

극초단 레이저를 이용한 PC-TEMs 초정밀 가공에 대한 연구

Polycarbonate Track-Etched Membrane Micromachining by Ultrafast Pulse Laser

최해운^{1,✉}

Hae Woon Choi^{1,✉}

1 계명대학교 기계자동차공학과 (Department of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung Univ.)

✉ Corresponding author: hwchoi@kmu.ac.kr, Tel: 053-580-5216

Manuscript received: 2010.9.13 / Accepted: 2010.11.9

PC-TEMs (Polycarbonate Track-Etched membranes) were micro-drilled for biomedical applications by ultrafast pulsed laser. The ablation and damage characteristics were studied on PE-TEMs by assuming porous thin membranes. The experiments were conducted in the range of 2.02 J/cm² and 8.07J/cm². The ablation threshold and damage threshold were found to be 2.56J/cm² and 1.14J/cm², respectively. While a conical shaped drilled holes was made in lower fluence region, straight shaped holes were drilled in higher fluence region. Nanoholes made the membrane as porous material and ablation characteristics for both bulk and thin film membranes were compared.

Key Words: Ultrafast Laser (극초단레이저), PCTE (Polycarbonate Track etched Membrane; 에칭박막폴리카보네이트), Microdrilling (마이크로드릴링)

기호설명

E = laser energy (J)

E_{th} = threshold energy (J)

F_0 = laser fluence (J/cm²)

F_{th} = threshold fluence (J/cm²)

w_0 = laser beam waist (@ FWHM)

r = radius of ablated/damaged area (μm)

D = diameter of ablated/damaged area (μm)

λ = laser beam wavelength (nm)

1. 서론

극초단 레이저(Ultrafast laser)의 상용화 및 산업 현장의 도입으로 마이크로 스케일 영역의 가공에 혁신을 가져다 주었다. 특히, 클린룸 등에서 작업 하는 번거로움을 덜어주고, 반도체 공정에 비해서

가공할 수 있는 재료의 범위가 많이 넓어지게 되었다.¹⁻³

극초단 레이저는 레이저의 발전시간이 극히 짧아서 레이저빔 조사부위 주변 물질로의 열전도(thermal diffusion)에 의한 열팽창과 수축 등으로 인한 열영향 문제점들을 해결할 수 있는 것이 가장 큰 특징이다.^{1,4} 원리는 일반적으로 펄스초 레이저의 경우, 금속격자 사이로 열이 전달되는 시간(통상 ~10⁻¹¹ 초, 10 피코초)에 비해 레이저빔의 조사 시간(Irradiation time)이 매우 짧으므로 열영향부(Heat affected zone)를 거의 발생시키지 않고 정밀한 부품의 가공이 가능하게 되며, 작용시간 동안 높은 순간 정점온도로 인해서 레이저가 집속되는 부위의 온도에서는 급격한 이온화 과정(Avalanche ionization) 발생으로 인한 자유전자 밀도가 높아지고 레이저 빔의 흡수가 좋아지게 되어, 유전물질 가공에도 용이하게 사용이 된다.⁵ 이로 인한 결과

로 밴드 갭이 비교적 큰 유전물질의 가공에도 매우 용이하게 사용이 되며, 난제로 여겨져 왔던 기화온도가 높은 텅스텐합금 및 일반 철강소재에까지 그 소재선택의 폭이 확대되게 되었다.⁶

바이오 물질은 특성상 열에 노출되면 생물학적 기능이 파괴되기 때문에 기기 제작 시 유의해야 한다. 특히 기기는 생물학적으로 생체물질과 친화적 (Biocompatible)이여야 하고, 때로는 생체물질에 흡수(Biodegradable) 되거나 반응하지 않고 저항할 수 있어야 한다. 이러한 기기제작에 가장 많이 사용할 수 있는 재료는 유리(Glass)계통의 무기물질이지만 가공이 대단히 어려울 뿐만 아니라 수요자의 요구에 맞게 다양하게 기기를 생산하는 것이 쉽지가 않은 단점이 있다. Titanium 합금이나 Stainless 합금의 경우 인체 보형물로 많이 사용되지만, 무게가 무거워서 사용에 제한을 받게 된다. 이러한 단점을 보완한 것의 한 예로 고분자화합물 (Polymer)을 들 수가 있는데, 레이저가공기술과 접목이 되어서 그 효용성이 점점 더 증대되고 있다.

폴리머를 매크로 스케일로 레이저 가공하는 방법은 이미 산업계에서 많이 사용하고 있으나, 생명공학분야처럼 정밀하게 사용하는 방법은 극히 제한적이다. 그 이유로는 첫째, 레이저 가공 시 발생하는 열영향부이다. 레이저 가공을 통해서 열영향을 최소화할 수 있지만 펄스폭이 비교적 긴 나노초 영역의 경우에는 그 영역이 수십 마이크로미터에 달하기 때문에 수 마이크로미터 정밀도를 요구하는 응용분야에서 적용하기가 쉽지가 않다. 두 번째는 열원의 초정밀 제어기술인데, 레이저 빔 조사시 빔의 품질이나 균질도에 많은 영향을 받는다. 레이저 열원의 균질도는 다른 열원에 비해서 비교적 우수하나 가공임계치의 미세한 부분을 이용한 초정밀 제어시에는 극초단 레이저의 잇점이 많다.

본 논문은 생명공학분야에서 각종 생물화학적 분석을 위해서 많이 사용되고 있는 10 μ m 두께의 Polycarbonate Track etched membrane (PC-TEMs)을 가공하기 위해 극초단 레이저를 이용한 사례를 소개하고, 극초단 레이저가 기공(Porous)이 많은 물질과의 작용에 관해서 고찰한 연구결과를 소개한다.

소개된 결과는 유전자주입(Gene delivery) 및 In-Vitro 단계에서 필요한 각종 분석기기 제작, 세포를 강한 전기장내에서 천공(Electroporation)하기 위해서 세포를 지지하는 폴리머 멤브레인 제작에 필요한 물질적 특성을 연구한 결과를 수록하였다.

2. 본론

2.1 PC-TEMs

폴리카보네이트(Polycarbonate) 탄산에스테르 결합구조를 가지는 고분자 화합물로서 대표적인 열가소성수지(Fig. 1)이며, 몰드나 열변형을 이용한 폴리머제품으로 많이 사용하고 있다. 특히, 열에 대한 변형이 비교적 적고, 충격에 강하며 광학특성이 좋아서 주로 CD(Compact Disc)등의 멀티미디어 저장장치나 생명공학에서 여러가지 시료를 분석하고 저장하는 용기로도 많이 사용된다.

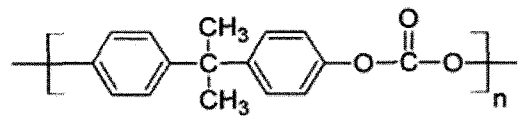


Fig. 1 Chemical structure of poly-carbonate

이러한 폴리카보네이트를 수십 마이크로미터의 두께로 얇은박막 가공한 후, 이온에칭 공정을 통하여 수십 나노미터에서 수백 나노미터 크기의 랜덤한 통기성을 확보한 멤브레인을 트랙에치드 멤브레인(Track Etched Membranes, TEMs)이라고 이라기를 하며, 재질이 폴리카보네이트로 된 박막을 PC-TEMs 라 부른다.⁵

PC-TEMs 은 기계적, 광학적 생물학적 특성이 우수해서 주로 필터나 바이오센서 등에 많이 사용되고 있는데, 이러한 PC-TEMs 의 장점에도 불구하고 통기구멍의 분포가 랜덤하다는 것이다.

생물학적 실험에서 있어서 이러한 랜덤한 통기구멍 분포보다는 정렬된 격자형태의 가공이 필요한데, 이 공정에 극초단레이저를 이용하였다. 이러한 랜덤구조의 PC-TEMs 은 상업적으로 판매되고 있으며(Fig. 2a), 본 연구를 통해서 정렬된 형태로 20 x 20 Array 형태로 가공된 PC-TEMs 이 Fig. 2b 에 도시되어 있다.

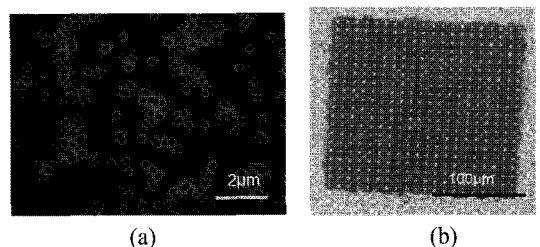


Fig. 2 (a) Track-Etched membrane⁷ (b) Array hole membrane by Femtosecond laser

2.2 실험장치의 구성

실험에 사용된 소재는 두께 10 μm 이고 공칭 에칭 통기홀 크기가 200nm 인 PC-TEMs(SPI-Pore) 가 직경인 20mm 형태로 가공이 된 것을 사용하였다. 통기홀은 랜덤하게 분포가 되어 있으며, 광학적으로 투명한 얇은 필름이다.

PC-TEMs 을 가공하기 위한 실험장치에 사용된 레이저는 중심파장(Central wavelength)이 775nm 이고 시간 폭(Temporal pulse width)이 150fs 인 극초단 레이저(CPA 2100, Clark-MXR) 를 사용하였다. 또한 샘플을 이송하기 위한 모션시스템, 레이저빔 조사량을 조절하기 위한 빔 제어장치(Beam delivery system), 그리고 동축 비전시스템(coaxial vision system)으로 구성이 되어 있으며, 시스템 모식도가 Fig. 3 에 나타나 있다.

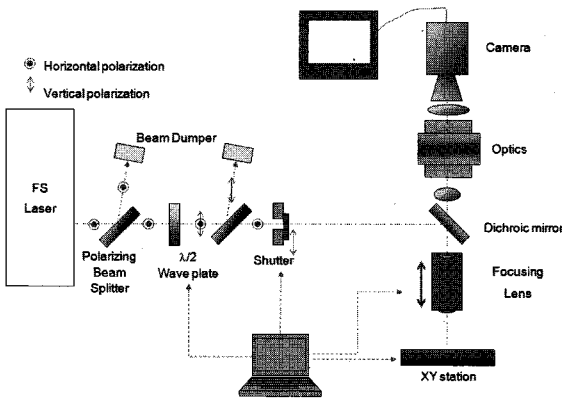


Fig. 3 System configuration

중심파장(Central wavelength)은 775nm 로 셋팅이 되어 있으나, 실제 펄스대역(Pulse width)은 750nm~800nm 의 Chirped Pulse 를 증폭하여 만든 것으로서 최고 3000Hz 의 펄스 반복률을 가지도록 최적화되었다.

레이저 발진장치에서 생성된 에너지는 미세가공하기에는 너무 큰 에너지 이므로, 다단의 광학 감쇄장치(optical attenuators)를 걸쳐서 감쇄 하였다. 또한, 박막 편광나눔장치(Thin film polarizing beam splitter)를 통해서 레이저빔의 투과량과 반사량을 조절할 수 있도록 반파장 편광변환장치($\lambda/2$ waveplate)를 사용하였다.

실험장치 상부에는 가공소재의 위치 및 초점위치 조절을 위해서 동축 비전시스템(coaxial vision system)이 설치되었으며, 가공 후 결과물에 대한

간단한 검사도 실시할 수 있도록 하였다. 가공은 대기 중에서 진행하였으며 경우에 따라서 가공입자 제거를 위해서 불활성가스의 일종인 아르곤 가스를 미세하게 공급하여 공정변수에 영향을 최소화 하였다. 완료된 PC-TEMs 은 별도의 클리닝 공정을 거치지 않고, 광학현미경(OM)과 전자현미경(SEM)을 통해서 크기와 가공형태를 측정하였다. 실험의 정확성을 위해서 동일 실험을 5 회 반복한 후 평균데이터를 계산하여서 제시하였다.

2.3 PC-TEMs 의 가공특성 (가공임계치)

PC-TEMs 의 가공특성을 알아보기 위해서 소재 표면에 단펄스(single pulse)를 조사하여서 단위면적당 펄스에너지(fluence, J/cm^2) 와 가공된 재료의 가공크기를 조사하였다. 실험에 사용된 레이저는 M^2 가 1.2 로 측정되었으며, 가우시안 빔의 형태를 가정하여 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$E = E_0 \exp(-2r^2/w_0^2) \quad (1)$$

여기에서 w_0 는 조사레이저 반경(radius of beam waist)이며 일반적으로 FWHM(Full width half max) 값을 사용하며, E_0 는 정점에너지(Peak energy)이다. w_0 은 조사된 레이저의 반경으로서 회절한계에 따른 이론적인 값을 구할 수 있지만, 실제의 경우 초점위치 및 렌즈로 인한 빔의 왜곡 등의 이유로 이론 값과는 차이가 나므로 에너지(E_0)에 따른 가공물의 실제반경(r)을 Fig. 4 와 같이 측정한 후 경향 그래프의 기울기와 절편을 식 (2)와 같이 이용하면 구할 수 있다.

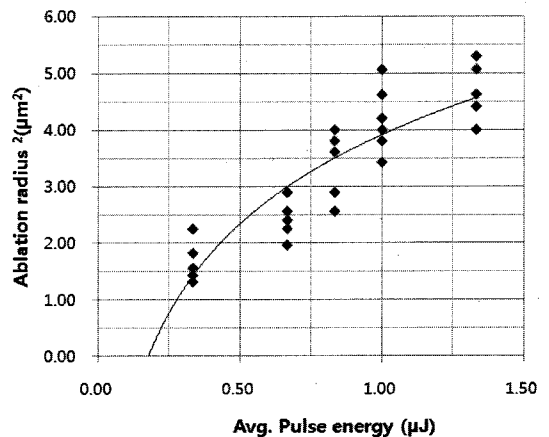


Fig. 4 Plot of ablation radius 2 vs. avg. pulse energy

$$r^2 = \frac{1}{2} w_0^2 \ln(E_0) - \frac{1}{2} w_0^2 \ln(E_{th}) \quad (2)$$

Fig. 4 에서 나타난 데이터를 근거로 하여 로그 함수에 대한 커브피팅을 실시하였다. 식 (2)에서 정리된 것과 같이, 첫 번째 항의 계수를 로그스케일 기율기에서 찾았으며 결과로 9.4 로 계산되었다. 결과적으로 실험에서 적용된 레이저빔의 반경(ω_0)은 $2.17\mu\text{m}$ 로 계산될 수 있었다. 실험에 사용된 Infinity corrected long distance 초점렌즈는 이론상 반경을 $0.8\mu\text{m}$ 까지 집속을 할 수 있으나, 투명필름의 표면초점의 한계성과 평탄도의 문제로 실제 반경은 더 크게 실험되었다. 또한 x 절편($y=0$)을 구하여서 E_{th} 를 구하였다.

가공 임계치 계산을 위해서 순간에너지를 조사 레이저면적 (Irradiation area)인 $\pi\omega_0^2$ 로 나누면, 에너지 밀도를 식 (3)과 같이 표현될 수 있다.

$$F = F_0 \exp(-2r^2/w_0^2) \quad (3)$$

여기에서 에너지밀도인 fluence F 는 각 지점 (r)에서의 에너지 강도이며 물질을 가공하기 위한 최소 fluence (F_{th})를 가공 임계치(ablation threshold)라고 부른다. 식 (2)를 가공 임계치 (F_{th})와 $D=2r$ 관계를 이용하여서 재 정리하면 식 (4)의 관계를 얻을 수가 있다.

$$D^2 = 2w_0^2 \ln(F_0 / F_{th}) \quad (4)$$

여기에서, D^2 은 가공직경의 제곱값(ablation diameter squared)이며, 로그스케일의 fluence 와 가공크기를 비교하게 되면 가공 임계치 값을 구할 수가 있으며, PC-TEMs 실험결과가 Fig. 5 에 도시되어 있다.

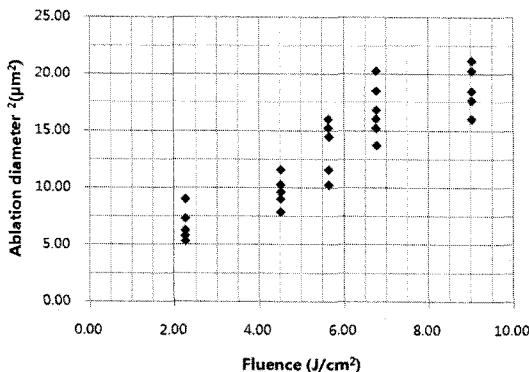


Fig. 5 Plot of ablation diameter² vs. fluence

이때 산포된 가공직경의 데이터를 평균하여 나타내어 표로 정리하면 Table 1 과 같으며, 평균값들에 대한 커브피팅 결과 가공 임계치는 $2.57\text{J}/\text{cm}^2$ 으로 계산이 되었다.

Table 1 Average diameters for ablation threshold

Power (mW)	Pulse energy			Fluence (J/cm ²)	Diameter ² (um)
	(μJ/pulse)	J	Ln(E)		
1.0	0.33	3.3E-07	-14.91	4.52	6.25
2.0	0.67	6.7E-07	-14.22	9.03	9.61
2.5	0.83	8.3E-07	-14.00	11.29	13.69
3.0	1.00	1.0E-06	-13.82	13.55	16.81
4.0	1.33	1.3E-06	-13.53	18.07	18.66

2.4 PC-TEMs 의 가공특성 (손상 임계치)

2.3 절의 방법과 동일하게 PC-TEMs 의 손상 임계치(damage threshold)를 조사하였다.

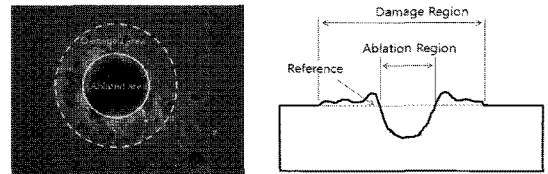


Fig. 6 Ablated region vs. damaged area

가공영역과 손상영역에 대한 정확한 정의가 내려져 있지 않아, 본 논문에서는 Fig. 6 과 같이 소재가 완전히 가공이 되어서 없어지는 영역을 가공 영역(ablated region)라 정의하고, 소재표면이 열에 의해서 변형이나 녹는 경우를 손상영역(damaged region)이라 정의하였다.

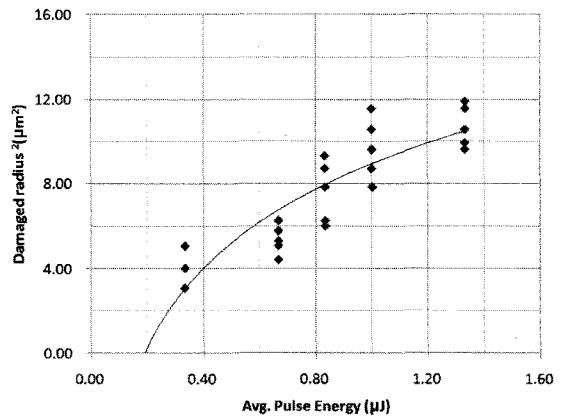


Fig. 7 Plot of damaged radius² vs. pulse energy

Fig. 7 은 손상영역의 크기를 펄스에너지에 대한 그래프로 도시한 것이다. 데이터의 산포도나 커브 피팅에서 계산된 데이터 형태는 가공영역의 것과 유사함을 알 수가 있었다. 실험결과에서 로그스케일 기울기가 21.0 로 계산되었으며, 결과적으로 레이저빔의 반경(ω_0)은 $3.24\mu\text{m}$ 로 계산되었다.

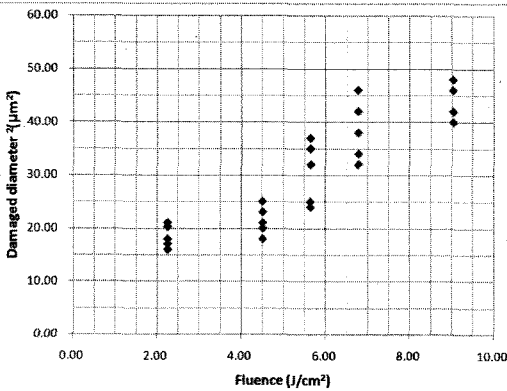


Fig. 8 Plot of damaged diameter² vs. fluence

2.3 절에 기술된 방법과 식 (4)를 적용하고 Fig. 8 의 데이터를 이용하여 계산한 결과 손상 임계치는 $1.14\text{J}/\text{cm}^2$ 로 계산되었다. Polycarbonate 의 손상 임계치값은 선행연구된 결과는 찾지 못하여서 비교하기가 어렵지만, 일반적으로 유전물질의 가공 임계치의 영역에 분포됨을 알 수가 있다. 또한 손상 임계치는 산포도는 주관적 측정오차의 범위가 커서 가공 임계치에 비해서 다시 크게 나타남을 알 수가 있다.

2.5 PC-TEMs 마이크로 드릴링

2.2 -2.4 의 실험결과를 이용 PC-TEMs 의 가공 주변손상을 최소화할 수 있는 공정조건으로 fluence 영역을 $2.02\text{J}/\text{cm}^2$ 에서 $8.07\text{J}/\text{cm}^2$ 로 선정하였는데, 이는 평균 레이저 출력이 1mW 와 4mW 에 각각 해당 된다. 실제 1mW 에는 표면 손상만 일어날 뿐, 가공은 거의 이루어지지 않았으나 멀티샷의 경우 잉큐베이션 효과로 인해서 일부 가공이 일어나는 것이 확인 되었다. 상한치 4mW 초과하여 가공할 경우, 가공면이 깨끗하지 못하고 일부 드릴링 홀의 크기가 지나치게 커지는 현상이 발견되었다. 이러한 현상을 펄스에너지 $0.67\text{J}/\text{cm}^2$ 에서 $2.66\text{J}/\text{cm}^2$ 영역에서 실시한 마이크로 드릴링을 실시한 후 입구직경과 출구직경을 비교한 결과가 Fig. 9 에 도시되어 있다.

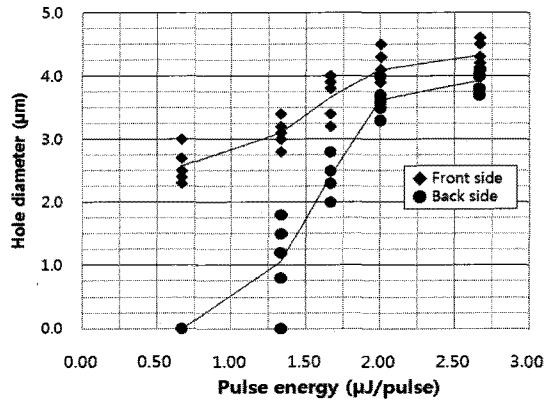


Fig. 9 Front and Backside drilling diameter

생성된 프로세스 파라미터를 종합하여서 실험한 결과가 Fig. 10 에 도시되어 있다. 도시된 결과는 평균조사출력이 2mW 이고 총 30 개의 펄스를 가한 결과이다. 결과에서 알 수 있는 바와 같이 입구의 영역이 깨끗하게 가공이 되었으며, 출구의 영역은 다소 불규칙하기는 하나 완전한 관통을 이룬 것을 알 수가 있다. 입구영역에는 도우넛 모양의 링이 형성되어 있는데 이는 멀티 샷에 의해서 손상된 영역이 융착(melting)된 것으로 판단이 된다.

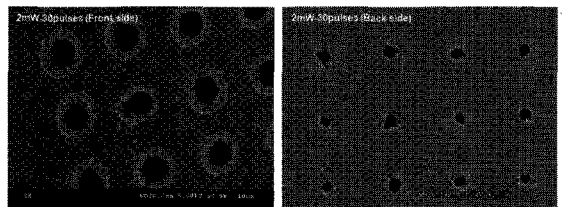


Fig. 10 (a) Front side view (b) Back side view of microdrilling at 2mW - 30pulses

3. 결과 및 분석

PC-TEMs 마이크로 드릴링시 후판멤브레인(100 μm 이상) 완전고체(non-porous) 멤브레인 가공과는 현저히 차이가나는 몇 가지 가공특성을 발견할 수 있었다. 첫째, 가공 및 손상임계치의 값이 완전고체(non-porous material) 보다는 다소 높아짐이 발견되었다. 둘째, 나노기둥 및 경계굴절률(interface refraction)의 차이로 인한 가공형상의 차이도 발견되었다. 마지막으로 가공 임계치와 손상 임계치에 대한 차이 값에 대한 분석도 실시하였다.

3.1 Porous material 의 가공임계치

실험결과에서 나타난 바와 같이 PC-TEMs 에 가공에너지를 $2.02\text{J}/\text{cm}^2$ 에서 $8.07\text{J}/\text{cm}^2$ 의 범위에서 실험함 결과, 가공할 수 있는 최소에너지밀도 (Fluence or ablation threshold)는 $2.67\text{J}/\text{cm}^2$ 로 조사가 되었다. 결과를 비교하기 위해서 선행연구를 조사한 결과 $0.5\text{J}/\text{cm}^2$ 에서 $2.5\text{J}/\text{cm}^2$ 범위 내에서 변화되는 것으로 조사가 되었다.⁸

본 연구의 결과와 비교하였을 때, 일부 산포된 데이터값을 고려하면 선행연구의 가공 임계치 영역에 포함되지만, 평균 가공 임계치는 선행연구 결과의 최대 가공 임계치에 해당하고 있다. 이는 선행연구와의 레이저 조사파장(800nm)의 차이에도 기인하지만, 기공이 많은(Porous) 소재 표면의 레이저 침식 산란이 큰 역할을 한 것으로 고찰이 된다. 이러한 분석은 Fig. 6 에서도 간접적으로 확인할 수 있는데, 일부 레이저 빔이 PC-TEMs 입구에서 산란이 되어 용융이 된 모습도 발견할 수 있다.

또한 멤브레인의 나노크기 홀이 조사된 레이저 빔의 일부를 통과시키는 도파로(Waveguide) 역할을 하여서, 조사된 레이저 빔의 일부는 내부를 통과하여 출구 쪽으로 유출되는 것도 가공 임계치를 저하시키는 원인이 될 것으로 판단이 된다.

3.2 나노기둥 및 경계 굴절치에 의한 드릴링 홀 형상변화

박판 멤브레인 가공시 나타난 또 하나의 특징은 드릴링 홀 형상의 변화이다. 특히, 에너지밀도가 $2\mu\text{J}/\text{pulse}$ 보다 낮은 영역에서는 Fig. 9 와 같이 입구의 가공크기와 출구의 가공크기가 급격히 변하는 것을 알 수가 있다. 이는 PC-TEMs 소재내부에 분포하고 있는 두께 방향의 수직 나노기둥들이 입구에 조사된 레이저 빔을 내부로 집속시켜주는 역할을 하는 것으로 판단된다. 내부에 조사된 레이저 빔이 내부가 공기로 채워져서 경계굴절을 차이로 인해서 전반사가 이루어지고(광섬유), 이로 인해서 물질 내부에서 산란되어지는 레이저 빔이 내부로 집속될 수 있도록 도와주는 역할을 할 것으로 기대가 된다.

3.3 가공임계치와 손상임계치의 변화

PC-TEMs 가공시 나타난 특이 사항 중 하나는 가공 임계치와 손상 임계치 영역의 확연한 차이이다. 가공임계치의 값이 $2.56\text{J}/\text{cm}^2$ 인 반면 손상임계치의 값은 $1.5\text{J}/\text{cm}^2$ 로 나타났다. 손상영역(damaged

area)과 가공영역(ablated region)의 뚜렷한 구분은 측정장치의 차이(SEM 또는 원자현미경)에 따라서 논란이 있지만, 일반적으로 가공기준면을 기준으로 하여 소재가 완전히 제거된 영역을 가공영역이라 하고 원소재가 녹거나 영구변형된 부분을 손상영역으로 정의하는 것이 일반적인 경우이다.

동일한 실험조건에서 가공영역의 지름이 $4.34\mu\text{m}$ ($r=2.17\mu\text{m}$)인 반면, 손상영역의 지름은 $6.48\mu\text{m}$ ($r=3.24\mu\text{m}$)로 손상영역 지름이 가공영역지름의 150%에 달하는 것을 알 수가 있다.

일반적으로 저에너지밀도에서는 손상영역의 지름이 가공영역의 지름보다 크지만, 고에너지밀도 영역으로 넘어갈수록 점차로 비슷해지는 경향을 볼 수가 있는데, 이는 고에너지 영역에서는 가우시안 빔 형태의 에너지가 가장자리의 에너지도 소재를 가공하기에 충분함이기 때문이다.

PC-TEMs 의 경우도 비슷하지만, 고에너지 밀도 영역의 가장자리(Fig. 6 의 우측하부)에서도 미세한 손상이 일어나는 것을 볼 수가 있다. 이는 동일한 가우시안 빔의 작용이라 할지라도 나노 홀에 의한 소재 표면의 미세한 형상변화가 레이저 빔 흡수율 상승에 도움이 되었을 것으로 분석된다.

4. 결론

본 논문에서는 극초단 레이저를 사용하여 생명공학분야 분석시험 멤브레인으로 사용될 수 있는 PC-TEMs 의 가공특성에 대해서 알아보았다.

연구결과 일반 벌크소재(Bulk material) PC 에서와는 다소 다른 가공특성들을 몇 가지 찾아 볼 수가 있었는데, 이는 박판 멤브레인이 기공이 많은 porous 한 물질이어서 레이저 빔의 흡수도가 차이가 있고, 또한 기공으로 인한 내부흡수 또는 산란도가 균질물질의 가공과 차이를 만드는 것으로 조사되었다.

대표적인 예로 균질 벌크소재의 가공 임계치가 $0.5\text{J}/\text{cm}^2$ 에서 $2.5\text{J}/\text{cm}^2$ 영역에 분포하는 반면, PC-TEMs 의 경우 이보다 약간 높은 $2.56\text{J}/\text{cm}^2$ 에 분포하는 것을 볼 수가 있었다. 또한 $10\mu\text{m}$ 두께 멤브레인의 가공형상이 입구와 출구의 차이가 저밀도 에너지영역에서는 확연히 차이가 나는 것을 알 수가 있었는데, 이는 소재 내부의 나노기둥이 레이저 빔을 내부로 집속하는데 도움이 된 것으로 분석되었다.

또한 손상영역이 가공영역에 비해서 약 150 %

정도 큰 지름으로 형성이 되었는데, 이는 물질표면의 나노 홀로 인해서 레이저 빔이 흡수되기 좋은 구조로 되어 있기 때문일 것으로 분석이 되었다.

참고문헌

1. Stuart, B., Feit, M., Rubenchik, A., Shore, B. and Perry, M., "Laser-induced damage in dielectrics with nanosecond to subpicosecond pulses," *Physical Review Letters*, Vol. 74, No. 12, pp. 2248-2252, 1995.
2. Lee, J. and Shon, H., "Ultrafast laser micromachining technology," *J. of KSPE*, Vol. 27, No. 2, pp. 7-12, 2010.
3. Chung, I., Kang, K., Kim, J., Sohn, I., Noh, Y. and Lee, J., "Characteristics of the Femto-second Pulsed Laser Ablation according to Feed Velocity on the Invar Alloy," *J. of KSPE*, Vol. 26, No. 3, pp. 25-31, 2009.
4. Choi, H. and Shin, H., "Die surface texturing by Femtosecond laser for friction reduction," *J. of KSPE*, Vol. 26, No. 5, pp. 57-63, 2009.
5. Choi, H., Johnson, J., Nam, J., Farson, D. and Lannutti, J., "Structuring electrospun polycaprolactone nanofiber tissue scaffolds by femtosecond laser ablation," *J. of Laser Applications*, Vol. 19, No. 4, pp. 225-231, 2007.
6. Farson, D., Choi, H., Lu, C. and Lee, L., "Femtosecond laser bulk micromachining of microfluid channels in poly-methylmethacrylate," *J. of Laser Applications*, Vol. 18, No. 3, pp. 210-215, 2006.
7. Isopore Membrane Filter, www.millipore.com
8. Baudach, S., Bonse, J., Kruger, J. and Kautek, W., "Ultrashort pulse laser ablation of polycarbonate and plumethylmethacrylate," *Applied Surface Science*, Vol. 154-155, No. 1-4, pp. 555-560, 2000.