

CO₂ 레이저를 이용한 Soda Lime Glass의 절단특성 및 FEM 시뮬레이션

CO₂ Laser Cutting Characteristics of Soda Lime Glass and FEM Simulation

인하대학교 기계공학과 정일영, 강경호, 김재도

I. 서론

레이저에 의하여 절단이 수행되는 비금속 재료는 유리, 알루미나와 실리콘 등의 요업재료와 합성수지, 목재, 고무, 섬유 및 피혁 등의 유기재료는 물론 파이버 보강 플라스틱 등의 복합재료 등 매우 광범위하다.^[1]

전통적으로 Glass 절단 방식은 수년간 보편적인 방식으로 산업현장에서 사용되어 왔다. 주로 카바이드 커팅 휠(Carbide cutting wheel) 또는 다이아몬드 휠(Diamond wheel)등을 사용하여 절단하는 방식을 사용하였다. 이러한 방식은 Glass 표면을 긁거나 쪼개는 방식으로 오랫동안 사용하였다.^[2-4] 그러나 이러한 접촉식 가공방식은 표면의 형태가 불안정한 상태를 가지고 있고 결과적으로 후 가공의 과정을 거치게 된다. 또한 긁는 과정을 통하여 칩이 발생하고 위험요소가 잔재하는 등 여러 가지 단점을 노출시키고 있다.

레이저를 이용한 절단 가공에서 가장 중요한 것은 표면 자체에 아무런 흔적이 없고 절단면에 균열이 없이 균일하게 절단을 해야만 한다. 일반적으로 표면자체에 레이저를 국부적으로 접촉시키면 표면은 큰 열 에너지에 의하여 소성변형이 발생하고 이것으로 표면의 일부분이 깨지는 성질을 가지고 있다. 이러한 현상을 Vent라고 한다.

본 연구는 레이저 절단 가공에서 Vent의 유무와 관련하여 최적의 절단 가공 변수를 찾고 레이저에 의하여 생성되는 열 응력과 열 변형률의 거동을 FEM 해석을 통하여 알아보았다.

II. 실험방법

실험 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 실험 장치는 CW CO₂ 레이저, X축 이송 테이블, 마스크, 반사 거울, 냉각가스 장치로 나눌 수 있다. 실험에 사용된 CO₂ 레이저는 빔모드 TEM₀₀, 최대 출력 30W이다. 냉각가스는 정밀 기기 유지 보수용 청정 가스인 HCFC 가스를 사용하였다. 보호가스 관은 위치제어가 쉽도록 구리관으로 사용하였고 유량은 15 l/min으로 분사하였다. X축 이송 테이블은 자체 제작한 소프트웨어로 제어하며 이송속도를 변화할 수 있도록 제작하였다.

본 실험에서 사용된 재료는 100×50×30의 크기로 일반 가정과 건축현장에서 사용되는 Soda Lime Glass를 사용하였으며, Table 1.은 Soda Lime Glass의 조성표이다.

실험 방법은 레이저의 출력을 20W~30W까지 5W씩 증가시키면서 실험하였으며, 테이블의 이송속도는 각각의 출력에 따라 변화를 주어 실험하였다.

III. 결과 및 고찰

1) 레이저 출력과 테이블 이송속도에 의한 절단

각각의 레이저 출력에 따라 속도를 변화시키면서 실험하였다. 레이저 출력은 20W, 25W, 30W의 범위를 설정하고 출력에 맞추어서 속도를 변화시켰다. Table 2.는 출력과 속도 변화를 통하여 실험을 하였을 때 절단 상태와 절단 품질, Vent의 유무의 정도를 정리한 것이다. Table 2.에서 보면 알 수 있듯이 절단 품질이 가장 우수한 것은 레이저 출력 25W, 테이블 이송속도 10mm/s일 때 좋은 절단 상태를 얻을 수 있었다. 그러나 표면 자체에 Vent의 흔적이 남아 있고 절단면에 약간의 균열이 발생한 것을 발견

할 수 있었다. 다른 실험으로 출력을 25W, 테이블 이송속도 9mm/s로 설정을 하고 실험을 하였을 때 우수한 절단면을 얻을 수 있었다. 또한 Vent의 흔적이 없는 절단면을 얻을 수 있었다. 출력 20W, 속도 1mm/s에서는 큰 Vent의 형상을 생성하다가 마지막부분에서는 불규칙한 형태의 균열을 발생하였다. 이는 출력에 비하여 이송 속도가 현저하게 낮고 그로 인해 열 에너지를 한곳에 집중적으로 받게 되어 에너지의 증착현상으로 인하여 끝 부분은 레이저가 도달하기도 전에 열전달이 일어나고 그 열로 인해 열응력이 발생하여 균열이 생성되는 것으로 볼 수 있다. 25W, 속도 15mm/s에서는 끝 부분에서만 균열이 발생하였다. 시작 부분에서는 균열과 Vent의 형상이 없는 반면에 끝 부분에서 Vent의 생성 없이 균열이 발생된 것은 출력에 비하여 이송 속도가 빠른 형태로 나타나 있고 낮은 에너지를 받으면서 증착을 하게 되어 결국 끝 부분에서만 균열이 발생한 것으로 판단된다. 이 밖의 다른 가공조건에서는 Vent의 형성만 있고 깊이 방향으로의 균열은 발생하지 않았고 Vent의 흔적도 없고 단지 레이저빔이 지나간 자국만 있는 것이 있었다. Fig. 2에서 Fig. 5는 레이저 절단 실험을 한 후의 절단 상태를 보여주고 있다.

2) 절단 단면 형상 및 진원도 측정

Fig. 6에서 Fig. 8까지는 절단 단면 형상을 보여준다. Fig. 6은 일반적인 절단 방식으로 가공하였을 때의 단면을 측정된 것이고 Fig.7은 레이저를 이용한 절단 단면의 형상을 나타낸다. 두 가지의 그림을 비교하여 볼 때 Fig. 6은 절단 방향으로 물결모양이 형성되는 것을 볼 수 있다. 이것은 절단을 할 때 scribe되는 흔적을 보여주고 있다. 그러나 Fig. 7은 아무런 흔적 없이 절단 된 상태를 나타낸다. 즉, 접촉식 가공을 통하여 절단하였을 때는 접촉되는 부분에 물결 모양이 형성되고 또한 그 아래로 파인 흔적까지 발견할 수 있는 것으로 보아 절단에 의한 제품 수명은 레이저를 이용한 비접촉식 가공 방식이 우수하다는 것을 증명하고 있다. Fig. 8은 Vent의 형성 부위를 촬영한 것으로 Vent의 생성 형태를 볼 수 있다. 레이저 열원에 의하여 일정한 두께로 깨지는 형태를 취하고 있고 아래 방향으로 균열이 불규칙한 형태를 취하고 있다. 즉, 이러한 가공을 하게 되면 오히려 모재의 수명을 저하시키는 것으로 볼 수 있다. 따라서 레이저를 이용한 가공에서는 이러한 Vent의 형성 없이 가공을 하여야 수명과 칩에 의한 불안정성을 해소 할 수 있다.

진원도 측정의 결과 일반 가공에서는 $R_a=1.33\mu m$, $R_{max}=18\mu m$ 로 나타난 반면 레이저 절단 가공은 $R_a=0.278\mu m$, $R_{max}=1.73\mu m$ 으로 나타났다.

3) 해석 결과

Fig. 9에서부터 Fig. 11은 레이저를 이용한 절단에서의 FEM 해석을 보여준다. Fig. 9는 열원의 주사와 냉각이 동시에 이루어지면서 옆으로 진행되는 형태를 보여주는 그림이다. 그림에서와 같이 열원이 주입되는 부분과 냉각 가스가 만나는 부분이 명확하게 나타나있고 그에 따른 열분포 현상을 발견할 수 있다. 열 분포는 냉각가스가 분포하는 부분과 깊이 방향으로 온도차가 크게 이루어지고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 온도차로 인하여 열응력이 발생을 하고 균열이 생성이 되어 깊이 방향으로 전파된다는 것을 알 수 있다. Fig. 10은 Von Mises 응력 분포를 나타내고 있다. 열원이 만나는 부분에서 가장 큰 응력이 집중함과 동시에 인장응력이 발생을 하고 있는 것을 볼 수 있다. 또한 전파의 방향도 깊이방향으로 진행한다. Fig. 11은 열 변형률 분포를 보여준다. 변형률이 가장 큰 부분 또한 열원이 있는 부분이고 인장응력에 의하여 열 변형도 가장 크게 발생하고 있다. 지금까지의 해석 결과를 정리하면 결국 균열의 생성은 열원에서 열응력의 발생으로 생성이 되어 깊이 방향으로 전파를 하게 된다는 것을 알 수 있다.

IV. 결론

본 연구는 레이저를 이용한 Soda Lime Glass의 절단 실험에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 레이저 출력 25W, 이송속도 9mm/s에서 가장 양호한 절단 단면의 형상을 얻었다. 10mm/s에서도 비슷한 형상을 얻을 수 있었지만 표면에 미소한 흔적이 남아있어 적정 수준이라고 할 수 없었다.
- 2) 절단 단면에서 일반 절단은 물결모양의 흔적을 발견 할 수 있었지만 레이저 절단 가공에서는 아무런

흔적이 없었다. 또한 물결 모양 아래로 파인 부분이 발견되었고 이는 수명을 저하시키는 요인으로 볼 수 있다.

- 3) 열원을 이용한 절단 해석에서 응력과 변형률의 최대치는 열원과 만나는 부분에서 발생을 하였고 깊이 방향으로 온도차가 크게 형성되는 것을 볼 수 있었다. 이것으로 절단균열의 방향이 깊이 방향으로 진행된다는 것을 알게 되었다.

Table 1 Chemical composition of Soda Lime Glass

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	MgO	CaO	BaO	ZnO	PbO	Na ₂ O	K ₂ O
Weight %	72.0	1.3	-	3.5	8.2	-	-	-	14.3	-

Table 2 Cutting result

레이저 출력	이송속도	절단상태	절단품질	Vent
20W	1 mm/s	○	×	○
	5 mm/s	×	·	○
	10 mm/s	×	·	×
25W	5 mm/s	○	×	○
	9 mm/s	◎	○	×
	10 mm/s	○	△	×
	15 mm/s	×	·	×
30W	10 mm/s	×	·	○
	15 mm/s	×	·	○
	20 mm/s	×	·	×

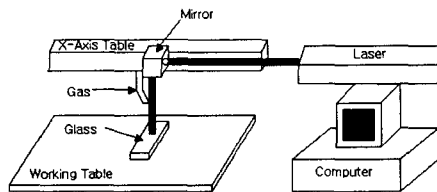


Fig. 1 The schematic diagram of experimental equipment

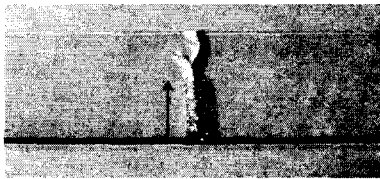


Fig. 2 Photograph of Laser cutting(20W, 1mm/s)

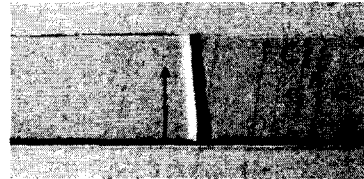


Fig. 3 Photograph of Laser cutting(25W, 10mm/s)

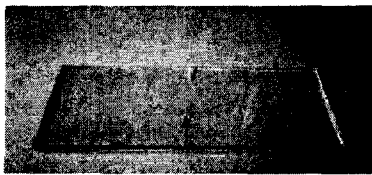


Fig. 4 Photograph of Laser cutting(25W, 15mm/s)

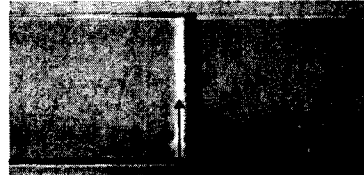


Fig. 5 Photograph of Laser cutting(25W, 9mm/s)

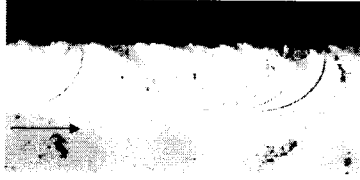


Fig. 6 Cross section of conventional cutting

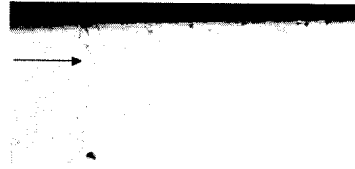


Fig. 7 Cross section of Laser cutting(25W, 9mm/s)



Fig. 8 Cross section of Vent

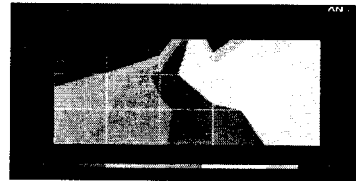


Fig. 9 Thermal distribution analysis

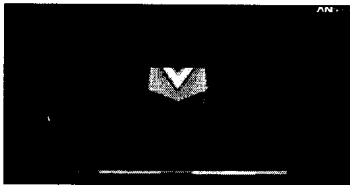


Fig. 10 Von Mises stress distribution

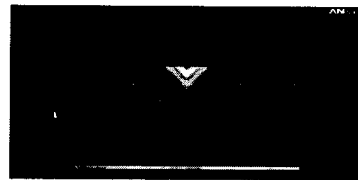


Fig. 11 Thermal-strain distribution

V. 참고문헌

1. J. F. Ready, "Industrial Application of Lasers", Academic Press, 1978.
2. N. Kameya, "Mitsuboshi Diamond Industrial Co., Ltd. Has developed a diamond laser scribing device Intelligence Technical Report, 8, 1999.
3. B. Hoekstra, "The future of laser glass cutting", 11, Information Display, 1999.
4. D. Wegerif, "Zero Width Cutting Technology", Display Manufacturing Technology Conference , 1998.