

펨토초 레이저를 이용한 평판 디스플레이 유리기판 절단 연구

김 광 열[†]

한양대학교, 전자통신 컴퓨터공학부

Femto-Second Laser Glass Cutting for Flat Panel Display

Kwang-Ryul Kim[†]

Department of Electronics & Computer Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, South Korea

(2007년 12월 28일 접수 : 2008년 4월 28일 채택)

Abstract A laser glass cutting system using a femto-second laser was evaluated for Flat Panel Display (FPD) glass. A theoretical analysis of the ablation threshold and depth is described using an explicit analytic form. Experiments for clean and deep grooves were performed using a 3W femto-second laser, and the relationships between the input energy and the scribing depth as well as the threshold energy are presented. Mechanical breaking after the scribing process was carried out and the results are compared with a theoretical method. It was found that a two-sided LCD panel glass can be cut clearly using the laser cutting method. The methodology was found to be very effective as a mass-production cutting system.

Key words Femto-Second Laser, Laser Glass Cutting, Flat Panel Display.

1. 서 론

일반적으로 레이저 가공에 있어서 펄스 폭이 짧으면 열 영향이 적어져서 상대적으로 깨끗한 가공 면을 얻을 수 있다. 기존의 나노 초(nano second) 레이저에 비해 피코 초(pico second) 레이저는 펄스 폭이 상대적으로 짧아서 재료가공에 있어서 열 손상을 적게 받는 장점이 있다. 하지만 전기 및 전자 재료 중에는 피코 초 레이저를 사용하여도 깨끗한 가공 면을 얻기 힘든 경우가 많다. 또한 레이저의 파장에 따라서 일부 재료는 가공이 불가능한 경우도 있고 가공성이 매우 떨어져서 산업용으로는 적합하지 않은 사례들도 존재한다. 하지만 티타늄 사파이어(Ti-Sapphire)를 레이징(Lasing) 물질로 사용하는 펨토초 레이저는 10^{-15} 초 근방의 매우 짧은 펄스 폭을 가지기 때문에 재료를 가공해도 거의 열손상이나 구조변화를 일으키지 않는다. 펨토초 레이저는 일반적으로 790 nm 정도의 파장영역을 가지고 있으며 침투 출력이 아주 높고 투명한 평판 디스플레이 유리기판이라도 다 광자 흡수 과정에 의하여 레이저 광의 흡수가 일어나므로 쉬운 가공 및 절단이 가능하다. 하지만 펨토초 레이저 펄스 폭이 100 펨토초 정도로 쿨롱충돌(Coulomb Collision)에 의해 전자로부터 이온으로 에너지가 전달되는 시간보다 짧아 기존의 유체역학적 해석을 적용할 수가 없기 때문에 해

석적, 수치적 측면에서 분석이 쉽지 않다.¹⁾

평판 디스플레이 유리 기판은 소다라임(Sodalime) 또는 보로실리케이트(Borosilicate) 등을 주로 사용하는데 레이저 빔의 형상을 타원형태로 만든 CO₂레이저를 이용하여 유리기판을 국부적으로 가열하고 바로 뒤에 액체 또는 기체 냉각제를 이용하여 급격하게 냉각시킴으로써 열 충격(Thermal Shock)을 이용, 블라인드 크랙(Blind Crack)을 형성시킨 후 기계적 파단 공정을 통해 절단을 하는 방법이 일반적이다.²⁻⁵⁾ 레이저를 이용한 FPD 유리 기판의 절단은 기존의 다이아몬드 휠을 이용한 공정보다 절단면이 깨끗하고 유리 부스러기를 발생시키지 않는 장점이 있다.⁶⁾ 본 논문은 레이저와 재료간의 상호 작용을 고려하여 가공성능이 우수한 펨토초 레이저를 이용하여 평판 디스플레이 유리기판을 실험하였고 재료의 가공 특성 및 유리기판의 스크라이빙(scribing) 깊이와 가해진 펨토초 레이저의 에너지와의 상관 관계를 제시하였다. 또한 스크라이빙 된 유리기판을 기계적으로 파단 하여 절단면의 품질을 조사하였고 LCD 상 하판 유리기판이 합착된 합착판 절단 시 100% 양산 수율을 달성하기 위한 펨토초 레이저를 이용한 공정을 제시하였다.

2. 이 론

2.1 극초단 펄스 레이저와 재료간의 상호작용

일반적으로 Nd:YAG레이저나 CO₂레이저를 이용하여 하

[†]Corresponding author

E-Mail : drkkim@hanyang.ac.kr (K. R. Kim)

나의 원자를 고체 표면으로부터 어블레이션(ablation) 시키기 위해서는 그 원자 결합에너지 보다 더 높은 에너지를 재료 표면에 전달해 주어야 하고, 만약 더 짧은 펄스 에너지를 가지고 같은 양의 재료를 가공하기 위해서는 더 많은 레이저 에너지가 그 짧은 펄스에 실려있어야만 한다. 이 에너지의 양은 펄스 폭과 대략적으로 반비례하는 관계를 가진다.¹⁾ 예를 들면 100 나노 초 펄스에 실린 에너지를 이용하여 재료를 가공하기 위해 $10^8 \sim 10^9 \text{ W/cm}^2$ 의 레이저 강도가 필요하다고 할 때 100 펨토초 펄스를 고려한다면 대략 $10^{13} \sim 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 의 에너지 강도가 필요하다. 우리가 흔히 사용하는 피코 초나 나노초 레이저를 이용하여 금속재료를 가공하는 것은 아주 낮은 에너지에서도 가능하다. 하지만 투명한 평판 디스플레이용 유리 기판은 흡수율이 아주 낮아서 금속재료 가공시 적용되는 에너지로는 가공이 불가능하다. 하지만 펨토초 레이저의 펄스에 실리는 $10^{13} \sim 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 의 에너지 강도를 유리 재질에 조사했을 시 레이저 펄스의 극 초기 단계에서 재료의 full single ionization 이 발생하게 된다. 그 이후 레이저 에너지는 Inverse Bremsstrahlung 과 resonance absorption mechanism에 기인한 자유 전자들에 흡수된다. 이러한 현상은, 금속 재질 또는 유리 기판과 같은 특정 재료의 초기상태에 의존하지 않기 때문에 재질에 관계없이 유사한 재료-레이저 상호작용이 일어나게 된다. 또한 서론에서 언급한 바와 같이 기존의 유체역학적 해석방법의 적용이 불가능하기 때문에 기존에 피코 초 및 나노초 레이저와 재료간의 상호작용 분석에 사용되었던 모든 이론적, 수치적 해석 방법을 그대로 적용하기가 어렵다.¹⁾

펨토초 레이저와 재료간의 상호 작용에 관계하는 힘은 전하분리의 전기에너지에 기인한 힘과 판데르모티브(Ponderomotive) 힘으로 설명할 수 있다. 전하분리는 전자들에 의해 흡수된 에너지가 대략 결합 에너지와 일 함수(Work Function)의 합인 페르미 에너지보다 높아지는 시점에서 일어나게 되고 전자들이 타겟에서 탈출할 수 있게 된다. 전하분리에 의한 전기장이 타겟으로부터 이온들을 잡아당기고 동시에 재료의 표면 층에 레이저장(laser field)의 판데르모티브 힘은 전자들을 타겟 깊이 밀어 넣는다. 결과적으로 위의 두 가지 작용이 타겟으로의 이온가속을 위한 메커니즘을 생성한다.¹⁾ 이와 같은 펨토초 레이저에 의한 재료 어블레이션 메커니즘은 긴 펄스에 의한 열 어블레이션과는 판이하게 다르다. 따라서 2.2 장에서는 기존의 열 전달 방정식이나 Navier-Stokes 방정식이 적용 가능한 피코 초 레이저와 재료간의 상호작용에 관한 해석적 모델을 제시하고, 극초단 레이저 에너지와 재료간의 상호작용을 기술하는 간단하면서 직접적인 해석 모델을 이용하여 평판유리기판의 어블레이션 메커니즘을 설명하고 이를 바탕으로 어블레이션 역치(threshold) 에너지를 계산한다.

2.2 레이저를 이용한 평판 디스플레이 유리의 어블레이션 역치 플루언스 계산 모델

레이저 펄스 주기가 10 피코초보다 큰 종래의 일반적인 UV레이저를 FPD 평판유리에 조사하였을 때에는 열 전달과 유체역학적 운동을 가지고 어블레이션 프로세스를 설명할 수 있다. 이 경우 전자들과 이온들이 레이저 펄스의 초기부터 평행상태에 놓여지게 되고 어블레이션 역치는 “레이저 펄스 동안 열 확산 깊이의 두께 내에서 흡수된 에너지가 분자 결합을 깨기 위한 에너지로 완전히 바뀌는데 필요한 상태”로 정의될 수 있다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.¹⁾

$$AI_0t_p \cong (\kappa t_p)^{1/2} \epsilon_b n_a \quad (1)$$

여기서 A 는 흡수 계수, $I_0 = cE^2/4\pi$ 는 입사되는 레이저 에너지 밀도, t_p 는 레이저 펄스 주기, κ 는 열 확산 계수, ϵ_b 는 이온들의 결합 에너지, 그리고 n_a 는 원자들의 수밀도(Number density) 이다. 위의 식으로부터 기존의 레이저를 이용하였을 경우 어블레이션 플루언스(fluence)를 구하면 다음과 같이 표현할 수 있다.¹⁾

$$F_{th} \approx \frac{(\kappa t_p)^{1/2} \epsilon_b n_a}{A} \quad (2)$$

펨토초 레이저를 가지고 평판 디스플레이 유리기판을 가공했을 때 어블레이션이 발생하는데 이는 또한 다음과 같이 설명될 수 있다. 펨토초 레이저 펄스를 유리기판에 조사하였을 때 유리기판의 표면에서 자유전자들은 재료로부터 탈출에 필요한 충분한 에너지를 얻는다. 재료표면을 떠난 고 에너지의 전자들은 parent ions 과 전하분리에 의해 강력한 전기장을 형성한다. 이 전기장의 세기는 전자의 운동에너지에 직접적으로 의존하며 만약 일차원적 팽창으로 가정하면 유리기판의 법선을 따라 전자밀도의 기울기에 의존하며 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$E_a = \frac{\epsilon_e(t) \delta \ln n_e}{e} \frac{\delta z}{\delta z} \quad (3)$$

여기서 ϵ_e 는 전자 운동 에너지이고 전자 온도 T_e 와 일 함수(Work Function) ϵ_{esc} 의 차로 나타낸다. 또한 n_e 는 자유전자들의 수밀도(number density)이고 z 는 표면으로부터의 깊이이다. 위에 언급된 바와 같이 펨토초 레이저 펄스 중에 이온들에 가해지는 또 하나의 힘은 유리기판의 전기장내의 판데르모티브 힘이다. 여기서 공간 전하의 정전기장에 존재하는 정전기력과 레이저 파동내의 판데르모티브 힘을 펨토초 레이저 펄스의 말단부에서 비교하면 유리기판의 경우 어블레이션 역치를 계산할 시 판데르모티브 힘을 무시할 수 있다. 하지만 펨토초레이저 펄스의 전반부에서는 정전기력과 판데르모티브 힘 모두 같은 크기의 자릿수(order of magnitude)를 가지므로 계산시 전

자에너지를 고려해 주어야만 한다. 고체표면으로부터 전자가 탈출하기 위한 최소의 에너지는 일 함수와 같아야 하고 이온을 타깃으로부터 끌어내기 위해서는 전자는 반드시 이온 결합 에너지보다 같거나 큰 추가 에너지를 가지고 있어야만 한다. 어블레이션 역치(Threshold)를 계산하기 위한 에너지 조건을 구하기 위해 표면 층 l_s 에서의 흡수에 기인한 전자 에너지 또는 전자 온도의 변화에 대한 에너지 보존 방정식을 시간과 공간에 대해 적분하면 다음과 같이 전자온도 T_e 를 표현하는 식을 얻을 수 있다.

$$T_e = \frac{4AI_0t}{3l_s n_e} \exp\left\{-\frac{2x}{l_s}\right\}, \quad T_e \approx \varepsilon_F \quad (4)$$

여기서 ε_F 는 페르미(Fermi) 에너지이다. 어블레이션 역치는 전자에너지가 $d \ll l_s$ 인 표면 층에서, 한 레이저 펄스의 말단부에서의 원자 결합 에너지와 이온화 포텐셜의 합과 같다고 하면 구할 수 있다.¹⁾ 일반적으로 극초단 레이저와 재료간의 상호작용에서 유리의 어블레이션 역치는 금속보다 커서 추가적인 에너지가 필요하며 이는 이온화 포텐셜로 알려져 있다. 이를 고려하여 유리재료의 어블레이션 역치를 구하는 에너지 조건을 구하면 다음과 같다.

$$\varepsilon_e = \varepsilon_b + J_i = \frac{4AI_0t_p}{3l_s n_e} \quad (5)$$

여기서 J_i 는 이온화 포텐셜(ionization potential)이다. 결론적으로, 평판 디스플레이 유리기판의 어블레이션을 위한 레이저 플루언스 역치를 정의하면 다음과 같다.

$$F_{th}^{glass} \equiv I_0 t_p = \frac{3}{4}(\varepsilon_b + J_i) \frac{l_s n_e}{A} \quad (6)$$

파장이 790 nm 에서 아래의 매개변수로 레이저 역치 플루언스를 추정하면⁸⁻⁹⁾($n_e \approx 7 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$, $(\varepsilon_b + J_i) \approx (3.7 + 13.6) \text{ eV}$, $l_s/A \approx 1.33 \times 10^{-5} \text{ cm}$), 평판 유리의 플루언스 역치는 1.9 J/cm^2 이다. 이 수치는 이전에 피코 초 이하 레이저 실험결과와 잘 일치한다.⁸⁻⁹⁾ 펨토초 레이저를 가지고 위의 레이저 어블레이션 역치에 가까운 플루언스로 홀을 가공하였을 때 크레이터의 깊이는 스킨 깊이와 같은 오더를 갖는다. 위의 식(5)에 따르면, 어블레이션 깊이는 타깃 재료 내에서 입사하는 전기장과 전자온도가 기하급수적으로 감소하기 때문에 플루언스에 따라 로그함수적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

$$d_{ev} = \frac{l_s}{2} \ln \frac{F}{F_{th}} \quad (7)$$

위의 식(7)과 비교하여 실험결과를 Fig. 2에 제시하였다. 비록 위의 식들이 생략산 (Approximation)에 의해 유도 되었지만 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

3. 실험 방법

본 실험에 사용된 레이저는 Quantronix사의 펨토초 레이저로 최대출력 3 W 이다. 이 펨토초 레이저는 펄스 에너지가 3.5 mJ/ 1 kHz 이고 펄스 주기는 100 fs 그리고 사용된 빔의 직경은 8 μm 그리고 빔의 모드는 TEM00 가우시안(Gaussian) 모드를 사용했으며 빔 품질은 1.8 이하이다. 사용된 레이저의 광학계 배치는 Fig. 1에 표시하였다. 펨토초 레이저로부터 발생된 에너지는 셔터(SH)와 ND 필터(Neutral Density Filter) 그리고 조리개를 지나서 두 개의 반사경을 통해서 빔 분리기로 이송된다. 빔 분리기에서는 실시간 관찰을 위해서 CCD로 일정한 양의 에너지를 보내주고 대부분의 에너지는 20배의 대물렌즈에 의해 대상물 표면에서 초점이 맺히게 된다. 이 시스템에 평판 유리 재료를 놓고 다양한 에너지와 스크라이빙 속도를 가지고 실험을 진행할 수 있다. 본 장비의 특성상 ND 필터를 사용하여 레이저 에너지를 제어하였기 때문에 이 실험에서는 펄스당 다음과 같이 여섯 종류의 플루언스를 이용하였다. 실험에 사용된 레이저 플루언스는 0.12 J/cm^2 , 0.76 J/cm^2 , 3.18 J/cm^2 , 13.9 J/cm^2 , 67.7 J/cm^2 , 181 J/cm^2 이다.

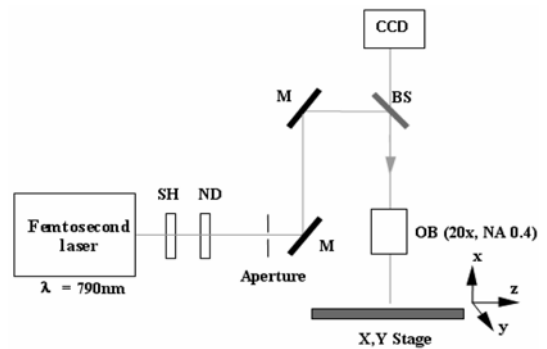


Fig. 1. Schematics of the femto-second laser system.

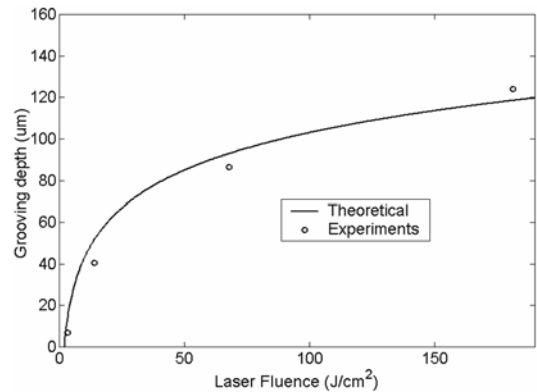


Fig. 2. Comparison between theoretical and experimental results of grooving depth according to laser energy fluence.

4. 결과 및 고찰

기존의 355 nm 또는 266 nm의 UV 레이저를 이용한 유리 스크라이빙에 대한 연구는 이미 많이 진행이 되었지만 아직 본격적으로 양산에 적용할 만한 단계에는 미치지 못하고 있다. 특히 평판 디스플레이에 적용되는 공정들은 상판과 하판을 만들어 이를 합착시키고 합착판 유리 기판을 절단하는 과정을 거치고 있지만 아직까지 레이저를 이용한 공정으로는 만족할 만한 결과를 얻지 못하고 있다.⁶⁾ 이에 주안점을 두고 유리에 대해 가공 성능이 뛰어난 극초단 펄스 주기를 갖는 펨토초 레이저를 이용하여 평판 디스플레이 유리 기판을 스크라이빙하고 기계적으로 파단(Breaking) 하는 실험들을 진행하였다. 기본적인 특성을 분석하기 위하여 스캔 속도 1 mm/s로 1차 실험을 진행하였고 그에 따른 결과를 분석하였다. 식 (7)에 의하면 어블레이션 깊이는 타겟 재료 내에서 입사하는 전기장과 전자 온도가 기하급수적으로 감소하기 때문에 플루언스에 따라 로그함수적으로 증가하는 것으로 예측된다. 역치 에너지 이상의 플루언스에서 어블레이션 깊이의 변화를 나타내는 실험 결과와 이론 식을 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. 이 그림에서 제시된 실험 결과는 조사된 에너지 밀도에 따른 가공 V자 형태의 홈의 깊이를 나타내주고 있다. 역치 플루언스 이상에서 장비의 출력 제어에 따른 제약상 4개의 실험 포인트만 제시 되었지만 이론적인 그래프와 잘 맞는 것이 확인되었다. 또한 레이저 스캔 횟수에 따른 V자 형 홈의 깊이를 분석하였고 이를 Fig. 3에 표시하였다. 1회부터 7회까지의 레이저 스캔 후 각 샘플의 깊이를 측정하였으며 이 깊이는 스캔 횟수와 정비례하여 증가하는 것이 확인되었다. 그러나, 레이저의 심도를 실시간으로 바꾸어주면서 가공을 한다면 이 깊이는 더 깊어질 것으로 예상된다. Fig. 4(a) 결과는 레이저 플루언스 181 J/cm², 속도 1 mm/s의 속도로 평판 디스플레이 유리를 7회 스크라이빙 한 후 기계적인 파단으로 절단한 결과이다. 펨토초 레이저는 그림의

아래쪽에서 조사되었고 기계적 파단은 큰 힘이 들지 않을 정도로 아주 쉽게 이루어 졌다. 하지만 그림의 중앙에 보는 것처럼 단면이 깨끗하지 못하게 절단이 되었고 이는 이 논문에서의 실험 방법이 CO₂ 레이저를 이용한 결과에 비해 절단면이 깨끗하지 않음을 보여준다. 또한 Fig. 4(b)는 레이저 플루언스 3.18 J/cm², 속도 1 mm/s로 1회 스크라이빙 한 결과의 단면 사진이며 V자 형태의 홈 맨 아래쪽에 미세 크랙이 발생된 것을 볼 수 있다. 이러한 미세 크랙을 줄이거나 없애기 위해 스캔 속도를 높이는 2차 실험이 수행되었고 그 결과는 Fig. 5에 제시하였다. 5 mm/s의 스캔 속도로 스크라이빙 후 기계적 파단 공정을 거친 샘플에 대한 결과는 Fig. 5의 (a), (b)에 제시하였고 현재 실험 장비의 최대 스캔 속도인 20 mm/s로 실험한 결과는 그림의 (c), (d)에 나타내었다. 이 실험에서 레이저 에너지의 펄스 출력은 650 mW를 이용하였고 유리 기판의 두께는 LCD(Liquid Crystal Display)용 유리 기판의 표준인 0.7 mm를 이용하였다. 먼저 1 mm/s를 기준으로 스캔 속도를 5배 증가시켰을 때의 결과를 20배 증대시켰을 때와 비교하면 미세 크랙의 발생이 현저하게 줄어든 것을 볼 수 있다. 하지만 스캔 속도를 실험 장비의 최대치로 하였을 경우에도 매우 깨끗하게 절단할 수

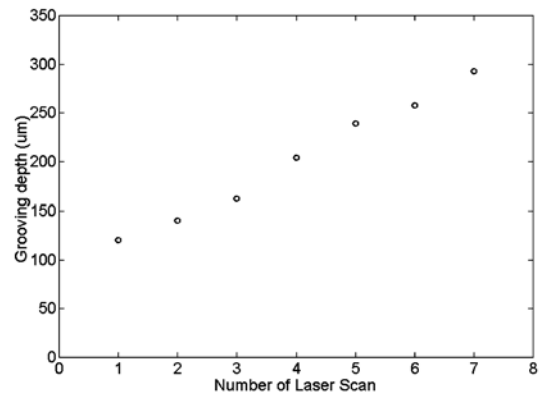
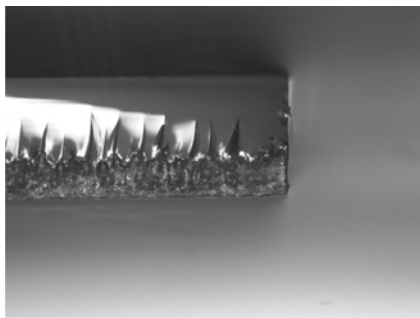
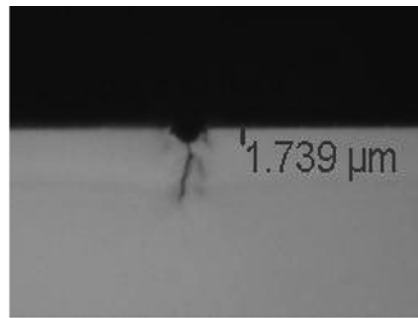


Fig. 3. Grooving depth according to number of laser scan



(a)



(b)

Fig. 4. Microcracks of the single glass after mechanical breaking (a) and cross-sectional view of the scribing side after one pass laser scan (b).

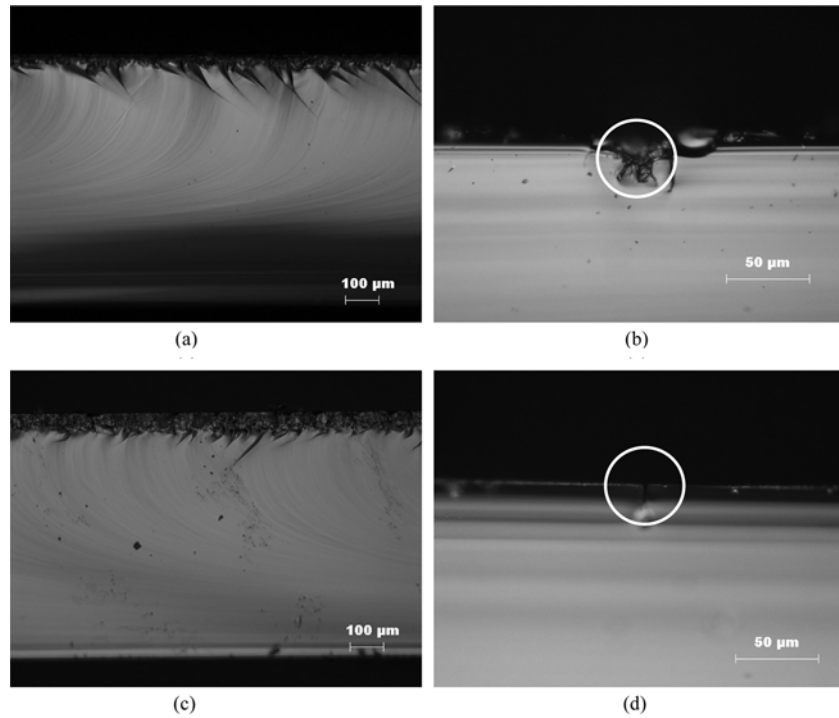


Fig. 5. Cross-sectional view of mechanical breaking after femto-second laser scribing (glass thickness = 0.7 mm, scanning speed of 5 mm/s (a), side view of the 5 mm/s speed groove (b), scanning speed of 20 mm/s (c), side view of the 20 mm/s speed groove (d)).

없었고 이를 위해 계속적으로 추가 연구가 필요함을 알 수 있었다. 이를 위해 레이저로 평판 유리의 모서리를 다듬는 공정이 연구되고 있으나 아직 실용화 단계에는 미치지 못하고 있다. 하지만 평판 유리의 절단 공정 후 항상 필요 시 되는 모서리 연삭(edge grinding) 공정을 거치면서 평판유리의 공정단면은 최종 제품에 적용이 가능하도록 다듬어 진다. 최종적으로 Fig. 6의 (a), (b)에서는 스캔 속도 1 mm/s 에서 4회 및 6회 레이저 에너지 스캔 후 기계적으로 절단한 샘플의 단면을 SEM 사진으로 제시하였으며 아래의 (c)에는 절단면의 모서리(edge) 품질을 보기 위해 4회 스캔 후 절단한 샘플의 모서리 사진을 제시하였다. 또한 최종적으로 Fig. 6의 (d)에는 합착판 샘플을 가지고 시험한 결과가 제시되었다. 합착판의 경우 펄토초 레이저로 스크라이빙 후 기계적 파단 과정을 거치면 기존의 블라인드 크랙 형성에 의한 레이저 절단 법에 비해 절단면의 품질은 상대적으로 좋지 않았으나 100% 직선 절단이 가능하였으며 기존 공정과 마찬가지로 모서리 연삭과정을 거치면 양산적용이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

레이저와 재료간의 상호 작용을 고려하여 유리 재질에 가공성능이 우수한 펄토초 레이저를 이용하여 평판 디스

플레이 재료의 가공 특성 및 유리기판의 스크라이빙 깊이와 가해진 펄토초 레이저의 에너지와의 상관 관계를 제시하였다. 분석적 측면에서는, 기존의 열 전달 방정식이나 Navier-Stokes 방정식이 사용 가능한 피코 초 레이저와 재료간의 상호작용에 관한 해석적 모델을 제시하고, 극초단 레이저 에너지와 재료간의 상호작용을 기술하는 간단하면서도 직접적인 해석 모델을 이용하여 평판유리기판의 어블레이션 메커니즘을 설명하고 이를 바탕으로 어블레이션 역치 에너지를 계산하여 가공 깊이를 계산하는 모델을 제시하였다. 또한, 다양한 레이저 에너지 스캔 속도에서의 실험 결과를 제시하고 그 결과를 분석하였으며 절단 품질에 관계되는 요소들을 분석하였다. 이는 기존의 레이저 공정 시 자주 발생하는 절단하고자 하는 면에서 벗어나서 불량률 유발하는 레이저 평판유리 절단의 문제점을 근본적으로 해결하였다는 점에서 큰 의미를 가진다고 할 수 있다. 결론적으로, 다양한 변수들로 스크라이빙 된 유리기판을 기계적으로 파단 하여 절단면의 품질을 조사하였고 LCD 상판용 유리기판 및 하판이 합착된 합착판 절단시 100% 수율을 달성하기 위한 펄토초 레이저를 이용한 공정을 제시하였다.

실험에 사용된 펄토초 레이저가 초당 1000회의 펄스를 생성하고 이를 스캔을 하면서 조사하였기 때문에 가공면에 불연속적인 면이 존재하였고, 스크라이빙 시 많은 열 에너지가 발생하기 때문에 상온에서 가공된 유리기판에

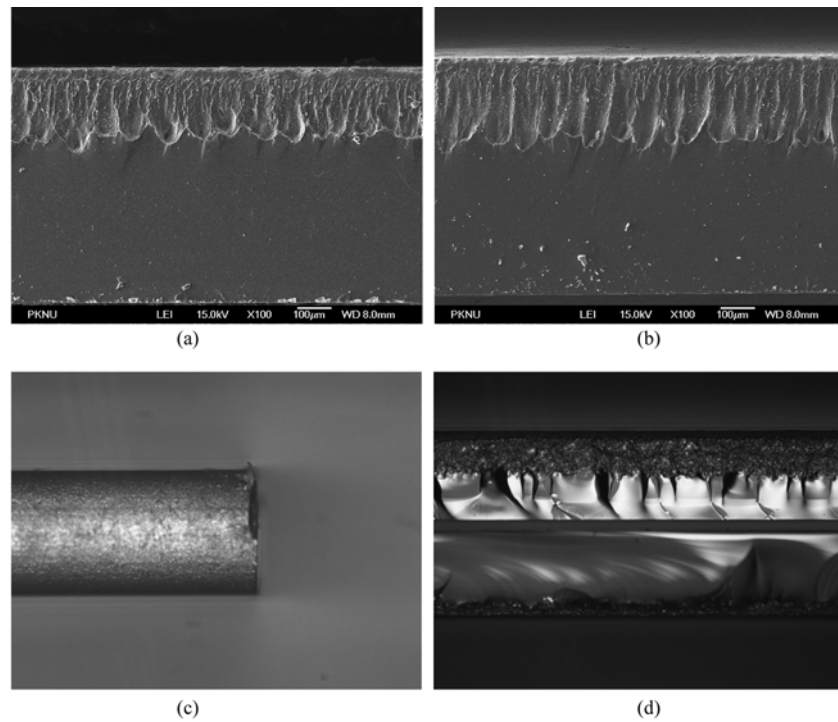


Fig. 6. Cross-sectional view of mechanical breaking after femto-second laser scribing (glass thickness = 0.7 mm, single side panel after 4 laser energy passes(a) and 6 laser energy passes (b), edge quality for 4 laser energy scan passes(c), double side panel after 6 laser energy passes(d)).

열 응력이 크게 발생되어 절단면은 미세한 크랙이 발생하기도 하였고 절단면의 품질이 기존의 블라인드 크랙을 이용한 방법보다 좋지 않았다. 이를 극복하기 위해 좀더 다양한 요소들을 고려한 보다 많은 실험 및 분석이 요구되며 펨토초 레이저의 기술향상에 따라 많은 발전이 있으리라고 생각된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터 사업(R15-2006-022-01001-0)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. E. G. Gamaly, A.V. Rode, and B. L. Davies, Phys. Plasmas, **9**, 949 (2002).
2. K. R. Kim, Kor. J. Mater. Res., **17**(7), 352 (2007).
3. J. Hassaun, Laser Focus World, **35**, 86 (1999).
4. H. Y. Zheng and T. Lee, J. Micromech. Microeng., **15**, 2093 (2005).
5. C. -H. Tsai and H. -W. Chen, Int. J. Adv. Manuf. Technol., **23**, 342 (2004).
6. V. I. Kondrashov, L. A. Shitova, V. A. Litvinov and V. V. Surkov, Glass and Ceramics, **58**, 9 (2001).
7. J. Cheng, M. Yen, C. Wei, Y. Chuang and T. Young, J. Micromech. Microeng., **15**, 1147 (2005).
8. M. D. Perry, B. C. Stuart, P. S. Banks, M. D. Feit, V. Yanovsky and A. M. Rubenchik, J. Appl. Phys., **85**, 6803 (1999).
9. K. S. -Tinten, J. Bialkowski, A. CAvalieri, M. Boing, H. Schuler and D. V. Linde, Proc. SPIE **3343**, 47 (1998).
1. E. G. Gamaly, A.V. Rode, and B. L. Davies, Phys.