff Frequency) 3 Hz 로 저주파 필터링 (Low Pass Filtering)한 그래프이

다. Fig. 5의 그래프에서 약 2초부터 6초까지는 알루미늄 그린 바디 시편 가공시 측정된 절삭력이며 6초 이후는 알루미늄 그린 바디 시편의 관통 후 시편 뒤쪽에 위치한 알루미늄 그린 바디 판 (Backup Plate)를 가공하면서 측정된 절삭력이다. 부피 제거량 34 mm^3 이전의 절삭력 그래프는 서로 비슷한 경향을 가지며 부피 제거량 증가에 따른 절삭력의 증가가 작게 나타나지만, 부피 제거량 49 mm^3 이후의 절삭력 그래프는 눈베움 (Loading) 발생에 의하여 절삭력 변화가 심하며 부피 제거량 증가에 따른 절삭력 증가가 크게 나타난다. 부피 제거량 34 mm^3 이후부터 나타나는 가공 시작부분의 절삭력 피크 (Peak)는 부피 제거량 증가에 따라 큰 폭으로 증가하며 마이크로 드릴의 파손이 일어나는 부근에서 최대 3 N 까지 증가한다.

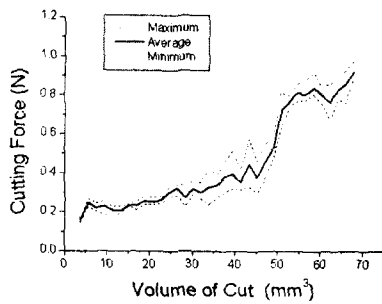


Fig. 4 Cutting force of alumina green body w.r.t. volume of cut

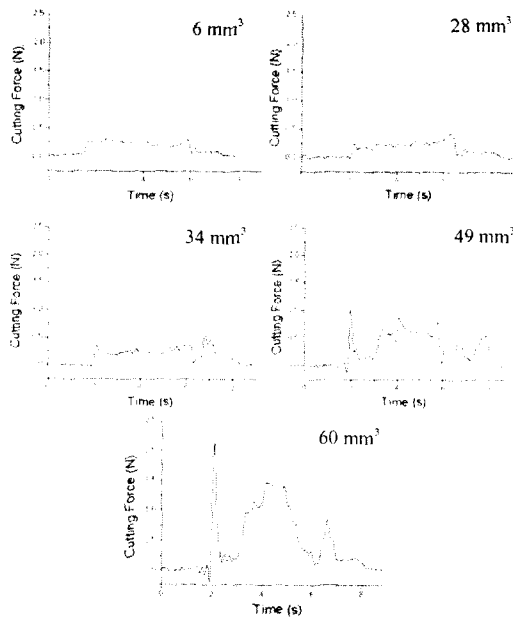


Fig. 5 The shape of cutting force w.r.t. volume of cut

Fig. 6는 사용하지 않은 마이크로 드릴 팁 (Tip) 과 절삭속도 1.6 m/s , 이송속도 20 mm/min 의 가공조건에서 6 mm^3 까지 가공한 마이크로 드릴 팁 및 같은 가공조건에서 68 mm^3 까지 가공한 마이크로 드릴 팁을 45° 각도에서 SEM을 이용하여 촬영한 사진이다. 사용하지 않은 마이크로 드릴 팁은 대부분의 다이아몬드 연삭 입자들이 니켈로 코팅 (Coating)되어 둥근 형상을 갖지만 가공 후에는 다이아몬드 연삭 입자들의 형상이 나타난다. 부피 제거량이 증가할수록 니켈 모재 (Matrix)의 마모량도 증가되어 다이아몬드 연삭 입자의 높이가 높아지며, 마이크로 드릴 팁의 모서리 (Edge) 부분과 중심 부분의 선 속도 차이에 의한 니켈 모재의 마모량 차이로 인하여 마이크로 드릴 팁의 모서리부분이 둥근 형상을 갖게 된다. 니켈 모재의 마모는 알루미늄 분말 칩의 유동에 의하여 일어나며, Fig. 7은 다이아몬드 연삭 입자 주위의 니켈 모재에 나타난 긁힘 자국 (Scratch)으로 칩 유동에 의한 니켈 모재 마모시 발생한 것이다.

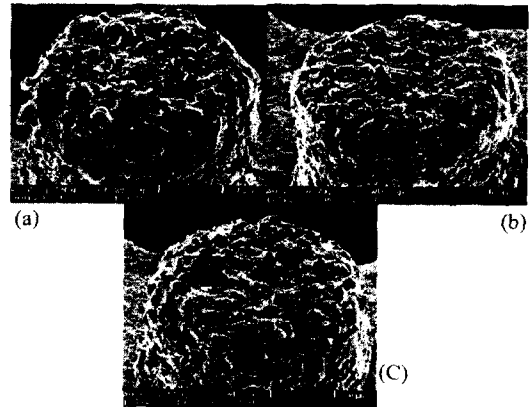


Fig. 6 SEM photograph of the micro-drill tip Volume of cut : (a) 0 mm^3 , (b) 6 mm^3 , (c) 68 mm^3

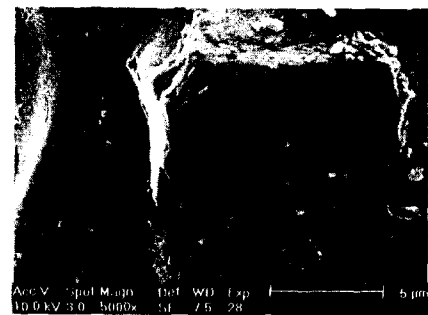


Fig. 7 SEM photograph of the scratch on the nickel matrix

이러한 실험결과들로부터 절삭력의 급격한 증가가 나타나는 부피 제거량을 공구의 수명으로 간주할 수 있으며, 절삭속도 1.6 m/s, 이송속도 20 mm/min의 가공조건에서 1000 메시 다이아몬드 연삭 입자가 접촉된 직경 0.2 mm 마이크로 드릴의 공구 수명은 부피 제거량 49mm³가 된다.

3. 소결

3.1 소결 사이클

일반적으로 세라믹 분말의 소결은 표면에너지(Surface Energy)가 다른 두 결정면이 접촉했을 때, 높은 표면에너지를 갖는 면으로부터 낮은 표면에너지를 갖는 면으로 에너지가 흐르면서 세라믹 입자가 재결정화(Recrystallization)되는 현상으로 녹는점(Melting Point)의 75 %부근에서부터 일어나며, 소결 후 길이의 수축이 발생한다 [11]. 알루미늄 그린 바디의 소결 시에 에폭시 결합재가 완전히 제거되지 않으면 에폭시 탄화물이 알루미늄 분말의 재결정화를 방해하게 되므로, 알루미늄 그린 바디의 소결은 완전한 에폭시 결합재의 제거를 위하여 소결온도 이전의 고온에서 장시간 유지시키는 과정을 포함한다. 본 연구에서 알루미늄 그린 바디는 800 °C에서 2 시간 유지시켜 에폭시 결합재를 제거한 후, 1500 °C에서 3 시간 유지시켜 알루미늄 분말을 소결시키는 Fig. 8 과 같은 소결 사이클(Sintering Cycle)을 사용하여 알루미늄 판(Plate)으로 제조하였다.

3.2 실험결과

소결된 알루미늄 판의 밀도는 알루미늄 밀도 3970 kg/m³의 96 %값인 3820 kg/m³으로 측정되었다. Fig. 9 는 소결 전후의 미소구멍 형상을 광학현미경을 이용하여 촬영한 것으로, 소결 전 미소구멍의 직경은 210 μm 였으나 소결 후, 평균 13 % 감소하여 183 μm 로 측정되었다.

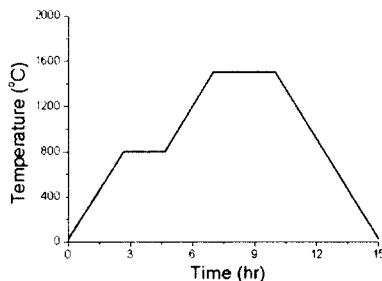
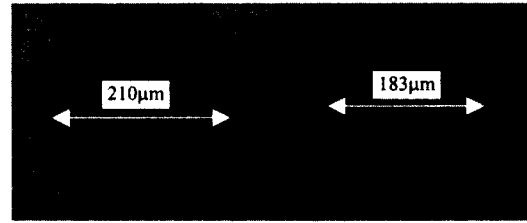


Fig. 8 Sintering cycle for alumina green body



Before Sintering After Sintering

Fig. 9 Micro-hole before and after Sintering

4. 결론

본 연구에서는 알루미늄 그린 바디의 미소구멍 가공을 이용하여 MCP의 미소채널을 제조하였다. 실험에 적용한 미소구멍가공 방식은 습식 구멍가공이며, 1000 메시의 다이아몬드 연삭 입자가 접촉된 직경 0.2mm의 마이크로 드릴을 사용하여 절삭속도 1.6 m/s, 이송속도 20 ~ 60 mm/min의 가공조건에서 알루미늄 그린 바디에 미소구멍을 가공하였다. 이송속도 및 가공부피에 따른 절삭력 변화는 공구동력계를 사용하여 측정하였고, 니켈 모재의 마모에 의한 공구 형상 변화는 SEM을 이용하여 측정하였다. 소결전후 알루미늄 그린 바디에 가공된 미소구멍의 형상 변화는 광학현미경을 이용하여 측정하였으며, 측정된 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

에폭시 결합재를 5 wt% 사용한 알루미늄 그린 바디는 이송속도의 증가에 따라 절삭력이 선형으로 증가하며, 60mm/min 이내의 이송속도에서 절삭력은 좌굴하중의 6 %보다 작은 값을 갖는다. 절삭속도 1.6 m/s, 이송속도 20 mm/min의 가공조건에서 1000 메시 다이아몬드 입자가 접촉된 직경 0.2 mm 마이크로 드릴의 절삭력은 부피 제거량 49 mm³ 부터 급속히 증가하며, 이 부피 제거량이 마이크로 드릴의 공구수명이 된다. 알루미늄 그린 바디에 가공된 미소구멍의 직경은 소결을 통하여 평균 13 % 감소시킬 수 있으며, 직경 0.2 mm 마이크로 드릴로 가공할 경우 직경 183 μm의 미소채널 제조가 가능하다.

참고문헌

1. Wiza, J. L., "Microchannel Plate Detectors," *Nuclear Instruments and Methods*, Vol. 162, pp.587-601, 1979.
2. Liu, R. H., Vasile, M. J., and Beebe, D. J., "The Fabrication of Nonplanar Spin-On Glass Microstructures," *Journal of Microelectro-mechanical Systems*, Vol. 8, No. 2, pp.146-151, 1999.
3. Bossel, M., Guérin, L. J., Demierre, M., and

- Calmes, S., "Simple and Low Cost Fabrication of Embedded Microchannels By Using a New Thick-Film Photoplastic," *International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, pp.1419-1422, 1997.
4. Siddiqui, S. H., "An investigation of active surfaces of microchannel plates using Auger electron and ESCA spectroscopic techniques," *Journal of Applied Physics*, Vol. 48, No.7, pp.3053-3059, 1977.
 5. Kweon, H. J., Kim, S. J., and Park, D. G., "Modification of $\text{Li}_x\text{Ni}_{1-y}\text{Co}_y\text{O}_2$ by applying a surface coating of MgO," *Journal of Power Sources*, Vol. 88, pp.255-261, 2000.
 6. 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.
 7. 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.
 8. 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.
 9. Maier, H. R., and Michaeli, N., 1997, "Green Machining of Alumina," *Key Engineering Materials*, Vols. 132-136, pp. 436-439, 1997.
 10. Imen, K., and Allen, S. D., "Pulse CO_2 Laser Drilling of Green Alumina Ceramic," *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, Vol. 22, No. 4, pp.620-623, 1999.
 11. Richerson, D. W., "Oxide Ceramics," *Academic Press*, pp.45-46, 1985.