

레이저를 이용한 유리전단의 유한요소해석

Finite element analysis for shearing of glass using laser

충북대학교 대학원 김관우
충북대학교 기계공학부 조해용
한국기계연구원 정보장비 연구센터 이재훈, 서정

1. 서론

레이저를 이용한 비접촉식 유리전단은 가열과 냉각의 표면 열처리 기법으로써 가공 중 발생하는 열 응력과 압축에 강하고 인장에 약한 유리의 취성을 이용하는 방법이다 그리고 기존의 다이아몬드 등을 이용한 접촉식 절단보다 재료손실 없고 절단면이 우수한 특징과 함께 가공속도가 빠르고 자유 곡선가공이 가능하며 무소음의 청정 작업공간 확보 등의 큰 이점 들을 갖는다 따라서 관련 산업현장에서의 관심이 증대되고 있으며 디스플레이 시장이 발전함에 따라 그 적용분야가 늘어날 것이다

이에 관련된 실험적 연구로서 일본의 Kurobe¹⁾는 액정기판 정밀절단의 품질향상에 효과적인 열원 크기를 연구하였고 Ikeda²⁾은 유리에 연삭기로 크랙을 생성시킨 후 레이저로 전단하는 연구를 하였으며 Caprino³⁾와 Durand⁴⁾는 CO₂레이저와 Nd YAG레이저에 의한 전단 특성을 연구하였다 새로운 장비개발은 레이저 빔변수(형상, 파워, 속도, 간격 등)와 냉각변수(워터제트의 노즐형상, 속도 등)의 변화에 따른 많은 실험이 요구되고 이로 인해 발생하는 비용 및 시간소비의 문제가 있다 이러한 실험적 방법에 반해 레이저 유리전단의 해석적 연구는 빔변수, 냉각변수에 따른 적정 전단조건 예측이 가능하므로 보다 성공적인 장비개발에 큰 도움을 줄 수 있을 것이다 해석적 연구로서 Rosenthal⁵⁾이 레이저빔 열원의 해석적 모델로 점과 선의 열유속 식을 처음 제시한 이후 Duley⁶⁾가 가우시안 분포를 갖는 열원의 형상을 수식적으로 도식화하였으며 국내에서는 Jeon⁷⁾등이 열원형태에 따른 불투명 고체의 열전달 해석을 통해 열원의 주기와 반경, 재료의 두께가 온도분포에 미치는 영향을 연구하였다

열응력 해석과 실험을 병행한 본 연구에서는 상용유한요소 프로그램인 MARC를 이용하여 레이저와 워터제트에 의한 유리전단 시뮬레이션을 하였고 그 결과를 실험과 비교분석 하였다 해석을 통해 원형, 타원, 이중 타원형상의 이동열원 모델, 워터제트의 냉각효율, 빔파워 등의 변수가 유리전단에 미치는 영향을 파악하였고 실험을 통한 전단면 품질비교로써 그 결과를 검증하였다 이를 통해 조건에 따른 전단 기구의 이론적 해석과 함께 레이저 유리전단의 적정조건을 설정하고자 하였다

II. 해석 및 실험방법

레이저와 워터제트의 이동경로 부근은 복잡한 열이력을 겪을 뿐만 아니라 열적 경계조건이 적용되는 부분으로서 Fig 1의 해석모델에서와 같이 세밀한 요소분할이 필요하고 모델은 폭 40mm, 길이 96mm, 높이 0.7mm인 얇은 평판이며 총 11280개의 요소와 13782개의 절점으로 이루어졌다

유리의 순간적인 국부 가열과 냉각으로 발생한 열충격은 미소크랙을 생성·전파 시킨다 이를 응용한 유리전단 공법의 시뮬레이션에 있어 가열열원 형상이 전단에 미치는 영향을 파악하기 위하여 가열시

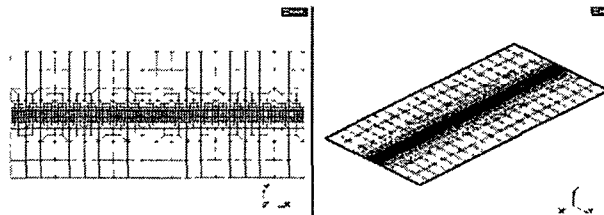


Fig. 1 Model of glass plate

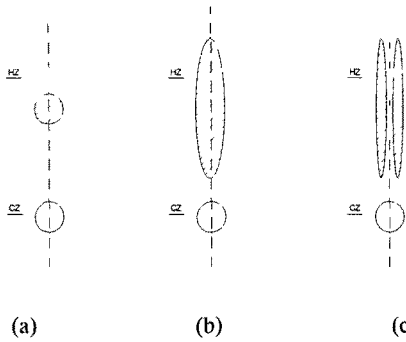


Fig. 2 Shapes of heating zone(HZ) and cooling zone(CZ)
 (a) circle (b) single ellipse (c) double ellipse

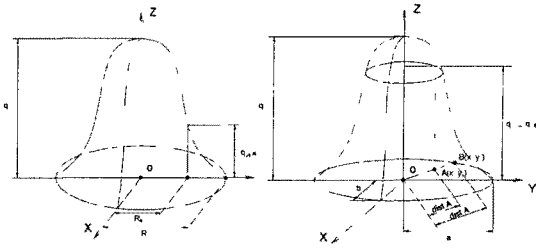


Fig. 3 Gaussian heat distribution
 (a) circle (b) ellipse

간이 짧은 Fig 2 (a)의 원형, 가열시간이 긴 Fig 2 (b)의 타원형, Fig 2 (c)의 이중 타원형 가우시안열원이 원형 워터제트에 의한 냉각과 함께 서브프로그램으로 작성되어 열적 경계조건으로 적용되었다 Fig 3은 가열 열원의 서브프로그램 작성에 이용된 원형과 타원형의 수학적 열원모델을 나타낸다 Fig 4는 해석과 실험의 장치구성과 전단과정 중 유리에서의 열전달을 도식적으로 나타내며 가열부 복사 및 자연대류 또한 해석에 고려되었다 기계적 경계조건으로는 X, Y, Z축에 대한 변위구속이 적용되었다

열응력 해석에 있어서 기본적으로 재료의 기계적, 열적 물성은 온도에 따른 데이터로 해석에 적용되어야 한다 그러나 유리와 같은 취성재료의 경우 물성취득에 어려움이 있어 Table 1에서와 같이 전체 물성을 온도에 따른 데이터로 적용하지는 못하였다

Table 1 Material properties of glass

Mechanical Property	Young's Modulus	725 GPa (at 293K)
	Poisson's Ratio	0.24
	Mass Density	254E-6 kg/mm ³
	Breaking Stress	217 MPa
Thermal Property	Thermal Conductivity	0.0013 W/mm K
	Thermal Expansion	4.2E-6 mm/mm K
	Specific Heat	0.81 (at 293K)
	Emissivity	0.87

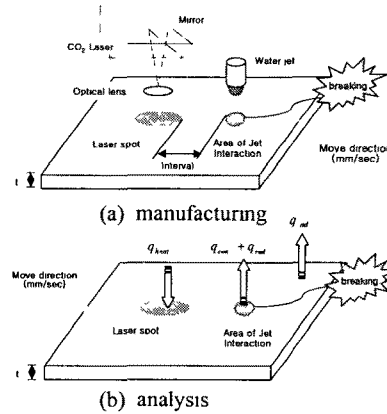


Fig. 4 Schematic process of glass breaking using laser

레이저를 이용한 유리전단의 해석조건으로 Table 2에 나타낸바와 같이 3가지 형태의 열원에 대하여 빔 파워, 워터제트의 냉각성능, 레이저와 워터제트의 사이거리를 변화시켰다 그 결과인 온도분포, 최대주응력분포를 분석하여 각 조건에서의 가열특성, 열 충격정도, 응력분포 특성 및 전단여부 등을 예측하였고 이를 바탕으로 가열 및 냉각의 적정조건 설정방향을 제시하였다 Table 3과 같은 조건으로 전단실험을 하였으며 전단면 형상 측정을 통하여 설정한 조건의 타당성을 검증하였다

Table 2 Considered condition for analysis

Heat source type	Beam Power (W)	Convection Coeff (W/mm ² K)	Interval (mm)	Velocity (mm/sec)
Circle	200	0.105	5~30	100
Single Ellipse	250	0.210		
Double Ellipse	300	0.315		

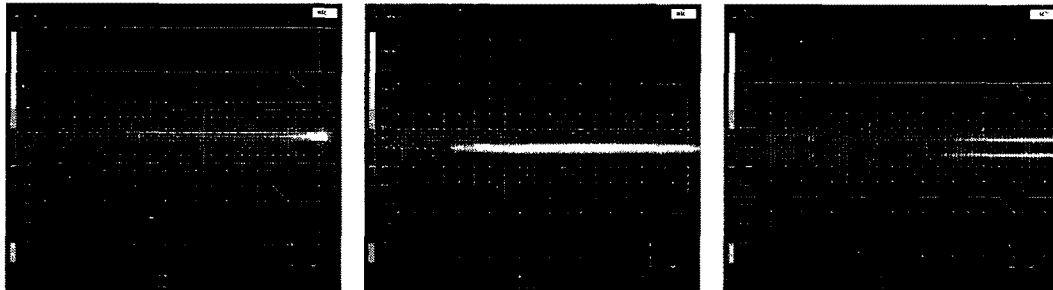
Table 3 Condition for experiment

Heat source type	Beam Power (W)	Convection Coeff (W/mm ² K)	Interval (mm)	Velocity (mm/sec)
Circle	200	0.1	0~30	100
Single Ellipse				
Double Ellipse				

III. 결과 및 고찰

3.1 해석결과

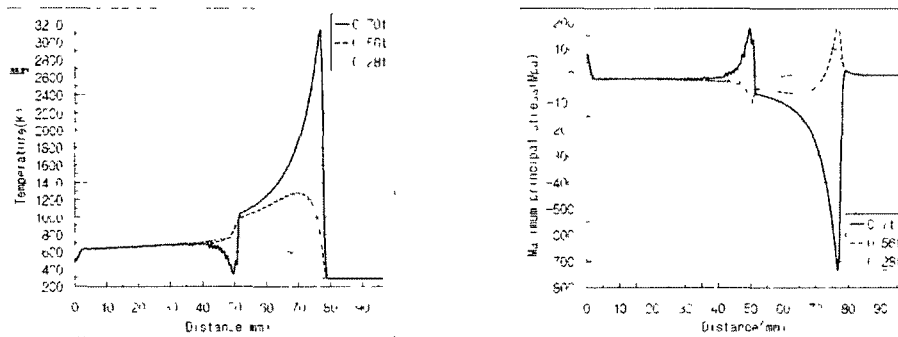
해석의 빔파워는 200~250W, 냉각부 충돌제트의 열대류계수 값은 $0.105\text{W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{K})$ 이고 레이저 빔과 워터제트 사이거리에 따른 냉각부 최대주응력 값들을 비교하여 그 중 가장 큰 인장응력이 발생하는 조건에서 결과를 정리하였다. 적용된 열대류계수 값은 레이저 유리전단 실험에서 워터제트 유량이 $7.64\text{E}-4$ 과 $9.86\text{E}-4 \text{ kg/s}$ 인 점을 감안하고 자료조사를 통해 추정된 0.1~0.2의 값에 근거한다. Fig 5는 총 100step의 해석과정 중 80step에서 각 열원에 따른 유리표면의 온도분포를 나타낸 것이다. 열원이 100mm/sec로 이동하므로 열원부 뒤쪽으로 꼬리형태가 있는 온도분포를 나타내는 것을 볼 수 있다.



(a) circle type heat source (b) single ellipse type heat source (c) double ellipse type heat source

Fig. 5 Temperature distribution

Fig 6은 반경이 1mm인 원형의 이동형 가우시안 열원과 워터제트를 적용한 해석결과로서 유리전단면의 깊이에 따른 온도와 최대주응력은 Fig 6과 같이 모델 전체 길이(96mm)에 걸쳐 분포됨을 알 수 있다. Fig 6 (a)의 빔 조사표면(0.7t)의 가열부 최고 온도는 3144K으로 유리의 용점인 1998K을 초과했으며 냉각부에서는 343K으로 가열과 냉각 시 2800K의 매우 큰 온도변화를 나타내었고 이 때 Fig 6 (b)에서 가열부 압축응력은 735Mpa, 냉각부의 인장응력은 179Mpa이었다. 깊이에 따른 해석결과에서 표면부(0.7t)의 값 변화가 극심함은 작은 열전도율과 큰 비열값을 갖는 유리의 열적물성에 기인되며 원형 열원의 경우 냉각부의 인장응력은 유리의 파괴강도 값(50~138Mpa)을 초과 했지만 과도한 가열이 필요하며 가열표면부에 큰 열충격이 발생되었다. 또한 냉각부에 발생된 인장응력은 표면부에만 국한되고 내부에는 압축응력이 발생됨으로 원활한 크랙전파에 문제가 있다. 따라서 원형열원은 빔 형상으로 부적합하고 전단면 품질면에도 좋지 못할 것으로 생각된다.



(a) temperature distribution

(b) maximum principle stress distribution

Fig. 6 Results in cutting section with a circular heat source(200W, 100mm/sec, $h=0.105$, interval=25mm)

Fig 7은 장축 50mm, 단축 1mm인 이동형 가우시안 타원열원을 적용한 전단면의 깊이에 따른 해석결과를 나타낸 것으로 Fig 7 (a)에서 가열 표면부(0.7t) 온도는 원형열원에서와 달리 뾰족하지 않은 곡선의 분포이고 250W의 보다 큰 입열량에 비해 최고온도는 1636K으로 유리의 용점(1998K)에 도달하지 않았으며 깊이에 따른 온도차이도 현격히 줄었다. 이것은 이동방향으로 긴 타원형 빔을 조사했을 때 그 길이

만큼 가열시간이 길어졌고 열원중심의 최대 에너지밀도 값이 보다 작아졌기 때문이며 에너지가 국부에 집중 되지 않음으로 Fig 7 (b)에서 가열부 표면의 압축응력(212Mpa)은 작아지고 냉각부에서 보다 큰 인장응력이 220Mpa이 발생되었다 또한 가열 표면의 순간적인 압축으로 인해 발생하는 유리 내부의 인장응력 크기도 0~50Mpa 정도로 비교적 작은 값들의 분포를 나타냈다 타원형의 빔 조사는 보다 안정적으로 유리표면의 온도를 상승시킴으로 열충격을 줄이고 가열 표면부의 압축응력 값을 낮춤으로써 냉각 시 유리전단부에 발생하는 인장응력 값을 크게 할 수 있다 따라서 빔의 형상은 원형 보다 타원형이 보다 적합할 것으로 생각된다

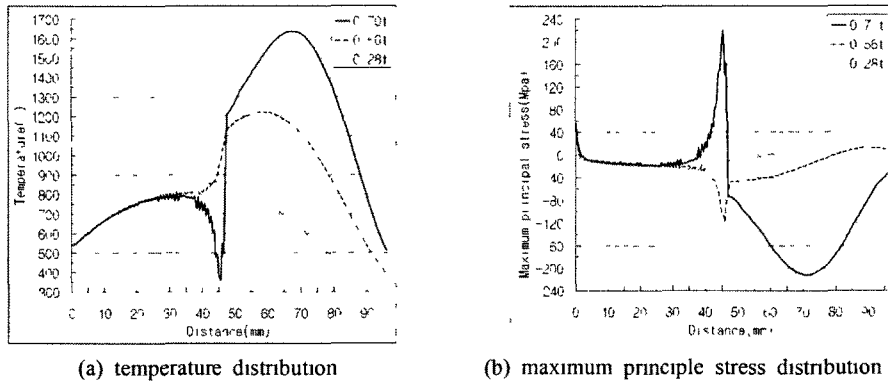


Fig. 7 Results in cutting section with a single ellipse heat source(250W, 100mm/sec, h=0.105, interval=5mm)

Fig 8은 입열조건으로 장축 50mm, 단축 1mm인 두 개의 타원열원을 적용한 경우에 유리전단면의 깊이 에 따른 온도 및 최대주응력분포의 예측결과로서 앞의 두 열원의 경우와 매우 다른 양상의 결과를 나타냈다 Fig 8 (a)의 가열 최고온도는 550K이고 냉각 최저온도는 314K으로 가열 후 냉각 폭(236K)이 매우 작고 깊이방향으로의 온도차이도 적음으로 가공 중 전단선상의 열충격은 매우 작을 것으로 생각된다 Fig 8 (b)의 최대 주응력분포에서 전단면 전체에 압축응력은 발생되지 않으며 깊이에 따른 응력값 차이 또한 작게 나타났다 원형과 타원형 열원의 경우와 달리 가열 시에도 전단선상에 인장응력(67Mpa)이 걸리며 냉각부 표면에서의 인장응력은 104Mpa이다 따라서 세 가지 형태의 열원 중 레이저 빔의 형상으로 가장 적합하며 유리전단면의 품질 또한 좋을 것으로 생각된다

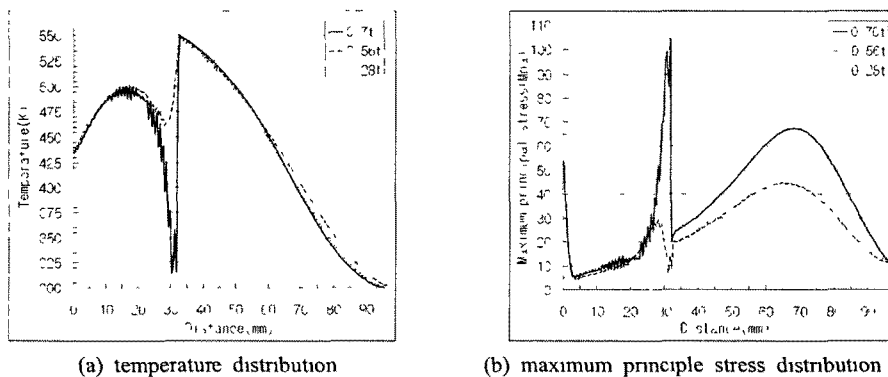


Fig. 8 Results in cutting section with a double ellipse heat source(125W×2, 100mm/sec, h=0.105, interval=20mm)

3.2 실험결과

실험조건은 해석조건과 동일하며 열원형태에 대한 유리전단 후 각 조건에서 가장 양호한 가공면의 형상 측정을 통하여 전단성능을 비교하였다 그러나 원형열원의 경우는 렌즈의 성능부족으로 반지름 1mm의 열원은 구현하지 못하고 10mm의 열원으로 실험하였다 CO₂레이저를 이용한 빔파워 200W와 250W의 유리전단에서 원형 빔의 경우는 가열과 냉각부의 사이거리가 가장 가까운 조건에서만 전단이 되었고 타원열원에서는 모든 사이거리에서 전단이 되었다 냉각부의 워터젯에서 분출되는 유량은 7.64×10⁻⁴와

$9.86 \times 10^{-4} \text{ kg/sec}$ 로 강제냉각에 대한 열대류계수 값은 0.1~0.2의 값으로 추정되었다

Fig 9의 전단면 형상그래프에서 Fig 9 (a)의 원형열원은 가공 형상오차 범위가 $500\mu\text{m}$ 로 측정되었고 Fig 9 (b)의 타원형열원은 $200\mu\text{m}$, Fig 9 (c)에서 두 개의 타원형열원은 $100\mu\text{m}$ 의 값을 나타냈다 따라서 열응력 해석의 온도와 최대주응력분포 결과분석을 통한 각 빔 형상의 전단성능 예측은 실험결과로써 검증되었고 레이저를 이용한 유리전단의 최적조건 설정을 위해서 보다 다양한 빔 형상의 고려, 실험을 통한 가열열원 및 충돌제트의 수학적 모델설계, 재료물성보충 등이 필요할 것으로 생각된다

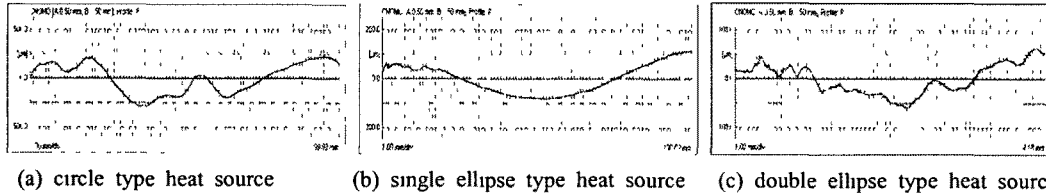


Fig. 9 The result of the measured shape profile

IV. 결론

상용 유한요소 프로그램인 MARC를 사용하여 레이저를 이용한 유리전단의 열응력 해석과 실험의 결과를 비교해 봄으로써 다음과 같은 결론을 얻었다

- 1 열원의 형태에 따른 온도 및 최대주응력분포의 해석결과 분석에서 레이저빔의 열원으로 두 개의 타원형 열원형태가 가장 적합할 것으로 예측되었고 실험 후 전단면의 형상측정으로써 검증할 수 있었다
- 2 레이저를 이용한 유리전단의 최적조건 설정을 위해서 보다 다양한 빔 형상의 고려, 실험을 통한 가열열원 및 충돌제트의 수학적 모델설계, 재료물성보충 등이 필요할 것으로 생각된다

V. 참고문헌

- 1 Kurobe, "Precision Breaking of a Liquid Crystal Display Panel(STN Type) by YAG laser", J Japan Society for Precision Engineering, Vol 63, No 7, 1997
- 2 Ikeda, "Study on Laser Braking of Glass Plate(1st Report) Generation and Growth of Vertical Cracks by Scribing", J Japan Society for Precision Engineering, Vol 62, No 3, pp 413-417, 1996
- 3 Caprino, G, "Cutting Glass Fiber Reinforced Composites Using CO₂ Laser with Multimodal-Gaussian Distribution", Mach Tools Manufact, Vol 35, No 6, pp 831-840, 1995
- 4 Durand, C, "An Experimental Analysis of a Nd YAG Laser Cutting Process for Machining Silicon Nitride", Int J Prod res, Vol 34, No 5, pp 1417-1428, 1996
- 5 Rosenthal, D, "Mathematical Theory of Heat Distribution during Welding and Cutting", Welding J, Vol 20, No 5, pp 220-234, 1941
- 6 Duley, W, "CO₂ Laser Effects and Applications", Academic Press, New York, 1976
- 7 Jeon, M H, "Heat Transfer Analysis of the Opaque Solid Heated by Pulsed Laser", Energy Eng J Vol 8, No 1, pp 181-188, 1999