

◆특집◆ 초고속 레이저를 이용한 새로운 정밀가공 기술

# 레이저를 이용한 폴리머 탄화현상 해석 및 LCD 제조공정에서의 응용

## Analysis of Polymer Carbonization using Lasers and its Applications for LCD Manufacturing Process

안대환<sup>1</sup>, 박병구<sup>1</sup>, 김동언<sup>2</sup>, 김동식<sup>1,✉</sup>  
Daehwan Ahn<sup>1</sup>, Byounggu Bak<sup>1</sup>, Dong Eon Kim<sup>2</sup> and Dongsik Kim<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 포항공과대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, POSTECH.)

<sup>2</sup> 포항공과대학교 물리학과 (Department of Physics, POSTECH)

✉ Corresponding author: dskim87@postech.ac.kr, Tel: 054-279-2179

Manuscript received: 2010.4.20 / Revised: 2010.4.29 / Accepted: 2010.5.7

*Laser carbonization of a polymer layer can be employed in various applications in the microelectronics industry, e.g., repairing brightness pixels of an LCD panel. In this work, the process of thermal degradation of LCD color filter polymer by various laser sources with pulsewidths from CW to fs is studied. LCD pixels are irradiated by the lasers and the threshold irradiance of LCD color filter polymer carbonization is experimentally measured. In the numerical analysis, the transient temperature distribution is calculated and the number density of carbonization in the polymer layer is also estimated. It is shown that all the lasers can carbonize the polymer layers if the output power is adjusted to meet the thermal conditions for polymerization and that pulsed lasers can result in more uniform distribution of temperature and carbonization than the CW laser.*

Key Words: Carbonization (탄화), Laser Processing (레이저 가공), Polymer (폴리머), Pyrolysis (무산소 열분해), Thermal Degradation (열분해)

### 1. 서론

레이저의 직접 조사에 의한 정밀 재료가공 기술은 다양한 장점으로 넓은 산업영역에 응용되고 있다. 폴리머, 금속 및 세라믹에 이르기까지 다양한 재료와 레이저간 상호작용의 이해를 바탕으로 주로 드릴링(drilling), 그루빙(grooving)과 같이 재료 제거 공정 및 금속의 용융을 이용한 재료 접합 공정 등으로 그 범주는 지속적으로 발전하고 있다. 재료와 레이저 사이의 광반응은 레이저 빔이 가진

특성인 에너지 밀도(beam intensity), 펄스폭(pulse width), 파장(wavelength)과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 그 외에도 주변환경에 따라서도 상이한 반응을 보이게 된다. 특히, 폴리머 어블레이션과 관련된 연구에서는 열적 거동 및 주요한 화학적 반응 현상들이 규명되었다.<sup>1-5</sup> 그중에서 임계 어블레이션 플루언스보다 낮은 플루언스의 레이저가 폴리머에 조사될 시에는 열반응으로 인해 부분적으로 탄화가 발생하는 것으로 알려져 있다.<sup>6</sup> 일반적으로 폴리머는 일정 온도이상에서 열분해

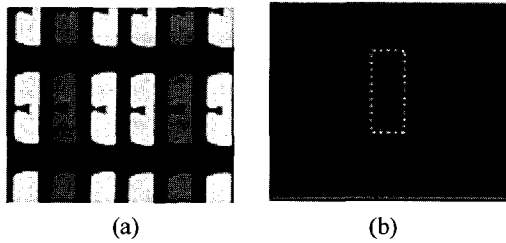


Fig. 1 Optical images of (a) an LCD C/F matrix and (b) a brightness pixel

(thermal-degradation)를 통해서 약한 화학결합이 끊어져 유실되는 반응이 일어난다. 특히, 무산소 환경에서 이루어지는 열분해 반응(pyrolysis)은 유기물의 기본 구성원소인 탄소로 구성된 비정질(amorphous) 또는 그래파이트(graphite) 형태의 결합물을 최종적으로 생성하게 된다.<sup>7-9</sup>



탄화된 폴리머는 원래 소재와 다른 광학적, 열적 특성을 가지게 되므로 레이저를 이용하여 부분적으로 폴리머 박막을 탄화시켜 그 성질을 이용하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 그 중에서 근래 시장 규모의 증가와 대형 디스플레이 제품의 생산으로 중요성이 더욱 부각되고 있는 LCD 제품에 발생하는 휘점(brightness pixel) 불량을 수리하는 기술이 국내의 특허를 통해 보고되었다.<sup>10,11</sup> LCD는 Fig. 1(a)에서와 같이 빨강, 녹색 그리고 파랑으로 구성된 C/F(color filter)층을 배사조명의 통과여부를 편광판과 액정(liquid crystal)을 이용하여 제어함으로써 화면을 구성하게 된다. 그런데, 제조공정상 발생하는 Fig. 1(b)와 같이 항상 밝게 보이는 휘점 불량이 발생하게 되는데 이러한 불량을 수리하기

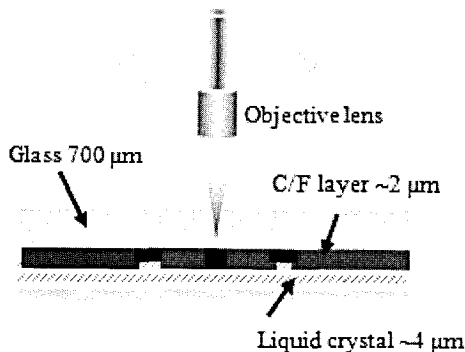


Fig. 2 Schematic diagram of carbonization process

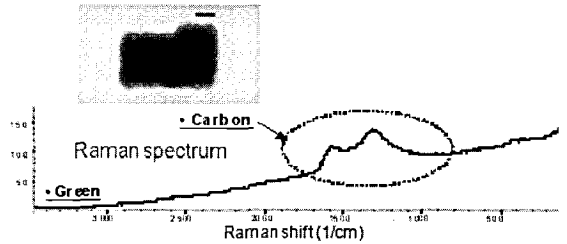


Fig. 3 Raman spectrum of carbonized C/F polymer for examining the generation of carbon bonds

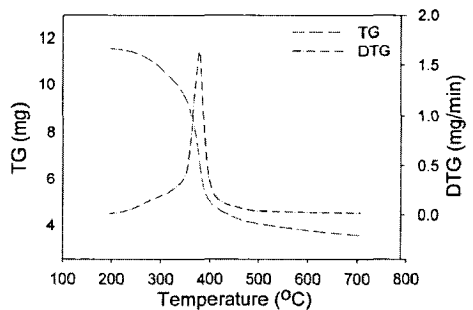


Fig. 4 TGA results for the polymer sample of green C/F

위해서 Fig. 2 와 같이 레이저를 C/F 층에 조사하여 탄화시키는 방법을 사용하게 된다.

C/F 층의 재료는 LCD 제조효율, 색상품질 및 투과성 등의 이유로 다양한 종류의 폴리머 재료와 색상을 표현하는 안료의 결합으로 구성되어 있다. 이러한 재료에 대한 열반응은 열무게분석(TGA)를 통하여 그 특성을 분석할 수 있다. 분당 10 °C씩 시료의 온도를 올리면서 일어나는 질량 변화를 측정 하였을 때, Fig. 4의 TG 에서와 같이 약 400 °C에서 급격한 열분해에 의한 무게 감소가 일어나는 것을 볼 수 있으며, 이러한 열분해의 결과물은 Fig. 3의 Raman spectrum 을 통하여 탄소 결합물이 생성되었음을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 연속파(continuous wave)에서부터 펨토초(femto-second) 펄스폭을 지니는 다양한 레이저를 실제 LCD C/F 층의 폴리머 박막에 조사 시 발생하는 현상의 특징에 관하여 기술하고, 각 레이저 광원의 펄스폭 및 파장 특성이 폴리머 박막의 탄화반응에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

## 2. 실험 및 수치모델링

### 2.1 실험장치 및 방법

각 레이저 광원을 Fig. 5 와 같이 Objective lens

를 이용하여 LCD 픽셀에 집속하여 조사하는 동시에 CCD 를 이용하여 가공 상황을 실시간 모니터링 할 수 있도록 실험장치를 구현하였다. 하나의 픽셀을 완전히 탄화 하기 위해서 컴퓨터와 연동된 2 축의 마이크로스테이지가 사용되었으며, ‘ㄷ’형태로 움직일 수 있도록 프로그래밍 되었다. 마이크로스테이지의 스캔속도는 10  $\mu\text{m/s}$  의 속도로 고정하였다. 연속파 레이저는 488 nm 의 파장을 가지는 Ar-ion 레이저를 대상으로 하였으며, 나노초 레이저는 532 nm 파장에 10 Hz 의 반복률을 가지는 2<sup>nd</sup> harmonic Q-switched Nd:YAG 레이저를 사용하였으며, 피코초 레이저는 532 nm 파장에 10 Hz 에 반복률을 가지는 mode-locked picosecond Nd:YAG 레이저를 대상으로 하였다. 또한, Ti:Sapphire 을 이용한 800 nm 파장의 91 MHz 고반복률 오실레이터와 800 nm 파장의 10 kHz 저반복률을 펄스 레이저를 대상으로 하였다. 각 광원을 Objective lens 를 이용하여 집속된  $\sim 6 \mu\text{m}$  직경의 빔 스팟을 만들었다. 또한, 각 광원이 조사되는 동안 난반사 및 시편의 표면반사가 CCD 에 미치는 영향을 줄이기 위해서 광원의 파장에 해당하는 노치필터(Notch filter)가 사용 되었고, Objective lens 와 함께 Tube lens 를 이용하여 LCD 픽셀을 가시화 하였다. LCD 내 C/F 층의 폴리머에 각 레이저가 조사될 때, 입사되는 레이저 에너지 대비 투과하는 레이저 에너지를 측정하여 투과율을 측정하였고, 실험적으로 각 레이저 광원에 대하여 레이저 강도를 달리하면서 탄화반응이 일어나는 임계 레이저 강도( $I_{th}$ )를 측정하였다. 그리고, FIB-SEM 을 이용하여 탄화된

픽셀의 단면을 관찰하였다. TFT 판과 액정을 제거한 시편에 집속된 이온빔을 C/F 층 방향에서 조사하여 너비 15  $\mu\text{m}$ , 폭 5  $\mu\text{m}$  을 가공하고, 시편을 기울여 단면의 SEM 결과물을 얻었다.

### 2.2 수치모델링

다양한 레이저 빔이 C/F 층에 조사될 때 온도 반응을 예측하기 위하여 1 차원 수치해석을 수행하였다. Fig. 6 과 같이 수치영역 및 경계조건을 설정하였고, 각 재료간 경계점의 격자 크기는 0.5 nm 수준으로 조밀하게 설정하여 급격한 온도변화에 대응하도록 하였다. 연속파~피코초 레이저의 경우, 지배방정식 및 관련식은 다음과 같다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q - j_c L_c \tag{1}$$

$$Q = (1-R)\alpha I_0 e^{-\alpha z} F(t) \tag{2}$$

$$F(t) = \begin{cases} -\frac{1}{\tau_p} |t - \tau_p| + 1 & 0 < t < 2\tau_p \\ 0 & 2\tau_p < t \end{cases} \tag{3}$$

$$j_c = N_0(1-n)k_0 e^{-\frac{E_a}{k_B T}} \tag{4}$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = (1-n)k_0 e^{-\frac{E_a}{k_B T}} \tag{5}$$

$$\vec{n} \cdot (k_g \nabla T_g - k_p \nabla T_p) = 0 \tag{6}$$

$$T_g = T_p = 300 \text{ K} \quad (t=0) \tag{7}$$

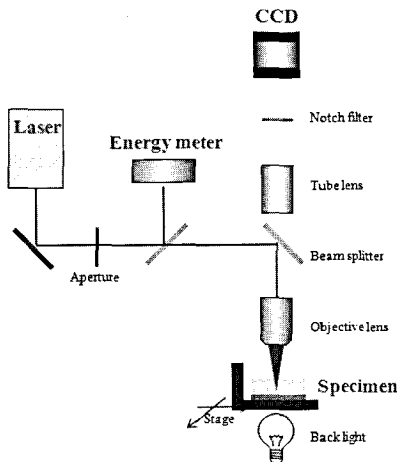


Fig. 5 Experimental setup

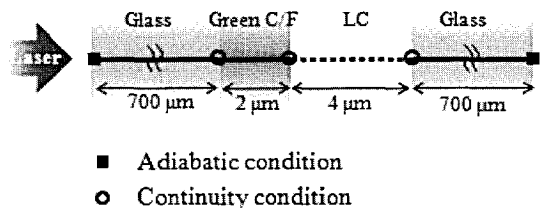


Fig. 6 Calculation domain and boundary conditions

Table 1 Material properties and parameters used in the calculation

$\rho_p$ (kg/m <sup>3</sup> )	885	$E_a$ (eV)	1
$C_{p,p}$ (J/kgK)	1466	$k_0$ (s <sup>-1</sup> )	$5 \times 10^{15}$
$k_p$ (W/mK)	0.15	$\sigma_{12}$ (m <sup>2</sup> )	$2.7 \times 10^{-23}$
$\rho_g$ (kg/m <sup>3</sup> )	2235	$\sigma_{23}$ (m <sup>2</sup> )	$2.7 \times 10^{-23}$
$C_{p,g}$ (J/kgK)	710	$t_{21}$ (ps)	30
$k_g$ (W/mK)	1.13	$t_{32}$ (ps)	70
$L_c$ (J)	$3 \times 10^{-18}$	$n_0$ (m <sup>-3</sup> )	$6 \times 10^{27}$
$N_0$ (m <sup>-3</sup> )	$6 \times 10^{27}$		

식(1)은 탄화를 고려한 에너지 평형식이다( $\rho$ : 밀도,  $C_p$ : 비열,  $t$ : 시간,  $T$ : 온도,  $k$ : 열전도도,  $L_c$ : 탄화잠열). 박막에 조사되는 레이저 빔의 흡수에 따른 발열량( $Q$ )은 식(2)와 같다( $R$ : 표면반사율,  $a$ : 광흡수계수,  $I_0$ : 레이저 출력). 식(3)에서  $F(t)$ 는 레이저 에너지의 시간 분포함수로  $\tau_p$  를 펄스폭(pulse width)으로 가지고 최대값이 1 이며  $2\tau_p < t$  에서 값이 0 이 되는 삼각파로 설정하였다. 한편, 온도에 따른 탄화 반응률( $j_c$ )은 Arrhenius 식의 형태로 식(4)를 통해서 계산되며,<sup>12,13</sup> 광흡수는 발색단(chromophore)에 의해서 이루어지고, 흡수된 열 에너지에 의해서 폴리머 단위체(monomer)의 분해는 식(5)와 같이 표현된다( $N_0$ : 초기 단위체 수 농도,  $n$ : 분해된 단위체 비율,  $k_0$ : pre-exponential 요소,  $E_a$ : 활성화에너지,  $K_B$ : Boltzmann 상수). 유리판의 양쪽 끝은 단열 경계조건을 적용하였고, 유리와 폴리머 경계면에서는 식(6)과 같이 유리판 온도( $T_g$ )와 폴리머 온도( $T_p$ )에 대해서 연속조건을 적용하였다. 식(7)과 같이  $t = 0$  의 초기조건은 상온 300 K 로 설정하였다.

$$Q = h\nu \left( \frac{n_2}{t_{21}} + \frac{n_3}{t_{32}} \right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} = -\alpha_{eff} I \quad (9)$$

$$I(0, t) = (1 - R) I_0 \times F(t) \quad (10)$$

$$\alpha_{eff} = \sigma_{12}(n_1 - n_2) + \sigma_{23}n_2 \quad (11)$$

$$\frac{\partial n_1}{\partial t} = -\frac{\sigma_{12}}{h\nu} I(n_1 - n_2) + \frac{n_2}{t_{21}} \quad (12a)$$

$$\frac{\partial n_2}{\partial t} = \frac{\sigma_{12}}{h\nu} I(n_1 - n_2) - \frac{\sigma_{23}}{h\nu} I n_2 - \frac{n_2}{t_{21}} + \frac{n_3}{t_{32}} \quad (12b)$$

$$n_1 + n_2 + n_3 = n_0 \quad (12c)$$

특히, 펨토초 레이저에 의한 폴리머 박막의 열전달 계산을 위해서는 식(8)의 발열량을 이용하며, 레이저 강도( $I$ )는 공간( $x$ )과 시간( $t$ )의 함수가 된다. 레이저 진행방향에 따른 광흡수는 식(9)와 같이 Beer 법칙에 의해서 표현되었으며, 박막 표면에서의 레이저 강도는 식(10)과 같다. 흡수계수는 발색단의 에너지 준위에 대한 분포에 따라 달라지게 되는데, 이러한 분포에 따른 유효 흡수계수는 식(11)과 같이 정의된다. 기존 연구에서 폴리머와 같은 비전도체와 펨토초 레이저 간의 상호작용은 에너지 준위를 3 단계로 구분하여 해석하는 방법이 알려져 있다.<sup>12,14</sup> 각 준위에 포함될 수 농도를  $n_1, n_2, n_3$  로 표현하였고, 레이저가 조사되면 바닥상태의  $n_1$  에서  $n_2$  로  $n_2$  에서  $n_3$  로 전이되는 것으로 가정하였다.  $\sigma_{12}, \sigma_{23}$  는 각 준위 사이의 천이확률을 나타내는 cross-section 이며,  $t_{21}, t_{32}$  는 각 천이에 해당되는 nonradiative relaxation time scale 이다. 여기에서 자극 방출(stimulated emission)은 무시되었으며, 식(12)로부터 레이저가 조사될 때 낮은 준위( $n_1 = n_0$ )에서 들뜬 상태(excited state)로 전이되는 양을 계산하였다( $h$ : Planck 상수,  $\nu$ : 진동수).<sup>12</sup>

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 LCD 픽셀 탄화

각 레이저를 픽셀에 조사하여 한 픽셀 전체를 탄화하면 Fig. 7 과 같이 배사조명을 차단하고 있는 픽셀 주변부의 BM(Black matrix) 수준으로 암점화된다. 각 레이저 별 탄화를 위해 필요한 에너지를 Table 2 와 같이 정리하였다. 이러한 녹색 C/F 층을 탄화하기 위한 실험적으로 측정된 임계레이저 출

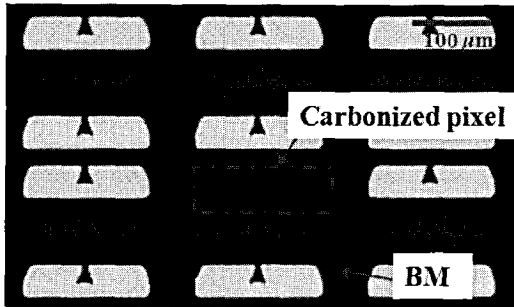


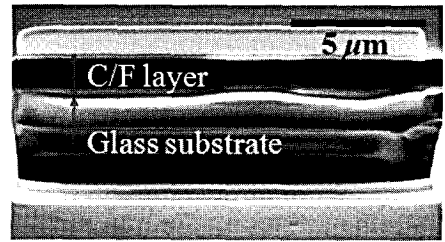
Fig. 7 Optical image of a carbonized pixel by a CW laser

력을 바탕으로 수치해석을 수행하였다. 탄화된 C/F 층의 단면을 살펴보면 Fig. 8 과 같이 레이저 광원에 따라서 상이한 결과가 나타난다. 탄화반응전의 C/F 층의 단면을 보게 되면 Fig. 8(a)와 같이 C/F 층이 1.7 μm 두께로 고르게 분포하고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 정상 픽셀이 연속파 레이저에 의해 탄화된 C/F 층의 단면은 Fig. 8(b)와 같다. 연속파 레이저의 경우 지속적인 가열로 인한 탄화반응으로 C/F 층 내부에 넓은 영역에 걸쳐 기공을 생성시킨다. 이러한 현상은 Fig. 8(c)에서와 같이 고반복률 펄스초 레이저의 경우에도 발생하게 된다. 이에 반해, 저반복률의 펄스초 레이저의 경우(고반복률의 펄스초 레이저와 비교시 높은 펄스당 에너지)에 Fig. 8(d)와 같이 작은 기공들이 고르게 생성되는 것을 확인할 수 있다. 단일 혹은 수 펄스의 고에너지 펄스초 빔에 의해서 C/F 층을 순간적으로 탄화하여 세밀한 기공을 가진 탄화층을 형성하는 것을 볼 수 있다.

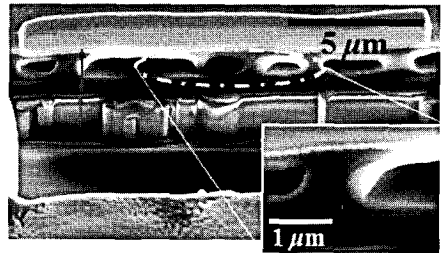
### 3.2 수치해석

#### 3.2.1 연속파 레이저

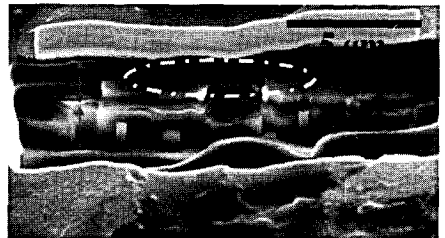
연속파 레이저가 폴리머 박막에 조사되었을 때의 온도 응답은 Fig. 9(a)와 같이 얻어진다.  $x = 0 \sim 2 \mu\text{m}$  에 폴리머 박막이 위치하고 있으며, 10 ns, 1 μs, 100 μs 각 시간에 따른 온도 분포의 변화를 나타내었다. ~100 μs 에서 탄화 예상온도 400 °C 에 충분히 도달하게 되는 것을 예상할 수 있으며, 탄화 가능한 온도조건에 이르기 위해서는 긴 시간이 필요하여 유리판 및 액정으로의 열전도 지속적으로 이루어진 온도 분포가 형성된다. 레이저 조사에 의해서 분해된 결합체 비율은 Fig. 9(b)와 같이 유리판과의 경계면보다 내부에 탄소 결합물이 상대적으로 많이 분포하게 됨을 예상할



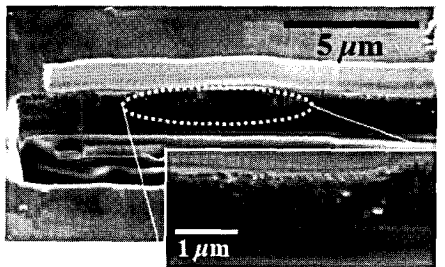
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 8 Cross-sectional SEM images of (a) a normal pixel and a carbonized pixels by (b) a CW laser, (c) a 91 MHz fs laser and (d) a 10 kHz fs laser

수 있다. 이러한 결과는 탄화 예상 온도에 도달하는 동안에 유리판으로 열전도가 발생하여 폴리머 박막의 중심부에서 최대 온도가 형성되기 때문이다.

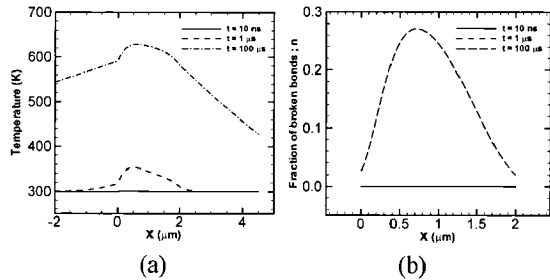


Fig. 9 Calculation results considering bond breaking effects for CW laser irradiation; (a) temperature distribution and (b) fraction of broken bonds ( $n$ )

### 3.2.2 나노초 및 피코초 레이저

낮은 반복율을 가지는 나노초와 피코초의 경우에는 펄스 중첩에 의한 온도상승이 일어나는 것이 아니라 단일 펄스에 의해 온도가 상승하고 동시에 탄화가 이루어지게 된다. 탄화 반응열을 제외하고 계산할 시에는 최대 온도가 수 천 K 가 되는 것으로 나타났으며 레이저가 조사되는 과정 중에 탄화 반응을 통해서 상당량의 에너지가 반응열로 소모 되는 것으로 생각된다. 탄화 반응열을 고려하여 계산한 결과는 Fig. 8 와 같이 나타났다. 한 펄스의 레이저가 조사된 이후에 온도결과는 Fig. 8(a), (c) 와 같이 나타났으며 다음 펄스가 들어오는 100 ns 후에는 충분히 식어서 온도 중첩이 일어나지 않는다는 것을 알 수 있다. 나노초와 피코초의 경우 유사한 형태로 열분해 결과가 얻어졌으며 연속파와 비교 시 평균적으로 분해된 비율이 크게 나타나며 표면에서 그 크기가 최대가 되는 차이점을 가졌다. 그리고, 연속파와 비교시 상대적으로 공간 분포가 균일하다는 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 488 nm 파장에 대해서는 광침투깊이(optical penetration depth)가 1.6  $\mu\text{m}$  인데 반하여 532 nm 파장에 대해서는 광침투깊이가 6.2  $\mu\text{m}$  이므로, 532 nm 파장을 가지는 나노초와 피코초 레이저의 경우에 체적 가열(volumetric heating)에 해당하는 가열 특성이 반영되어 x 방향 온도가 균일하게 나타난다. 또한, 수십 나노초 내에 탄화반응이 이루어지기 때문에 유리판으로의 열전도는 온도분포 및 분해 비율에 영향을 미치지 못하게 된다.

### 3.2.3 펨토초 레이저

펨토초 레이저의 경우에는 레이저 반복률의 차이에 따라서 다른 온도 결과가 나타난다. Fig. 9(a)와 같이 91 MHz의 반복률을 가지는 (펄스에너지

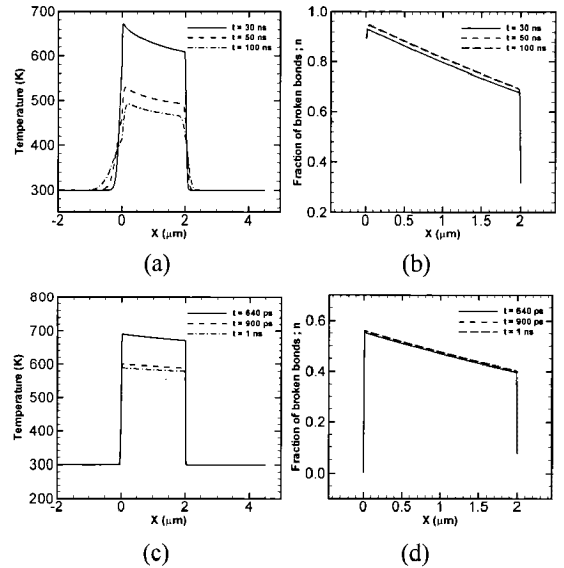


Fig. 10 Computation results considering the bond breaking: (a) temperature distribution, (b) fraction of the broken bonds after 1 ns laser pulse irradiation, (c) temperature distribution and (d) fraction of the broken bonds after 1 ps laser pulse irradiation

가 작은) 펨토초 레이저의 경우에는 중첩효과에 의해 펄스당 0.2 K 씩 온도가 상승하게 되고 약 10 ns 후에 다음 펄스가 조사되기 때문에 점진적인 온도상승을 하게 된다. 이러한 온도 상승폭으로 탄화 예상 온도(400  $^{\circ}\text{C}$ )에 도달하기 위해서는 20  $\mu\text{s}$  이상이 필요하며 연속파의 경우와 마찬가지로 유리판으로의 열전도에 의한 영향이 나타날 것으로 예상된다. Fig. 9(b)에서 10 kHz의 반복률을 가지는 펨토초 레이저의 경우에는 펄스당 150 K 온도상승이 이루어지고 다음 펄스가 조사되는 100  $\mu\text{s}$  이후에는 유리판으로의 열전도에 의해서 온도가 거의 초기온도 수준으로 낮아진다. 펄스당 10 K의 온도가 누적되므로 반복되는 펄스에 의해서 탄화 예상 온도에 도달할 수 있지만, 펄스 수가 작은 경우 펄스 중첩효과에 의한 탄화는 일어나지 않는다. 10 kHz 펨토초 레이저의 경우, 펄스가 조사되는 순간에 상당 수준의 온도 상승이 일어나므로 나노초나 피코초 레이저와 유사한 탄화특성을 지니게 된다. 즉, 탄화가 상대적으로 균일하게 일어난다. 이러한 현상은 특성은 Fig. 8(d)의 C/F 층의 단면에 기공이 조밀하게 형성된 것에 부합되는 결과이다.

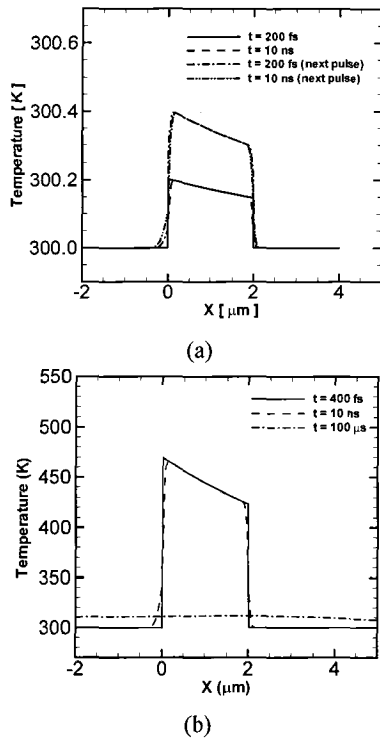


Fig. 11 Temperature distributions by fs lasers: (a) 91 MHz,  $6.0 \times 10^{13} \text{ W/m}^2$  and (b) 10 kHz,  $3.0 \times 10^{16} \text{ W/m}^2$

본 연구에 이용된 조사도 수준에서는 온도 상승률이 크지 않으므로 다광자 효과에 의한 폴리머 분해는 일어나지 않으며 나노초 및 피코초와 같이 열분해 현상에 의해 주로 탄화 기작이 일어나는 것으로 추정된다.

#### 4. 결론

레이저에 의한 폴리머 재료의 열분해 현상을 응용한 LCD 휘점 불량률의 수리 기술은 비접촉적이고 선택적인 레이저 정밀가공의 특성을 잘 반영하고 있다. 본 연구에서는 다양한 레이저 광원에 의한 LCD C/F 폴리머 박막에 탄화현상을 위한 임계 레이저 파워를 실험적으로 측정하고, 한 픽셀을 압점화 할 수 있음을 확인 하였다. 또한, 1 차원 수치계산을 통하여 각 레이저가 조사될 때의 열전달 특성을 분석하였다. 온도 변화와 함께 폴리머 단위체의 분해된 양을 계산하여 박막내의 탄화된 양의 분포를 예측하였다. 수치 결과로부터 레이저의 종류에 상관없이 시편의 온도가 탄화온도에 도달

하면 탄화가 가능함을 확인하였다. 하지만 구체적인 탄화반응은 각 레이저의 펄스 폭과 파장 특성에 따라서 차이를 보인다. 연속파 레이저의 경우, 주변으로의 열전도 때문에 균일한 온도분포를 가지기 어려운 것으로 나타났다. 펄스 레이저의 경우에는 단일 펄스에 온도가 충분히 상승하여 탄화반응을 일으키고, 주변으로의 열전도가 일어나기 전에 분해반응이 끝나기 때문에 상대적으로 균일한 탄화가 가능하였다. 펄스초 레이저 중 높은 반복률을 지닌 저출력 광원의 경우에는 펄스당 에너지가 낮아서 펄스 중첩에 의해 온도가 상승하는 연속파 레이저와 유사한 특성을 보였으며 주변부로의 열전도 현상도 두드러졌다. 또한 실험적으로도 단면에 큰 기공이 형성되는 유사한 특성을 나타내었다. 반면 낮은 반복률을 지닌 상대적으로 고출력 레이저의 경우에는 펄스당 에너지가 높아서 나노초 및 피코초의 경우처럼 펄스의 중첩의 영향보다 단일 펄스에 의한 탄화가 일어나는 것으로 추정되었다. 실험적으로도 높은 펄스 에너지로 순간적으로 탄화하여 단면에 기공이 조밀하게 생성시키는 것을 확인할 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 ㈜LG Display 와 한국연구재단 중견연구자지원사업(핵심연구)의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Srinivasan, R., "Pulsed ultraviolet laser interactions with organic polymers-dependence of mechanism upon laser power," *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 43, No. 1, pp. 101-107, 1993.
2. Lippert, T. and Dickinson, J. T., "Chemical and spectroscopic aspects of polymer ablation: Special features and novel directions," *Chemical Reviews*, Vol. 103, No. 2, pp. 453-485, 2003.
3. Paterson, C., Holmes, A. S. and Smith, R. W., "Excimer laser ablation of microstructures: A numerical model," *J. Applied Physics*, Vol. 86, No. 11, pp. 6538-6546, 1999.
4. Dyer, P. E., "Excimer laser polymer ablation: twenty years on," *Applied Physics A: Material Science & Processing*, Vol. 77, No. 2, pp. 167-173, 2003.

5. Mansour, N. and Jamshidi-Ghaleh, K., "Modeling of pulsed ultraviolet laser-induced ablation of polymers," *J. Physics D: Applied Physics*, Vol. 38, No. 6, pp. 852-856, 2005.
6. Metayer, P., Davenas, J. and Bureau, J. M., "Ablation and carbon deposition induced by UV laser irradiation of polyimide: Application to the metallization of VIAs in high density printed circuit boards," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, Vol. 185, No. 1-4, pp. 156-162, 2001.
7. Perng, L. H., "Thermal degradation mechanism of poly(arylene sulfone)s by stepwise Py-GC/MS," *J. Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, Vol. 38, No. 3, pp. 583-593, 2000.
8. Spozhnikova, T. S. and Mirzoev, A. A., "Ab initio simulation of the electronic structure of poly(vinylidene fluoride) during carbonization," *Physics of the Solide State*, Vol. 50, No. 6, pp. 1191-1194, 2008.
9. Castro-Muniz, A., Martinez-Alonso, A. and Tascon, J. M. D., "Modification of the pyrolysis/carbonization of PPTA polymer by intermediate isothermal treatments," *Cabon*, Vol. 46, No. 7, pp. 985-993, 2008.
10. Kim, Y. I. and Shim, C. S., "Method of repair an Liquid Crystal Cell, method of manufacturing Liquid Crystal Display Device using the same, and Liquid Crystal Display repaired using the same," Korea Patent, No. 10-2005-0085856, 2005.
11. Nemeth, P. R., "Photo ablation to resolve "bright on" pixel defects in a normally white LCD," US Patent, No. 2001-770854, 2001.
12. Bityurin, N. and Malyshev, A., "Bulk photothermal model for laser ablation of polymers by nanosecond and subpicosecond pulses," *J. Applied Physics*, Vol. 92, No. 1, pp. 605-613, 2002.
13. Arnold, N. and Bityurin, N., "Model for laser-induced thermal degradation and ablation of polymers," *Applied Physics A*, Vol. 68, No. 6, pp. 615-625, 1999.
14. Peled, A., "Photo-excited processes, diagnostics and applications," Kluwer Academic Publishers, pp. 145-152, 2003.