

레이저를 이용한 LCD 유리 절단

Laser Controllable Thermo-cleaving of LCD Glasses

이석준, 콘드라텐코(MSAEI 교수)

Seak-Joon Lee, Kondratenko B. C.(Prof. MSAEI)

Abstract

Nowadays Laser Controllable Thermo-cleaving is the most promising method of cutting FPD(Flat Panel Display) glass in mass-production line. And this method can be used to cut other brittle materials such as quartz, sapphire, ceramic and semiconductor.

The concept of this method is shown in Picture 1. Laser beam heats glass up to strain point not to melting point and cooling system chills glass to make maximum thermal stress in glass and then the thermal stress generates micro thermal crack in other words blind crack. Laser Controllable Thermo-cleaving controls the thermal stress to optimize the blind crack up to level of mass-production line.

1. 서론

현재 한국의 FPD(Flat Panel Display) 생산은 세계 정상 of 자리를 차지하고 있으나 생산 설비 개발 면에서는 국산화가 저조하다. 특히 레이저를 이용한 장비 및 신기술 적용 장비 부분의 수입의존도가 매우 크다. FPD산업의 특성상 제품생산에서 분진이 생산 수율의 주요한 변수로 작용하고 있고 제품의 대형화 및 품질 경쟁이 심화되고 있기 때문에 기존의 기계식 절단의 한계를 넘어선 신방식 절단법의 개발이 요구되어 왔다. 제조 공정 중에 한 분야인 유리 절단공정의 가장 일반적인 방법은 Diamond wheel이나 WC wheel을 이용하여 유리 표면에 흠을 발생시켜서 절단하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 이러한 기계적인 절단 방법은 유리에 손상을 주어 입자를 발생시킴으로써 고청정도를 요구하는 청정 공정에 바람직하지 못하다. 더욱이 거친 절단면과 절단된 단면에 존재하는 미세 균열을 제거하기 위해서 후 공정으로 연마와 세정공정 등이 필

연적으로 수반된다. 또한 Diamond wheel이나 WC wheel의 수명이 짧아서 양산 시 매일 또는 주 2~3회 교체해야 해서 유지 보수 경비의 증가를 초래하고 절단 품질의 안정화 및 유지 보수가 어렵다. 이와 같은 기계적인 절단방법의 단점을 보완하기 위해서 레이저를 이용한 유리 절단시스템 개발의 필요성이 증가하고 있다. 이러한 절단법은 silicon wafer, sapphire, SiC, solar cell, quartz 등의 취성재료 절단에도 이용할 수 있다.

현재 한국이 선도하고 있는 FPD(Flat Panel Display) 산업에서 LCD glass, PDP glass를 분진없이 고속으로 고정밀 절단하는 필요성이 증가되고 있다.

2. Laser Controllable Thermo-cleaving 개요

2-1. Laser Controllable Thermo-cleaving 의 기본 원리

일반적으로 레이저를 이용하여 유리, 유리, 세라믹 등의 취성재료를 절단함에 있어, 레이저 가공 시 발생하는 분진이나 열 충격에 따른 잔류 열응력을 최소화하며 고품질의 청정가공을 수행하는 방법 중 레이저 열 절단법(laser thermo-cleaving)이 널리 사용되고 있다. 분진이 최소화되고 재료의 손실 없이(Zero Loss) 절단하기 때문에 Laser Zero Loss Cutting 이라고 기술명을 정하였다.

상기 레이저 열 절단법의 기본 원리는 취성재료를 레이저를 이용하여 왜곡점(strain point) 이하로 가열 후 냉각시켜 취성재료 내부의 팽창/압축의 힘을 극대화시킴으로써 취성재료를 재료의 손실 없이 절단 작업을 수행할 수 있다(그림 1). 기존의 레이저 절단법들은 대부분 재료를 용융 및 기화시켜서 제거하거나 laser ablation 절단법을 이용함으로써 고 출력 레이저나 특수한 레이저가 필요했다. 레이저 업계에서는 Laser Removing 절단법을 시도하고 있지만 이 방법은 Laser 의 열에너지를 받아들이는 재료를 액화, 기화시켜서 제거하는 방식으로써 HAZ(Heat Affected Zone)이 크고 많은 Surface debris 및 분진이 발생되기에 유리 및 Wafer 절단 양산에 적용하기 어렵다. 그 결과 저속으로 절단하거나 고속으로 절단하여도 큰 HAZ 과 이 발생했다. 이 분진 중 일부가 유리 위에 융착됨으로써 양산 적용 가능성이 현저히 저하되었다. laser ablation 절단법은 고가의 DUV laser 나 femto

second laser 를 필요로 하나 현재 양산에 적용할 만한 안정적이고 출력이 높은 laser 를 구하기는 아직 어렵다. 현재 특수 wafer 에 아주 저속으로 특수한 형상을 절단할 때 일부 실험실 수준으로 적용되고 있는 실정이다.

그러나 신방식인 Laser Zero Loss Cutting 은 분진 발생이 최소화되고 재료의 손실 없이 절단되며 HAZ 이 최소화된다. 또한 고속 절단(100~1000mm/s)이 가능하며 양산 현장에서 후공정이 생략될 수 있어서 높은 생산성을 보장한다.

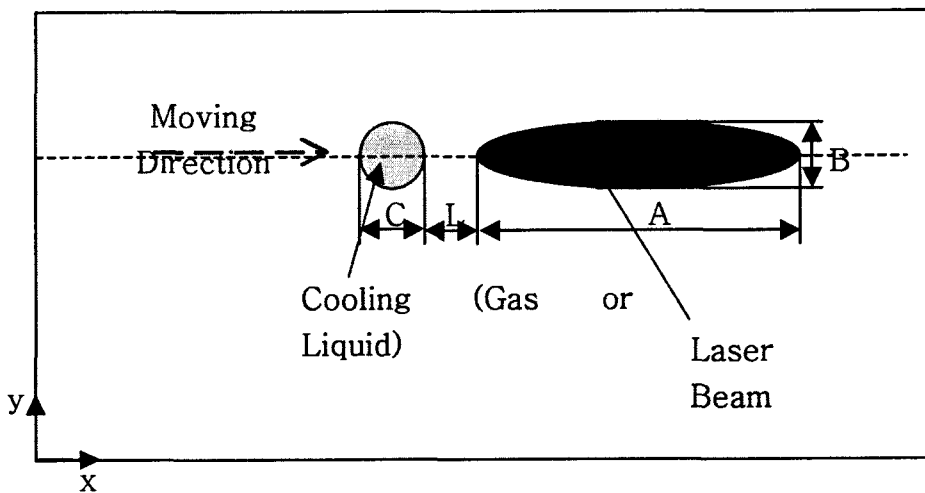


그림 1. Laser Zero Loss Cutting 의 개념도

2-2. Laser Controllable Thermo-cleaving 의 개발 현황 및 역사

70 년대 말에 러시아에서 레이저를 이용한 Thermo-cleaving(Laser Zero Loss Cutting)법을 개발했고 80 년대에 냉각 방식을 추가해서 그 방식을 지속적으로 발전 시켰다. 90 년대 초부터 일부 러시아 과학자들이 미국, 유럽 일부에 기초 기술을 소개하였고 90 년대 말부터는 미국, 러시아에서 활발히 기술을 발전시키고 있다. 97 년부터 국내 대기업을 중심으로 LCD glass 양산에 적용하려고 많은 인력과 재원을 투자했으나 현재는 개발 진행이 약화된 상태이다. 2004 년도에 세계 최초로 국내 Major LCD 업체의 양산 현장에 적용했고 추가적인 장비 제작을 진행 중에 있다.

유리 절단 적용은 레이저 가공 분야에서도 최신 신기술로써 아직 세계적으로도 극소수 일부 업체만이 기초 연구 중이고 아직 상용화하지 못한 기술이다. 그러나 이 방식의 탁월한 장점과 높은 상용화 가능성 때문에 현장에서 수요 조사를 하면 매우 높은 관심과 강한 구매 의사를 보이고 있다. 이러한 최신 기술을 이용한 양산 적용에 성공함으로써 2000 억 FPD glass 절단 시장과 4.8 억불 wafer dicing 산업에 적용을 가능하게 했고 나아가 세계 FPD 산업에서도 시장 선점이 가능하다.

2-3. Laser Controllable Thermo-cleaving 장단점

현재 LCD glass 절단에서 적용하고 있는 일반적인 기계식 절단, Laser ablation 및 신방식 Laser Controllable Thermo-cleaving 의 장단점을 비교했다. 현재 산업 현장에서 적용 중인 기계식 절단의 여러 불량과 생산성 저하의 한계를 극복하고 탁월한 장점들과 고품질 절단 구현으로 Laser Controllable Thermo-cleaving 수요가 더욱 확대되고 있다.

	Mechanical System #1	Laser ablation 절단	Laser Zero Loss Cutting
특징	접촉식	비접촉식	비접촉식
절단속도	200~400mm/s	5 ~ 30mm/s	200 ~ 1000mm/s
절단파편	Chipping	Chips, 용착	No chip, 용착 없음
절단면	Cracks, 파손	Crack, HAZ 큼	No crack, HAZ 작음
모서리	Coarse	Coarse	Clean
추가공정	Grinding, 세척	추가공정 생략 가능	추가공정 생략 가능
소모품	주 2~7 회 휠 교체 #2	소모품 없음	소모품 없음
설치면적	Large	Much smaller	Much smaller
수율	High	Low	Higher

#1 국내 대표적인 LCD 생산 업체의 기계식 절단 장비 사양

#2 매일 교체(MDI WC wheel 사용), 주 2~3 회 교체(MDI diamond wheel 사용)

표 1. 다양한 웨이퍼 절단법의 비교표

2-4. Laser Controllable Thermo-cleaving FEM analysis

참고문헌 1 에서 수학적 해석 연구 결과를 활용하여서 단순한 수학적 모델에서부터 이동하는 타원형 레이저 광원과 냉각에 대한 이상적인 방정식들을 도출하였다. ANSYS 8.0 을 이용하여서 이러한 수학적 모델들을 검증하였고 이동하는 레이저 광원과 cooling source 가 다양한 형태와 조건으로 조합되는 열역학적인 해석을 수행했다. 또한 유리 하부의 다양한 재료(진공척)들의 영향을 열역학적인 해석으로 분석하였다.

$$T = \frac{\omega r_0^2}{2\lambda\sqrt{\pi ab}} \int_0^{\pi/2} \exp[-bc_1 t g^2 \varphi \sin^2 \varphi] d\varphi \quad (1)$$

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) + \{L\}^T \{q\} = Q \quad (2)$$

여기서 ρ -density; c - specific heat; T - temperature; t - time; Q - heat generation rate per unit volume; $\{v\}$ - velocity vector for mass transport of heat; $\{L\}$ -vector operator; $\{L\}T = \nabla T \text{ grad}$; $\{q\}$ - heat flux vector; $\{L\}T\{q\} = \nabla \cdot \{q\}$ divergence;

$$\{q\} = -[D]\{L\}T \quad (3)$$

$[D]$ - conductivity matrix

(1), (2) 두식을 합하면

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) = \{L\}^T ([D] \{L\} T) + Q \quad (4)$$

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = Q + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5)$$

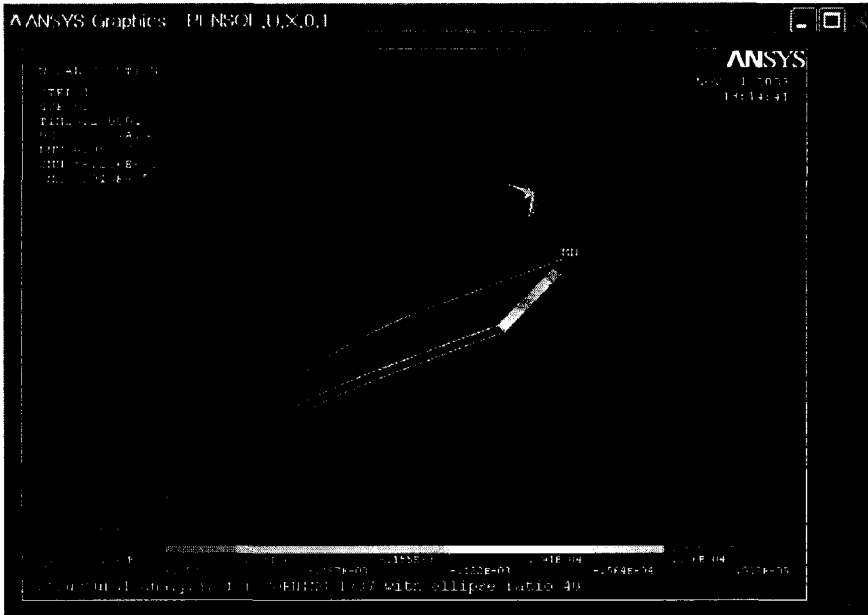


그림 2. Deformation of glass

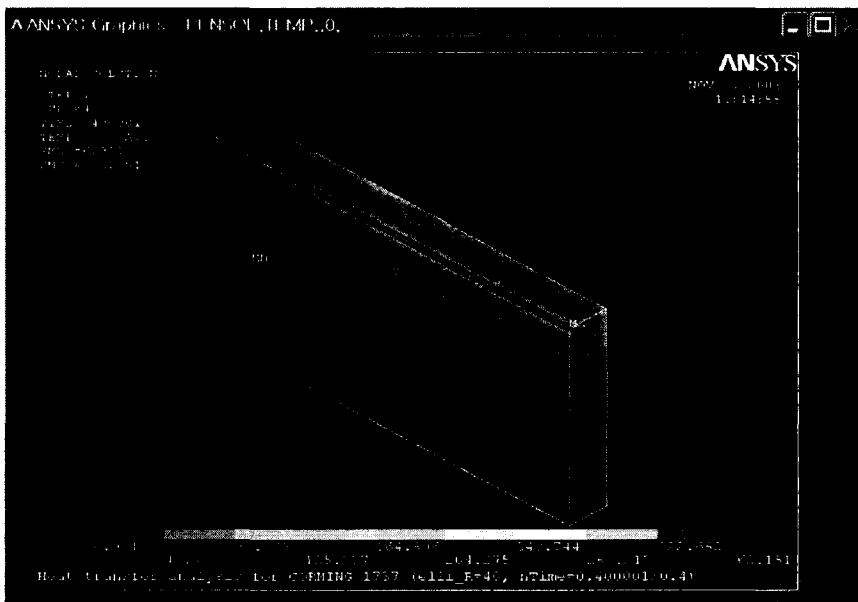


그림 3. Distribution of temperature in glass

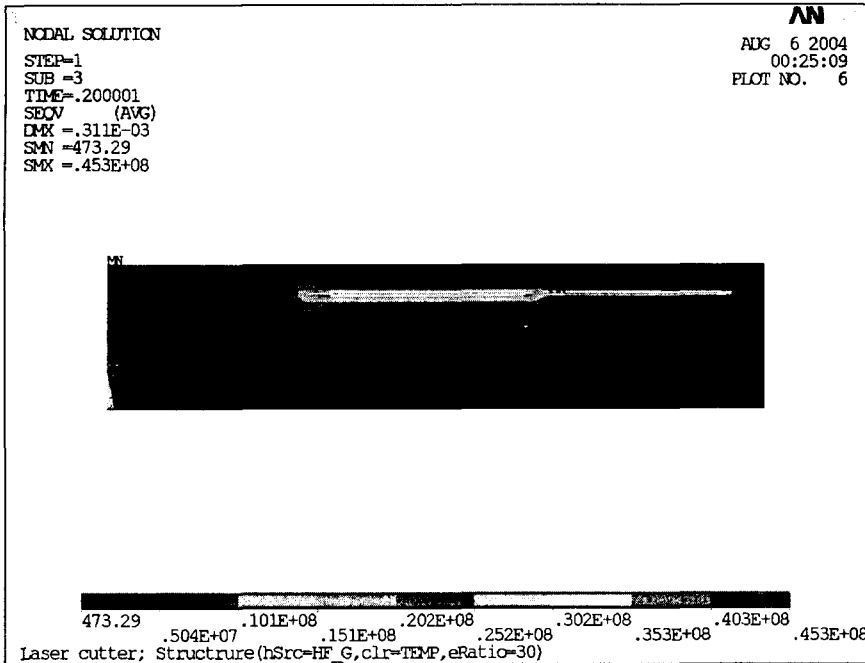


그림 4. Von Mises Stress of glass

3. Laser Controllable Thermo-cleaving 의 산업현장에 적용

단순히 실험실에서의 절단 실험이나 시제품 제작의 수준을 넘어서 고품질 절단과 양산 적용 가능한 절단 재현성을 확보해서 금년부터 이미 국내 대기업에 장비를 설치하고 현재 아무 문제 없이 잘 현장에서 작동 중이다. 또한 지속적인 추가 수주로 인해서 다양한 크기의 장비를 현재 제작 중이고 양산 현장에서의 설치 경험과 요구 사양을 피드백해서 다양한 양산용 절단 기능과 신방식 절단 부품들을 개발해서 산업 현장에서 활용하고 있다.

절단 공정에 대한 수학적 해석과 열역학적인 분석을 토대로 다양한 절단 실험 및 신방식 절단 공정의 개발로 2002 년 2 월에 세계 최초의 5 세대 LCD glass(유리 크기:1250mmx1100mm) Cutter 를 제작하였고 2003 년엔 세계 최초의 7 세대 LCD glass(유리 크기:2200mmx1870mm)

Cutter 을 개발하였고 세계 최초로 2004 년 4 월에 6 세대 LCD Cutter 를 국내 대기업 LCD 양산 현장에 납품 후 현재 양산 중이다.

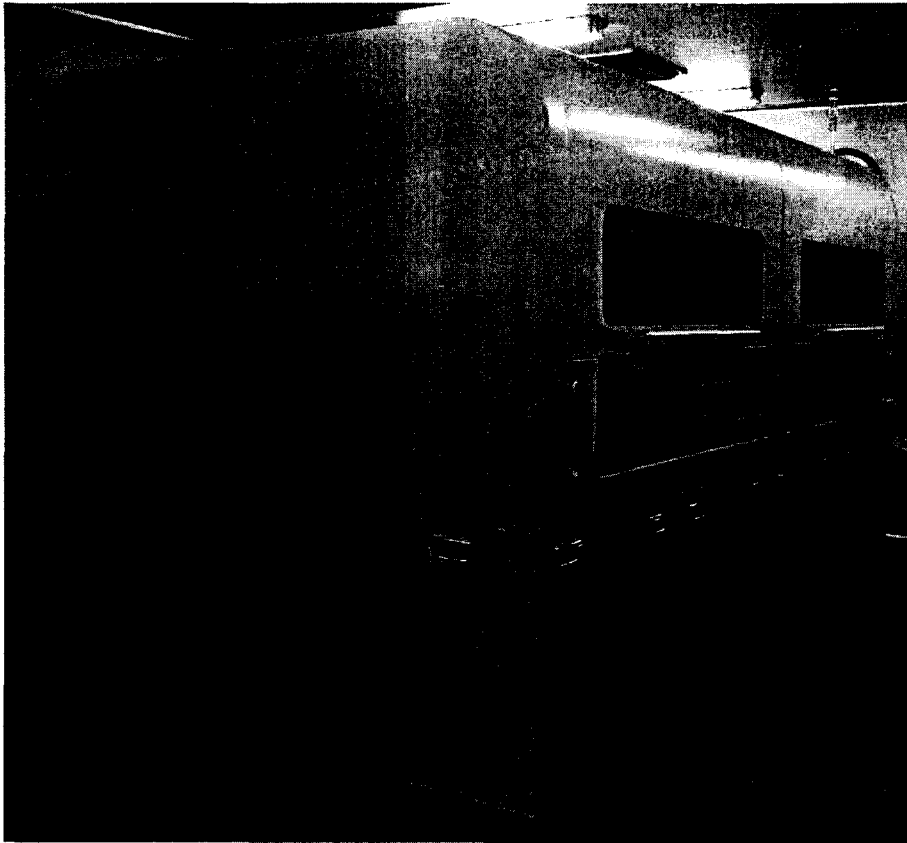


그림 5. 5 세대 LCD glass(유리 크기:1250mmx1100mm) Cutter

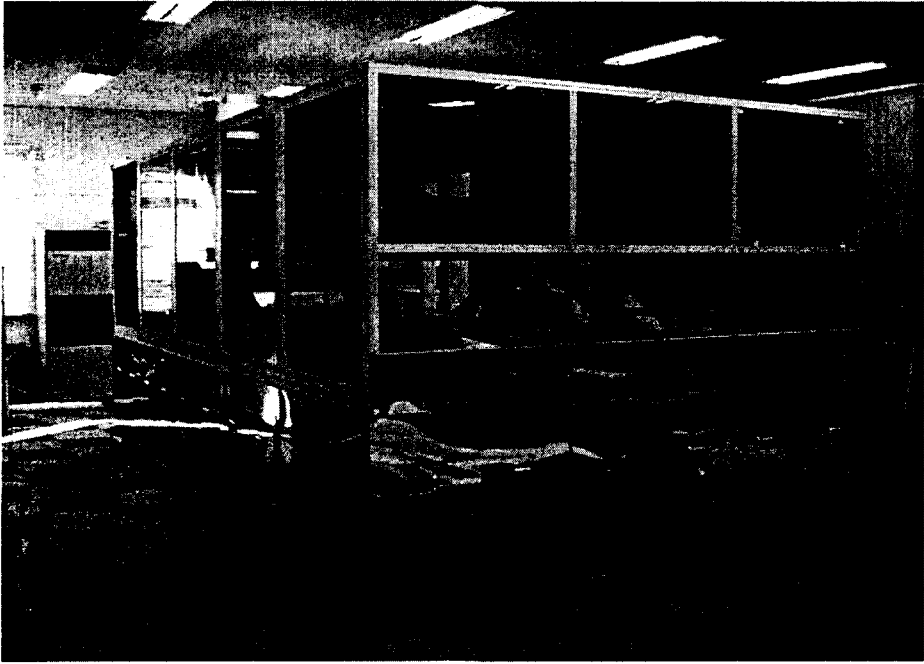


그림 6. 6 세대 LCD glass Cutter

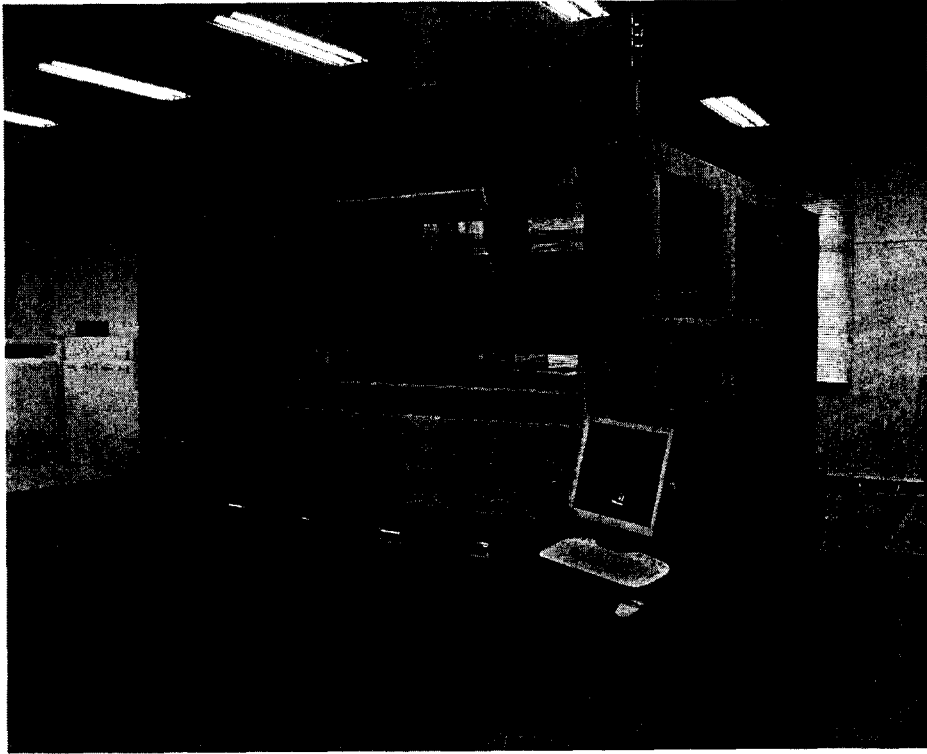


그림 7. 7 세대 LCD glass(유리 크기:2200mmx1870mm) Cutter

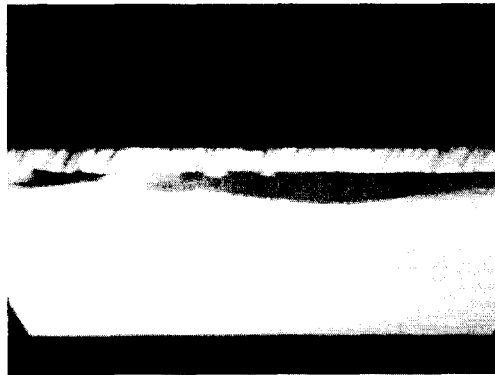


그림 8. LCD glass 절단면 사진

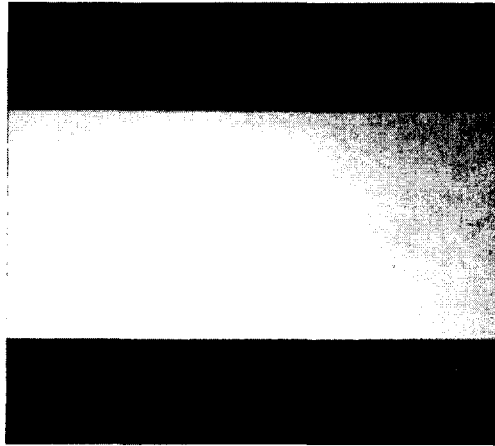


그림 9. LCD glass 절단면 사진

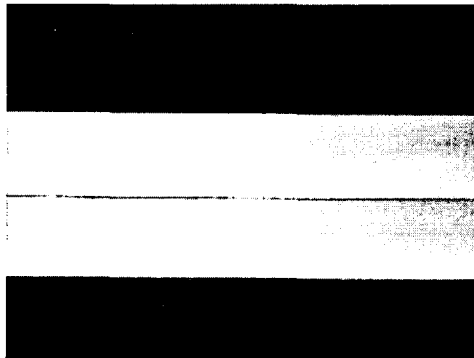


그림 10. LCD glass 절단면 사진

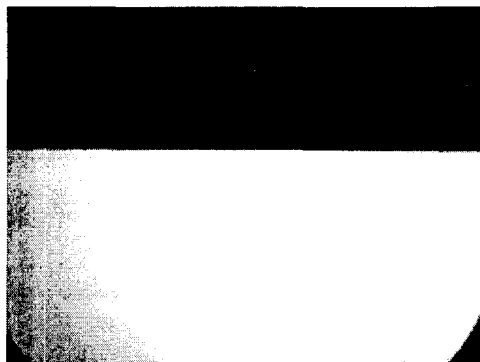


그림 11. PDP glass 절단면 사진

4. 결론

최근 FPD glass 산업 현장에서는 분진 발생이 없으면서 고속, 고정밀도 절단할 수 있는 장비의 수요가 증가하고 있는 추세이다. 절단 공정에 대한 수학적 해석과 열역학적인 분석을 토대로 다양한 절단 실험 및 신방식 절단 공정의 개발로 고품질 절단과 양산 적용 가능한 절단 재현성을 확보해서 현재 대기업 양산 현장에서 잘 작동 중이다. 또한 지속적인 추가 수주로 인해서 다양한 장비를 현재 제작 중이고 양산 현장에서의 설치 경험과 요구 사양을 feedback 시켜서 다양한 양산용 절단 기능과 신방식 절단 부품들을 개발해서 산업 현장에서 활용하고 있다.

신 방식 Laser Controllable Thermo-cleaving 은 아직 세계적으로도 양산적용의 시작 단계이고 세계 최초로 양산 적용을 시킴으로써 세계 FPD glass 절단 장비 시장을 선점할 수 있는 교두보를 마련했다. 또한 활용분야로는 한국의 주력 수출품 인 silicon wafer 에 적용 가능하고 sappire, SiC, Solar cell, quartz, 특수 유리 등 취성 재료 절단 등에도 이용 가능하다.

참고 문헌

1. Mathematical model of process laser controlled thermocracking/ V.S Kondratenko, P.D. Gindin, Seak-Joon Lee 2003
2. Laser LCD Glass Cutting System/ V.S Kondratenko, Seak-Joon Lee 2003
3. Патент РФ №2024441. МКИ С 03 В 33.02. Способ резки хрупких неметаллических материалов/ V.S Kondratenko 1992
4. Basics of Laser Material Processing/ A.G Grigoryants 1994
5. 레이저가공학/ 김도훈 1990
6. Лазерная обработка неметаллических материалов/ A.G Grigoryants, A.A Sokolof 1988
7. Лазерная обработка стекла/ G.A Machulka 1979