

저 출력 레이저를 이용한 다이아몬드 후막의 절단

박영준 · 백영준

한국과학기술연구원 박막기술연구센터
(1999년 12월 7일 접수)

Laser Cutting of Thick Diamond Films Using Low-Power Laser

Young-Joon Park and Young-Joon Baik

Thin Film Technology Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea

(Received December 7, 1999)

초 록

저 출력의 구리증기레이저를(10 W) 이용하여 다이아몬드 후막의 절단을 연구하였다. 레이저 가공에는 포화깊이가 존재하여, 후막의 가공이 제한된다. 본 연구에서는 이러한 포화깊이를 증가시키기 위하여 저 열전달 밀판 및 가열 밀판을 사용하여 레이저 에너지의 방출을 감소시킴으로 가공 포화 깊이를 증가시키려 하였다. 저 열전달 밀판으로는 알루미나가 사용되었으며, 가열 밀판은 500°C까지 가열하였다. 알루미나 밀판을 사용한 경우 가공효의 종횡비가 3.5에서 7로 약 2배 증가하여, 같은 가공폭에 대하여 2배 정도 가공깊이가 증가하였다. 가열 밀판을 사용한 경우에는 가열 온도가 증가할수록 가공깊이가 증가하였으며, 400°C 이상에서는 10 이상의 종횡비가 얻어져서, 포화 가공 깊이의 상당한 증가를 얻었다. 이러한 결과는, 부가적인 레이저 장치의 개선 없이, 다이아몬드 막을 올려놓는 밀판만을 개선함으로써 가공효율을 향상시켜서, 저 출력의 레이저로 후막의 가공이 가능함을 의미한다.

ABSTRACT

Laser cutting of thick diamond films is studied using a low-power(10 W) copper vapor laser. Due to the existence of the saturation depth in laser cutting, thick diamond films are not easily cut by low-power lasers. In this study, we have adopted a low thermal-conductivity underlayer of alumina and a heating stage (up to 500°C in air) to prevent the laser energy from consuming-out and, in turn, enhance the cutting efficiency. Aspect ratio increases twice from 3.5 to 7 when the alumina underlayer used. Adopting a heating stage also increases aspect ratio and more than 10 is obtained at higher temperatures than 400°C. These results show that thick diamond films can be cut, with low-power lasers, simply by modifying the thermal property of underlayer.

Key words : Laser cutting, Diamond films, Copper vapor laser

1. 서 론

다이아몬드의 우수한 기계적, 물리적, 화학적 성질을 이용하여,¹⁾ 이를 적외선 창(infrared window),^{1,3)} MCM(multi chip module) 용 열전달재(thermal spreader),^{1,2,4)} 절삭공구^{1,2,5)} 등으로 이용하려는 연구가 진행되고 있다. 화학기상증착법으로 합성된 웨이퍼 형태의 다이아몬드 막을 이러한 용도로 사용하기 위해서는 합성된 다이아몬드 막의 표면을 연마하고 이를 원하는 모양으로 가공하여야 한다. 그러나 다이아몬드는 잘 알려진 대로, 매우 큰 경도와 화학적 안정성¹⁾ 때문에 기존의 기계적 접촉식 가공법으로는 가공이 어렵다. 이러한 관점에서 레이저를 이용한 다이아몬드 막의 가공은 매우 유망한 방법으로 인식되고 있으며, 많은 연구가 진행되고 있다.⁶⁻¹³⁾

레이저에 의하여 다이아몬드막이 가공되는 기구에는 크게 두 가지가 있다. 레이저 빔이 펄스인 경우, 충분히 큰 피크

파워에 의해서 다이아몬드가 승화되는 기구와 연속빔인 경우, 탄소의 산화에 의한 기구가 있다.⁹⁾ 레이저를 이용하여 다이아몬드와 같이 열전도도가 매우 크고 승화 온도가 매우 높은 재료를 가공하기 위해서는 짧은 시간에 빛에너지를 집중적으로 조사하여 다이아몬드를 승화점 이상으로 승온할 수 있는 펄스 형 레이저가 적합하다. 지금까지 다이아몬드 가공에 사용되는 레이저에는 구리증기(copper vapor) 레이저,^{7,9)} Nd:YAG 레이저,⁸⁾ 엑시머(eximer) 레이저^{6,10)} 등이 있는데 이들은 모두 펄스 형으로써 비교적 작은 평균 출력의 레이저 빔으로도 순간적인 조사를 통하여 다이아몬드를 가공할 수 있다.

그러나 다이아몬드 막의 레이저 가공에는, 레이저의 과장 및 파워 등이 결정되면 그 레이저로 가공할 수 있는 다이아몬드 막의 포화두께가 존재하여 그 이상의 가공은 불가능하다. 즉 주어진 레이저 조건에서 주사 반복수를 아무리 크게 하여도 가공되는 깊이는 포화되고 더 이상 증가하지 않는다.

레이저 가공 두께가 제한되는 현상의 원인으로서는, 제한된 레이저 초점 심도, 절단 입구에서의 레이저 빔 차단, 가공 표면에 형성된 플라즈마에 의한 레이저 빔 흡수¹¹ 등이 제시되었다.

일반적으로 레이저 가공을 위하여 평행한 레이저 빔을 렌즈를 이용하여 초점을 형성한다. 이때 초점이 형성된 구간이 초점심도이다. 만일 초점심도보다 더 깊이 가공된 경우에는 레이저 빔이 발산하여 레이저의 에너지 밀도가 급격히 저하되어 가공되지 않는다. 이러한 경우에는 적당한 간격으로 레이저의 초점 위치를 이동하여 피가공물의 표면에 계속 초점을 형성시킴으로 어느 정도 포화 깊이를 증가시킬 수 있다.

그러나 초점 위치를 가공 중에 변화시킨다 하여도 들쭉과 셋째 원인들에 의하여 포화두께는 여전히 존재한다. 레이저에 의하여 표면이 절단되는 경우 매우 작은 폭의 골이 형성되면서 깊이가 깊어지게 되는데 이때 골 입구의 폭이 초점이 형성되기 전의 넓은 폭의 레이저를 다 통과시키지 못하고 차폐하게 된다. 따라서 초점이 형성되어 계속 가공되어야 하는 골 바닥에 도달하는 레이저 에너지가 저하된다. 또한 피가공물의 표면에는 그 주위의 분위기 및 피가공물의 기화물들이 레이저를 흡수하여 플라즈마를 형성할 수 있는데, 이 경우에도 레이저 빔을 차폐하거나 굴절시켜서 골 바닥에 도달하는 레이저 에너지는 감소한다. 따라서 초점의 이동에도 불구하고 가공 두께는 포화된다.

따라서 가공포화 깊이를 증가시키기 위해서는 큰 출력의 레이저를 사용하여 가공 폭을 증가시키거나 적당한 방법을 이용하여 가공 중 표면에 발생하는 플라즈마를 제거하여 주어야 한다. 그러나 큰 출력의 레이저를 사용하는 경우 가공 중 재료의 손실이 과다하게 되고, 가공 품질이 저하될 수 있으며, 상당한 부대 비용이 필요하여 바람직하지 못하다.

본 연구에서는 작은 출력의 레이저를 이용하여 가공 포화 깊이를 증가시키는 방법에 대하여 연구하였다. 표면에 면적을 형성하는 방법으로 중복 조사를 하게 되면 넓은 가공 폭이 얻어지는데, 이때 증가하는 가공 깊이를 조사하였다. 중복 조사를 하는 경우에는 작은 출력의 레이저로도 큰 절단 폭을 얻을 수 있어서 레이저 입사의 차폐를 억제할 수 있어서 상당한 두께의 다이아몬드 막을 절단하는 것이 가능할 것으로 예상된다. 그러나 중복 조사를 위해서는 상당한 시간이 필요하여 효율적인 다이아몬드 후막의 가공이 불가능하다 따라서 본 연구에서는 짧은 시간 안에 효율적으로 다이아몬드 후막을 가공할 수 있는 새로운 방법으로 저 열전달 밀판 및 가열 밀판을 사용하는 경우 포화 가공 깊이가 증가하는지를 연구하였다. 레이저 가공이 본질적으로 열 공정이라는 점에 착안하여, 레이저로 공급된 에너지가 가공이외의 열로 방출되는 것을 줄일 경우, 가공 효율이 높아져서 포화 가공 깊이가 증가할 것으로 예상된다.

2. 실험방법

다이아몬드 막 가공에는 구리증기레이저가 사용되었고(Mechatron, CVL-10), 그 제원은 다음과 같다: 평균파워 : 10 W, 반복주파수 : 16 kHz, 펄스길이 : 20 ns, 파장 : 510.6 nm(60%), 578.2 nm(40%), 레이저 빔 크기 : 14 mm, 불안정 공진기(unstable resonator). 주사속도는 0.2, 0.25 mm/sec이었고, 주사반복수는 4, 8, 10회로 달리하였다. 절단 폭을 증가시키기 위한 중복조사에서는 약 50 μm 씩 옆으로 빔을 이동하면서 원하는 절단 폭을 형성하였다. 그리고 가공 중 제한된 초점심도에 의한 가공깊이의 포화를 막기 위하여 레이저 빔의 초점 위치를 아래 방향으로 내리는 경우에는, 한번에 375 μm 씩 이동하였다.

저 열전달 밀판으로는 두께 5 mm의 알루미늄이나 사각 판이 사용되었다. 알루미늄 밀판이 사용되지 않을 때에는 알루미늄 재질의 스테이지 위에 실리콘 웨이퍼를 부착하고, 그 위에 다이아몬드 막을 올려놓고 레이저 가공을 행하였으며, 알루미늄 밀판의 사용 경우, 실리콘 웨이퍼 위에 알루미늄 밀판을 부가적으로 부착한 후 그 위에 다이아몬드 막을 올려놓고 가공하였다. 가열 밀판은 두께 약 15 mm, 한 번의 길이가 약 110 mm인 정사각형의 판형 황동을 가공하여 두께의 중간 부분에 가열선과 열전대를 설치하여 원하는 온도로 대기 중에서 표면을 가열할 수 있도록 제작하였다. 온도는 상온에서 약 500°C까지 가열하여 실험하였다.

레이저 가공에 사용된 다이아몬드 후막은 직류 플라즈마 장비로 합성하였다. 다이아몬드막의 합성조건은 3% CH_4 , 1200°C 증착온도이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 중복조사(절단폭 증가)

가공 표면 부분의 절단 폭을 크게 하면, 절단 입구에 의한 레이저 빔의 차폐가 적어지고, 가공된 골의 아래까지 도달하는 레이저 빔의 양이 많아진다. 따라서 큰 절단 폭을 형성할수록 깊은 가공이 가능하다. 이러한 경향은 주어진 레이저가 일정한 최대 증횡비를 가지는 성질로부터도 설명된다. 증횡비란 레이저로 가공된 골의 폭에 대한 깊이의 비로, 예로 최대 증횡비가 10인 경우에는 약 1000 μm 깊이의 가공을 하기 위하여 최소 100 μm 폭의 가공을 하여야함을 의미한다. 이것은 주어진 레이저 조건에서 가공폭을 넓게한 경우 가공 깊이가 증가할 수 있음을 의미한다.

가공폭을 크게 하는 방법으로는 레이저의 초점을 크게 형성시키거나, 초점이 덜 형성된 부분을 사용하여 가공하는 방법이 있는데, 이 경우에는 상당한 출력의 레이저가 필요하고, 본 연구에서와 같이 약 10 W 급의 레이저로는 불가능하다. 본 연구에서는 이러한 방법 대신, 초점이 형성된 빔으로 한 번 주사한 후 옆으로 약 50 μm 이동하여 다시 주사

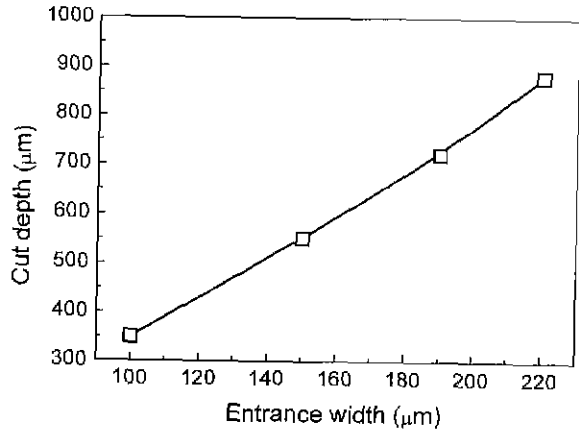


Fig. 1. The cut depths of diamond films as a function of cut widths. Diamond films are cut by a copper vapor laser. The cut widths are increased by multi-scan. The cut conditions are as follows: average power: 10 W, scan speed: 0.2 mm/sec, focus shift down: twice (375 μm each), 8 times multi-scan at each focus, beam shift: 50 μm each, cut width: 100 μm(no shift), 150 μm(shift once), 190 μm(shift twice), 220 μm(shift three times).

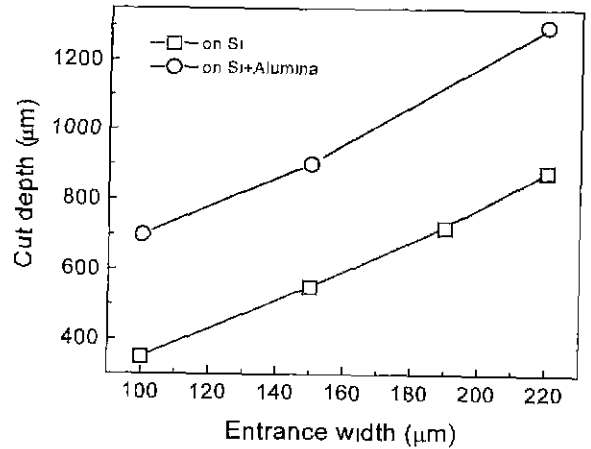


Fig. 2. The cut depths of diamond films with or without a underlayer of alumina as a function of cut widths. Detail conditions on the laser cutting are the same with Fig. 1.

히는 방법으로 넓은 가공폭을 얻었다. 이동 수에 따라 가공 폭이 30-50 μm씩 증가하였다.

Fig. 1에 가공폭에 따른 가공깊이의 변화를 나타내었다. 예상한대로 가공폭을 약 100 μm에서 220 μm로 증가시킨 경우 가공깊이는 약 350 μm에서 850 μm로 증가하였다. 본 결과로부터 절단폭을 220 μm 이상으로 넓힐 경우 1 mm 두께 정도의 후막 가공도 가능할 것으로 예상된다. 그러나 절단폭을 증가시키기 위해서는 과도한 중복조사를 하여야 하기 때문에 상당한 가공시간이 소요된다. 따라서 이러한 방법으로는 효율적인 다이아몬드 막의 가공에는 한계가 있다.

3.2. 저 열전달 밀판 및 가열 밀판을 이용한 레이저 가공

레이저에 의하여 다이아몬드 막이 가공된다는 것은 근본적으로 다이아몬드의 일부분이 레이저 에너지에 의하여 융점이상으로 가열된다는 것을 의미한다. 가공 중에는 레이저 조사되는 부분은 상당한 고온으로 유지될 것이고, 그 주위는 이 보다 낮은 온도일 것이므로, 온도차에 의하여 열손실이 발생한다. 다이아몬드의 열전도 성질이 구리의 약 4 배로 매우 크다는 것을 고려하면 이러한 열손실은 상당할 것이다. 이러한 열손실에 의하여 레이저 조사 부위의 온도는 제한될 것이다. 이때 만일 적당한 방법으로 레이저 에너지가 주위의 열전달 현상에 의하여 밖으로 유출되는 량을 줄여주면, 가공부위의 온도는 상승할 것이고, 이에 따라 상당한 가공효율의 상승을 기대할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 이해를 바탕으로, 다이아몬드 막을 열전달을 억제할 수 있는 저 열전달 밀판 위에서 가공함으로써 가공깊이가 증가하는지를 연구하였다. 저 열전달 밀판으

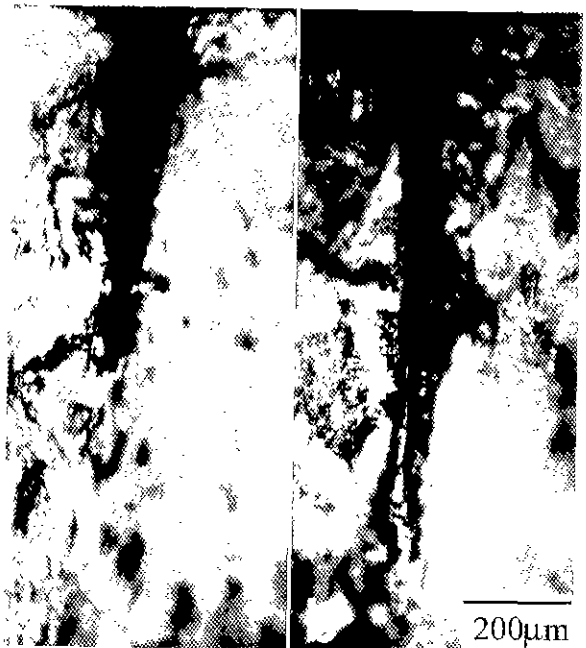


Fig. 3. Cross sectional optical images of diamond films cut by laser (a) without or (b) with a underlayer of alumina. The cut conditions are as follows: average power: 10 W, scan speed: 0.2 mm/sec, focus shift down: twice (375 μm each), 8 times multi-scan at each focus, beam shift: twice (50 μm each)

로는 알루미늄이 사용되었다. Fig. 2에 알루미늄을 사용한 경우의 가공깊이를 실리콘 만을 사용한 경우와 비교하여 나타내었다. 실리콘 밀판만을 사용한 경우에 비하여, 알루미늄 밀판을 사용한 경우, 상당히 가공깊이가 증가하였음을 알 수 있다. 가공폭이 약 100 μm에서 220 μm로 증가함에 따라 가공깊이는 약 700에서 1300 μm까지 크게 증가하였다. Fig. 3에서와 같이 가공 양상도 변화하는 것을 알 수 있다. 알루미늄 밀판을 사용하지 않은 경우에는(Fig. 3(a)) 절단폭이 넓음에도 불구하고, 절단 깊이가 작았다. 반면에 알루미늄

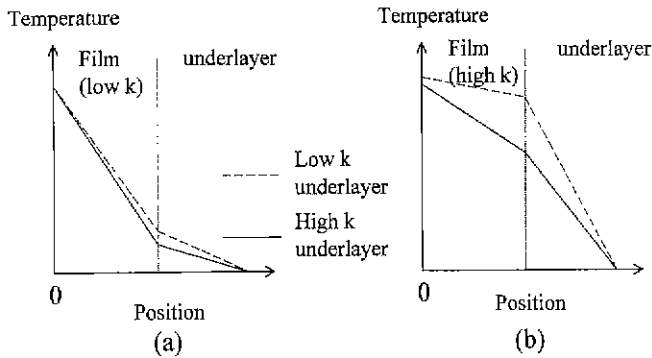


Fig. 4. Schematic drawings of temperature distributions through the film and the underlayer when cut by laser. Laser irradiates position 0. (a) low k film (b) high k film (k: thermal conductivity).

나 밀판을 사용한 경우(Fig. 3(b)) 작은 절단폭에서 큰 절단 깊이가 얻어졌음을 알 수 있다. 종횡비를 보면, 알루미늄 밀판이 사용되지 않은 경우에는 약 3.5인 반면에, 알루미늄 밀판을 사용한 경우에는 약 7로 증가하여 레이저의 변화 없이 단순히 저 열전달 밀판만의 사용으로 종횡비가 증가함을 알 수 있다.

이러한 밀판의 효과는, 위에서 언급하였듯이, 밀판에 의하여 열전달 양상이 달라지기 때문이다. 피절단 막과 밀판의 상대적인 열전달 정도에 따른 모식적인 온도분포를 Fig. 4에 나타내었다. 위치 0이 레이저가 조사되어 가공이 일어나는 부분이고, 위치가 증가할수록 밀판 방향으로 멀어짐을 의미한다. 레이저에 의하여 피가공 막에 전달된 에너지는 대략 주위 공기 중으로 발산되는 에너지, 막을 통해 밀판으로 전달되는 에너지, 가공에 참여하는 에너지 등으로 사용된다. 이때 가공이외에 소모되는 에너지가 작을수록 가공에 사용되는 에너지가 증가하여, 효율적인 가공이 가능하다. 막 및 밀판을 통한 직렬과정의 열전달은 막과 밀판 중 열전달 계수가 작은 과정에 의하여 지배되어서 이 과정에 급격한 온도 기울기가 존재하게 된다. 피가공되는 막의 열전달계수가 작은 경우에는(Fig. 4(a)) 대부분의 온도저하가 이 부분에서 발생하게 되어, 밀판의 종류에 따라 열전달 정도가 크게 달라지지 않는다. 그러나 다이아몬드와 같이 큰 열전달 물질의 경우에는(Fig. 4(b)) 밀판에서의 열전달이 중요하게 되어, 밀판의 종류에 따라 열전달 양상이 상당히 달라질 수 있다. 본 연구에서와 같이 단순히 밀판의 종류를 바꿈으로 상당한 가공양상의 변화가 발생한 것도 다이아몬드의 열전달 계수가 상당히 크기 때문으로 판단된다. 즉, 밀판에 비하여 피가공막의 열전달 계수가 클수록, 열전달은 밀판에서의 과정이 지배적이 되고, 밀판의 종류에 따라 강한 영향을 받게 된다.

사실 밀판의 종류에 따라 변화하는 발산 에너지량은 입사되는 총 레이저 에너지에 비하여 미미할 수 있다. 그러나 다이아몬드와 같이 고 열전달 막을 가공하는 경우에는 입사

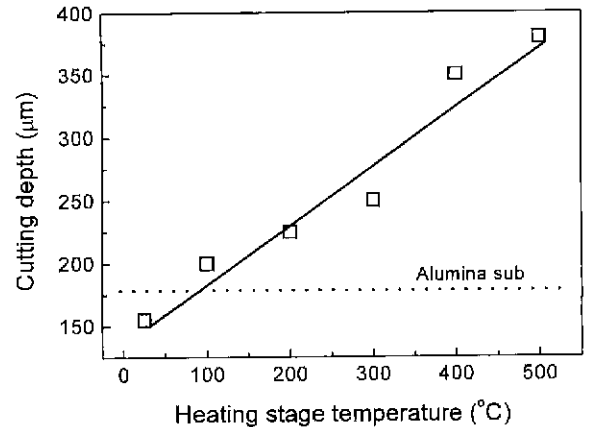


Fig. 5. The cut depths of diamond films as a function of heating temperatures. The cut conditions are as follows: average power: 10 W, scan speed: 0.2 mm/sec, 4 times multi-scan, no focus down and beam shift.

된 에너지 중, 실제 가공에 사용되는 레이저 에너지는 작아서, 밀판의 변화에 의한 발산에너지 량의 변화는 상당한 영향을 미칠 수 있다.

저 열전달 밀판의 사용에 의한 열발산의 억제가 레이저 가공을 효율적으로 만듦에 따라 좀 더 적극적인 방법으로 가열 밀판을 이용하여 레이저 가공 시 열의 발산을 억제하고자 하였다. 저 열전달 기판은 수동적으로 발산하는 에너지의 양을 줄일 수 있는 반면에, 가열 밀판은 능동적으로 다이아몬드 막을 가열할 수 있어서, 좀 더 효율적인 가공을 기대할 수 있다.

Fig. 5에 가열 밀판의 온도에 따른 절단 깊이를 나타내었다. 주사속도는 약 0.2 mm/sec였고, 반복주사수는 4회가 가공깊이가 포화되지 않는 상태이다. 가열 밀판의 온도가 상온에서 500°C까지 증가함에 따라 가공깊이가 거의 선형적으로 증가하였다. 상온에서는 약 150 μm의 절단깊이가 500°C에서는 약 370 μm로 두 배 이상 증가하였다. 비교를 위하여 같은 조건에서 알루미늄 기판에서의 절단 깊이를 관찰하였는데, 그림에서 점선으로 나타내었듯이, 약 180 μm 정도 절단되었다. 이 정도의 깊이는 가열 밀판의 경우 약 100°C의 가열로 얻어질 수 있어서, 이 이상의 가열로 알루미늄 밀판 보다 훨씬 효율적인 레이저 가공이 가능함을 알 수 있다.

가열 밀판을 이용하여 약 400°C로 가열할 경우 100 μm의 절단폭에서 1000 μm 이상의 절단이 가능하며, 10 이상의 가공 종횡비를 얻을 수 있다. 이렇게 가열 밀판을 이용하여 1 mm 두께의 다이아몬드 막을 4 인치 직경으로 절단하는 경우 절단폭 약 100 μm에서, 6 시간 정도가 소요된다. 실리콘 및 알루미늄 밀판을 사용한 경우, 100 μm 절단폭에서는 1 mm의 가공이 불가능했고, 절단폭을 크게하는 경우 최고 수십 시간 정도 소요되는 것과 비교하면, 가공 효율이 상당히 향상되었음을 알 수 있다.

4. 결 론

저 출력의 레이저로 다이아몬드 후막을 절단하는 경우, 저 열전달 밀판과 가열 밀판을 사용하여 상당한 가공효율의 향상을 얻었다. 이러한 방법은, 부가적인 레이저 장치의 개선 없이, 다이아몬드 막을 올려 놓는 밀판 만을 개선함으로 가공효율을 향상시킬 수 있다는 점에서 매우 중요하다.

실리콘 밀판 위에서는 절단폭 100 μm 에서 10 W 급 구리 증기 레이저로 1 mm 두께의 다이아몬드 후막을 절단하는 것이 불가능했으나, 가열 밀판을 이용하여 약 400°C로 가열한 경우에는 4 인치 직경의 원형으로 절단하는 경우 약 6 시간 정도가 소요되었다.

본 기술의 효과는 특히 열전달 성질이 좋은 물질의 레이저 가공에서 두드러질 것으로 예상되며, 다이아몬드 이외의 저 열전달 후막의 절단을 위하여는 별도의 연구가 필요할 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. H. O. Pierson, Handbook of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes, pp. 302-36, Noyes Pub., Mill road, 1993.
2. M. N. Yoder, "The Vision of Diamond as an Engineered Material," pp. 3-17, in Synthetic Diamond. Edited by K. E. Spear and H. P. Dismukes, John Wiley & Sons Inc. 1994.
3. D. C. Harris, "Diamond Optics: Status for Infrared Applications," pp. 539-46, Proc. 3rd Int. Conf. on Applications of Dia. Films and Related Mater. Edited by A. Feldman, Y. Tzeng, W. A. Yarbrough, M. Yoshikawa and M. Murakawa (NIST Spec. Publ. 885, Washington), 1995.
4. A. P. Malshe, H. A. Naseem, W. D. Brown and L. W. Schaper, "Recent Advances in Diamond Based Multichip Modules(MCMs)," pp. 611-18, Proc. 3rd Int. Conf. on Applications of Dia. Films and Related Mater. Edited by A. Feldman, Y. Tzeng, W. A. Yarbrough, M. Yoshikawa and M. Murakawa (NIST Spec. Publ. 885, Washington), 1995.
5. E. J. Oles, A. Inspektor, C. E. Bauer, "The New Diamond-Coated Carbides Cutting Tools," *Dia. & Related Mater.*, **5**, 617-24 (1996).
6. S. Preuss and M. Stuke, "Subpicosecond Ultraviolet Laser Ablation of Diamond: Nonlinear Properties at 248 nm and Time-Resolved Characterization of Ablation Dynamics," *Appl. Phys. Lett.*, **67**(3), 338-40 (1995).
7. V. G. Ralchenko, S. M. Pimenov, T. V. Kononenko, K. G. Korotoushenko, A. A. Smolin, E. D. Obraztsova and V. I. Konov, "Processing of CVD Diamond with UV and Green Lasers," pp. 225-32, Proc. 3rd Int. Conf. on Applications of Dia. Films and Related Mater. Edited by A. Feldman, Y. Tzeng, W. A. Yarbrough, M. Yoshikawa, and M. Murakawa (NIST Spec. Publ. 885, Washington), 1995.
8. S. Tezuka, H. Tokura, and M. Yoshikawa, "Cutting of Diamond Grit with YAG Laser," pp. 469-73, in Sci. and tech. of New Dia, Edited by S. Saito, O. Fukunaga and M. Yoshikawa. KTK Scientific Pub., Tokyo, 1990.
9. V. G. Ralchenko and S. M. Pimenov, "Laser Processing of Diamond Films," *Diamond Films and Tech.*, **7**(1), 15-40 (1997).
10. M. Rothschild, C. Arnone and D. J. Ehrlich, "Eximer-laser etching of Diamond and Hard Carbon Films by Direct Writing and Optical Projection," *J. Vac. Sci. Technol.*, **B4**(1), 310-14 (1986).
11. A. G. Grigoryants, "Basics of Laser Material Processing," p. 53, CRC press, Boca Raton Ann Arbor Tokyo London, Edited by P. S. Ivanov, 1994.
12. 박영준, 백영준, "구리증기레이저를 이용한 다이아몬드막의 가공," 세라믹학회지, **35**(1), 41-47 (1998).
13. 박영준, 백영준, "화학기상증착 다이아몬드 막의 레이저 평탄화." 세라믹학회지, **36**(4), 417-424 (1999).