

레이저빔을 이용한 유리절단 기술 개발

Development of Glass Cutting Technology by Laser Beam

삼성전관 생산기술센터 정재훈, 진상영, 남궁복, 노철래, 김광일
삼성종합기술원 TCS 센터 CSE Lab. 부성운, 김기택

I. 서론

본 기술은 레이저를 이용하여 유리와 같은 취성 재료를 용융 없이 마이크로 크랙의 전파를 응용하여 재료를 절단하는 기술로 10.6um 파장의 에너지를 가지는 CO₂ 레이저를 이용하여 취성 재료에 레이저를 조사한 후 연속적으로 가열된 부분을 냉각시킴으로써 재료에 열충격 (Thermal Shock) 을 주고, 크랙의 방향 및 깊이를 적절히 조절하여 크랙의 전파를 제어함으로써 취성 재료를 가공 후 변형이나 결함없이 절단하는 기술이다.

유리, 석영, 세라믹과 같은 비 금속성 재질을 절단하기 위해서 종래에는 주로 기계적으로 다이아몬드나 경질 합금 도구를 이용하여 Scribing 하고, Breaking 을 하는 방법을 이용하고 있다. 이때 가공된 가장자리의 품위 확보와 정확성을 얻기 위해 연마, 세정 등 추가의 작업이 필요하여, 제품의 원가 상승을 초래하게 된다.

다이아몬드 휠을 이용한 기존 방법의 문제점과 레이저를 이용하여 절단하였을 때의 장점은 다음과 같다. 다이아몬드 휠을 이용한 기존 방법의 문제점으로는 1) Scribing 시 발생하는 유리 파편으로 가공재료에 흠집 불량이 유발되고, 2) 절단면 상부에 미세 crack 이 다량 형성된다. 또한 3) 절단면의 정도가 양호하지 못하며, 4) 제품의 품위확보를 위하여 면취 및 세정 등 추가의 공정이 필요하다.

레이저 절단 시의 장점으로는 1) 열충격에 의한 비접촉 절단법으로 절단 시 유리 파편이나 크랙 생성이 없고, 2) 추가의 작업(waxing, grinding, washing 등)이 필요하지 않는다. 3) edge breaking strength 가 증가된다. 4) 공정중 재료의 손실이 없다. 또한 5) Tool wear 가 없고, 6) good clean room stability 을 확보할 수 있다.

최근 평판 디스플레이 산업의 발전으로 대형의 원판 유리에 여러 셀(Cell)의 디스플레이 소자를 형성한 후 이를 최종적으로 절단하여 제품을 완성하는 공정에 고품위 유리절단 공법이 요구되고 있다. 기존의 다이아몬드 휠에 의한 절단 방법에 비하여 레이저 유리절단 기술은 레이저빔을 이용하여 한번에 유리를 완전 절단하고 또한 절단면에 잔류하는 크랙이 없어 이후에 추가적인 공정이 필요하지 않고 유리 파편의 생성이 없다. 이러한 장점으로 인하여 세계적인

로 여러 업체에서 본 기술의 개발을 추진하고 있으며, 이는 평판 디스플레이 산업에 곧 적용될 것으로 예상된다.

또한 본 기술은 TV Tube 절단, 자동차용 유리 및 미러의 자유 형태 절단, 하드 메모리 디스크의 원형 절단, 실리콘 와이어의 절단과 같은 여러 산업 분야에서 응용 가능할 것으로 판단된다.

II. 실험 방법

시스템 구성

본 개발에 사용된 시스템은 200W 급의 CO₂ 레이저를 장착하고 있으며, xyz 축은 Linear Motion 및 Ball Screw 구동을 하며, PC Based 제어 시스템으로 구성되어 있다. 본 시스템의 개략도는 그림 1 과 같다.

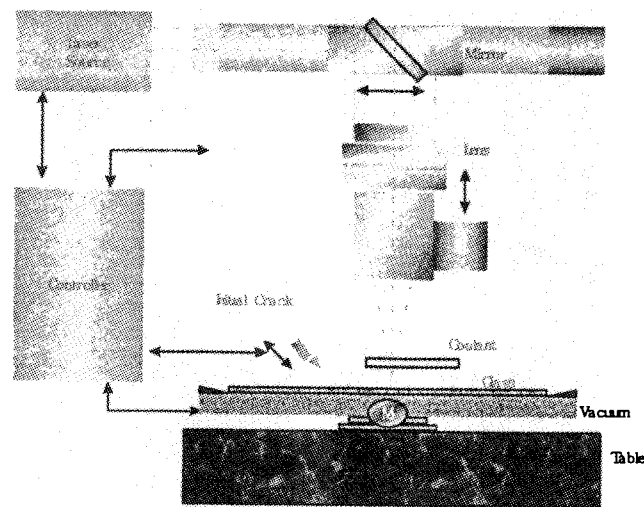


그림 1. 레이저 유리절단 시스템 구성

광학계 설계

본 기술 개발에서는 재료 내부에 최적의 열적 인장 응력을 유발시키기 위한 레이저빔을 형성하기 위하여 광학계를 설계를 수행하였다. 본 개발에서는 Code V 라는 광학 설계용 프로그램을 사용하였으며, 렌즈의 재료는 ZnSe 를 사용하였다.

절단 제어 인자 설정 실험

생성되는 크랙의 깊이 및 방향을 조절하기 위하여 레이저의 조건과 냉각 방식 등 여러 제어 변수들에 대하여 최적화 실험을 수행하였다. 특히 여러 인자들이 복합적인 상관관계를 가지고 있기 때문에 실험 계획법을 응용하여 실험의 효율성을 높였다.

본 개발에서 사용된 유리는 Aluminasilicate 와 Sodalime 의 유리로 그 물리적인 특성은 표 1 과 같다.

표 1. 유리의 물리적 특성

	밀도 (g/cm ³)	선팽창계수 (/°C)	연화점 (°C)	굴절률@546nm(%)
Aluminasilicate	2.54	38× 10 ⁻⁷	975	1.52
Sodalime	2.49	87× 10 ⁻⁷	740	1.51

열응력 해석

본 기술을 이론적인 체계위에서 정성적으로 분석하고 최적의 열응력 유발의 조건을 도출하기 위하여 본 개발에서는 레이저와 냉각에 의해 재료 내부에 생성되는 열응력에 대한 해석을 수행하였다. 열응력 해석은 HP-EXEMPLAR 에 탑재되어 있는 상용 S/W 인 ABAQUS57 를 이용하였다.

III. 결과 및 고찰

레이저 유리절단 메커니즘

레이저 유리절단 기술이란 레이저빔의 조사에 의해 유리 표면의 온도를 올린 후에 연속적으로 유리 표면을 냉각하면서 생기는 온도차로 인하여 Thermal shock 현상을 발생시켜, 이로 인해 유발된 크랙을 장치의 이송과 함께 전파되도록 하는 기술을 말한다. 이때 주입되는 레이저빔의 조건과 냉각의 방식에 따라 생성되는 크랙의 방향 및 깊이가 조절되는 현상을 명확히 규명하는 것이 요구된다. 이때 생성되는 온도 변화에 따른 열응력은 다음과 같다.

$$\sigma = E\alpha\Delta T$$

σ : Stress

E : Young's Modulus

α : Thermal Expansion

따라서 온도차가 크게 발생할수록 응력이 크게 발생하여 절단이 용이함을 알 수 있다. 또한 재료의 열팽창계수와 Young's Modulus 에 크게 의존한다. 이렇게 생성된 열응력이 어느 한계를 넘으면 재료를 파단(Fracture) 하게 된다. 본 개발에서는 이러한 파단의 해석 접근 방법으로

Thermoclastic Theory 에 기초를 둔 파단이론으로 해석을 시도하였다. 이는 최대 인장 또는 압축 응력이 어느 값 이상이 되면 파단이 시작된다고 판단하는 것으로 이 방법에 의하면 응력강도, 열 전달계 수가 높을수록, 열팽창계수, 탄성 계수와 Poisson's ratio 가 작을수록 파단은 잘 일어나지 않는다. 따라서 최대 인장응력을 파단의 기준으로 삼고, 크랙은 최대 인장응력과 Normal 한 방향으로 진전된다는 사실을 이용하여 최대 인장응력과 유리의 절단 방향과 수직인 응력에 대한 해석을 수행하였다.

절단 성능

최적의 열응력 발생을 위하여 레이저빔을 적절히 조절하기 위하여 광학계를 설계하여 특수한 렌즈계를 구성한 후, TFT-LCD, Color Filter 의 재료로 사용되고 있는 0.7t 의 Aluminasilicate 유리를 중심으로 직선의 완전 절단에 대한 개발을 수행하였다. 따라서 크랙의 진행 방향은 레이저의 진행 방향과 일치하고, 크랙의 생성 깊이는 유리 두께 이상이어야 한다.

이러한 크랙의 제어는 레이저빔의 조절과 레이저빔의 진행 속도, 냉각 방식 및 주위의 응력 환경에 의존하게 되는데 본 개발에서는 이러한 여러 인자들에 대한 최적화 실험을 수행하여 0.7t 의 Aluminasilicate 유리를 50 ~ 100 mm/sec 의 속도로 완전 절단할 수 있었다. Sodalime 유리의 경우 열팽창계수가 Aluminasilicate 유리에 비해 2 배 정도 크기 때문에 절단속도 또한 Aluminasilicate 유리에 비해 1.5 배 이상으로 절단을 할 수 있었다.

절단면 분석

레이저에 의해 절단된 절단면과 기존의 다이아몬드 휠 방식에 의한 절단면을 비교 분석하기 위하여 SEM 분석을 수행하였다. 그림 2 에서 보는 바와 같이 다이아몬드 휠 절단 시 절단면에 잔류하는 미세 크랙과 비교하여 레이저에 의한 절단 시 절단면은 잔류 크랙이 없는 고품위의 절단면을 형성하고 있다. 또한 절단면의 품질은 거칠기 1um 이하, 직진도 $\pm 10\mu\text{m}$ 이하, 직각도 $\pm 2.5^\circ$ 로 유지되고 있다.

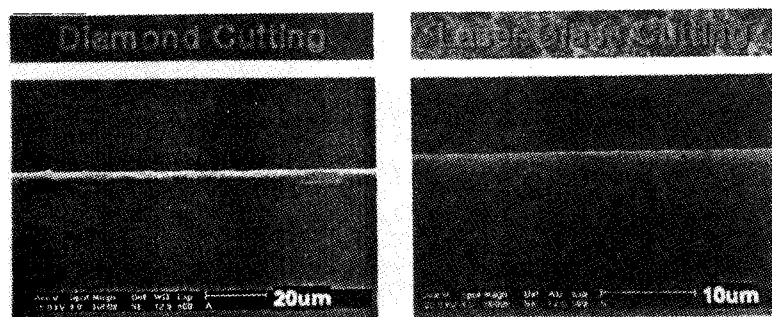


그림 2. 다이아몬드 휠 절단면과 레이저 절단면 비교 (SEM 분석)

열응력 해석

해석은 레이저 빔이 유리에 조사되었을 때 Homogeneous Thermal-Diffusion Equation 을 풀어 수행하였다. 시스템은 Symmetry 하므로 유리의 반만 모델링 하였다. 해석에 사용된 모델의 Node 는 그림 3 과 같다.

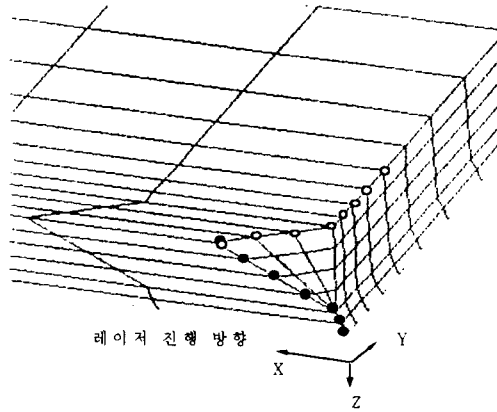


그림 3. 응력 해석 Node

레이저가 유리에 조사되고 냉각될 때의 온도의 변화에 대한 해석 결과는 그림 4 와 같다. 그림 4 에서 보는 바와 같이 레이저가 조사되면서 재료의 온도가 상승하고 있음을 알 수 있다. 이때 온도는 재료의 연화점을 넘어서는 안된다. 그리고 가열 부위가 순간적으로 냉각되면 급격한 기울기의 냉각곡선을 형성한다. 이때 그림 5 의 응력 해석 그래프로 부터 재료 내부에 유리를 파단할 수 있는 인장응력이 유리의 중앙 부위에 형성되면서 크랙이 형성되는 것으로 판단된다.

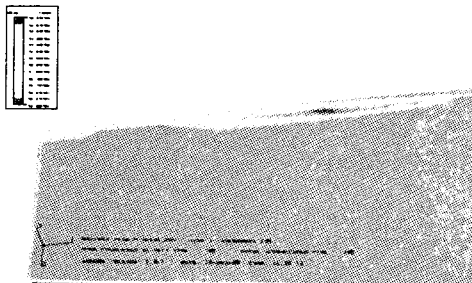


그림 4. 온도 해석도

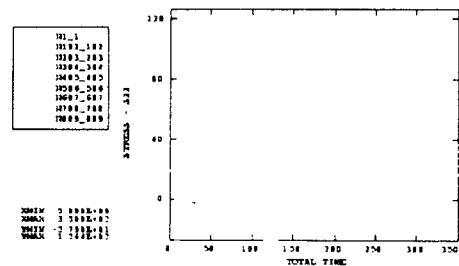


그림 5 응력 해석도

IV. 결론

이상의 결과로 부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 0.7t 의 Aluminasilicate 유리를 레이저를 이용하여 50~100 mm/sec 의 속도로 완전 절단할 수 있었고, 향후 평판 디스플레이 제조공정에 적용되어 공정 혁신을 도모할 것으로 판단된다.
2. 열응력 해석의 결과 가열된 유리의 중앙부에서 최대의 인장응력이 발생하여 유리에 크랙을 형성시켜 이를 전파시킴으로써 유리를 절단할 수 있음을 알았다.
3. 절단 성능을 향상시키기 위하여 레이저의 조건, 냉각 방식, 주변 환경 등 여러 인자들 간의 복합적인 상호작용의 명확한 규명이 요구된다.

V. 참고문헌

1. G. Allcock, P. E. Dyer, G. Elliner, and H. V. Snelling, "Experimental observations and analysis of CO₂ laser-induced microcracking of glass", J. Appl. Phys., Vol.78, No.12, pp7295~7303, 1995
2. 김도훈, "레이저 가공학", 경문사
3. Frank P. Incropera and David P.de Witt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", John Wiley and Sons, Inc., 1990