

## 레이저를 이용한 유리절단의 유한요소해석

조해용\* · 김관우\* · 남기정\* · 이제훈\*\* · 서 정\*\*

\*충북대학교 기계공학부

\*\*한국기계연구원

### Finite Element Analysis for Breaking of Glass Using Laser

Haeyong Cho, Kwanwoo Kim, Gijeong Nam, Jaehoon Lee and Jeong Suh

\*Dept. of Mechanical Engineering, Chungbuk National University

\*\*IT Machinery Research Center, Korea Institute of Machinery & Materials

#### Abstract

Glass is one of brittle materials. Generally, brittle material is weak for tensile stress but strong for compression stress. Laser breaking of glass used this brittle characteristics. Laser breaking of glass was simulated to optimize breaking condition by using commercial FEM code MARC which is applicable to thermo-mechanical coupling analysis. Various shapes of heat sources were applied to the analysis and the distance between heating and cooling source were varied for each simulation. The shapes of heat sources were circle, single and double ellipse and the distance was varied from 0mm to 30mm. Moving heat sources were designed on the basis of experimental condition. As a result, double elliptic shape of heat source was the most suitable among them in laser breaking of glass. And it should be useful to determine optimal condition of laser breaking for glass.

**Key words** : Glass, Laser, Breaking, FEM, Heat treatment, Heat source

## 1. 서 론

레이저를 이용한 비접촉식 유리절단은 국부의 레이저 가열과 워터제트 냉각의 표면 열처리 기법을 이용한다. 즉 가열부에는 압축응력이, 냉각부에는 인장응력이 발생되며 이 인장응력과 취성재료인 특성으로 크랙이 깊이 방향으로 전파되어 절단된다. 이것은 기존의 다이아몬드 등을 이용한 직접절단과 비교해 볼 때 재료손실이 적고 가공속도가 빠르며 절단면이 우수할 뿐만 아니라 무소음의 청정 작업공간 확보 등의 큰 이점들을 갖는다. 따라서 관련 산업현장에서의 관심이 증대되고 있으며 디스플레이 시장이 발전함에 따라 그 이용분야가 늘어날 것으로 생각된다.

이에 관련된 실험적 연구로서 일본의 Kurobe<sup>1)</sup>는 액정기판 정밀절단 품질향상에 효과적인 열원 크기를 연구하였고 Ikeda<sup>2)</sup>는 연삭기로 유리표면에 미소크랙을 생성시킨 후 레이저로 절단하는 가공법에 대해 연구하였으며 Caprino<sup>3)</sup>와 Durand<sup>4)</sup>는 CO<sub>2</sub>레이저와 Nd:YAG레이저에 의한 취성재료의 절단특성을 연구하였다. 새로운 장비개발은 적정 절단조건 설정을 위한 레이저 빔변수(형상, 파워, 속도, 간격 등)와 냉각변수(워터제트의 노즐형상, 속도 등) 변화에 따른 많은 실험이 요구되는 실정임으로 비용 및 시간소비의 문제가 있다. 이러한 상황에서 해석적 연구는 빔변수, 냉각변수에 따른 많은 실험을 줄이면서 적정 절단조건 예측이 가능함으로 위의 문제해결에 도움을 줄 수 있을 것이다. 해석적 연구로서는 Rosenthal<sup>5)</sup>이 레이저빔 열원의 해석적 모델로 점과 선의 열유속 식을 처음 제시한 이후 Duley<sup>6)</sup>가 가우시안 분포를 갖는 열원의 형상을 수식적으로 도식화하였고 국내에서는 Jeon<sup>7)</sup> 등이 열원형태에 따른 불투명 고체의 열전달 해석을 통해 열원의 주기와 반경, 재료의 두께가 온도분포에 미치는 영향을 연구하였다.

본 연구에서는 상용유한요소 프로그램인 MARC를 이용하여 레이저와 워터제트에 의한 유리절단 시뮬레이션을 하였고 그 결과를 실험과 비교분석 하였다. 해석을 통해 원형, 타원, 이중 타원형의 이동열원 모델, 워터제트의 냉각효율, 빔파워 등의 변수가 유리절단에 미치는 영향을 파악하고 특히 레이저 빔의 적합한 형상을 제시하고자 하였으며 그 결과를 절단면 품질비교로써 검증하기 위한 실험을 하였다.

## 2. 해석 방법

MARC의 열응력 해석 전, 후 처리과정을 포함한 전체적인 해석과정은 Fig. 1과 같다. 전처리과정에서 해석모델의 요소분할, 유리 표면에서의 이동형 열원에 의한 입열, 워터제트에 의한 강제대류, 자연대류, 복사에 대한 열적 경계조건 및, X, Y, Z축 변위구속에 대한 기계적 경계조건설정, 상온의 재료 초기 온도설정, 재료의 열적 · 기계적 물성 입력을 한다. 레이저 유리절단 시뮬레이션 후 해석결과로써 온도분포와 최대 주응력분포 및 열유속을 분석한다. 열유속으로 외부 열원에 의한 재료의 가열 및 냉각 정도를 파악할 수 있고 온도분포를 통해 레이저 빔과 워터제트의 변수변화에 따른 가열 및 냉각특성, 열충격 정도를 알 수 있다. 또한 각 조건별 최대 주응력분포 결과로 재료 내의 발생응력 특성 및 크기, 가공여부, 열원형상

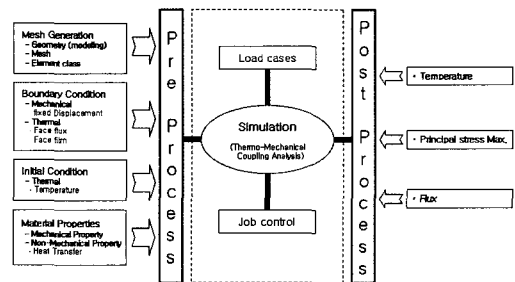


Fig. 1 The procedure of analysis

에 따른 절단품질 등을 예측할 수 있다. 그리고 해석과 동일 조건인 유리절단 시편의 표면조도를 측정, 비교하여 적정 레이저빔 형상과 절단조건을 설정하고자 하였다.

2.1 해석모델

해석모델의 크기는 폭 40mm, 길이 96mm, 높이 0.7mm이고 대칭 중심인 레이저와 워터제트의 이동경로 부근은 복잡한 열이력을 겪을 뿐만 아니라 열적 경계조건이 적용되는 부분이므로 Fig. 2와 같이 조밀하게 요소 분할하였다.

2.2 이동형 열원모델

순간적인 국부 가열과 냉각으로 유리표면에 발생된 열충격은 미소크랙을 생성·진파시킨다. 여기에서 레이저 빔의 가열열원 형상이 절단에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Fig. 3의 열원 형상에 따른 가열과 원형 워터제트에 의한 냉각을 서브프로그램으로 작성하여 열적 경계조건으로 적용하였다. Fig. 4는 원형 및 타원형 가열열원의 서브프로그램 작성에 이용된 원형과 타원형의

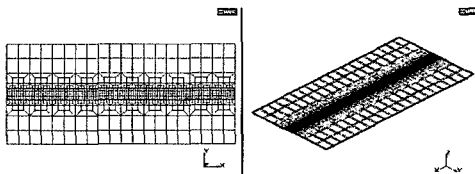
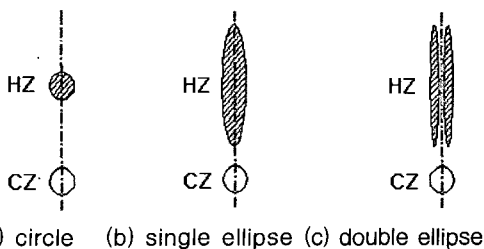


Fig. 2 Model of glass plate



(a) circle (b) single ellipse (c) double ellipse

Fig. 3 Shapes of heating zone(HZ) and cooling zone(CZ)

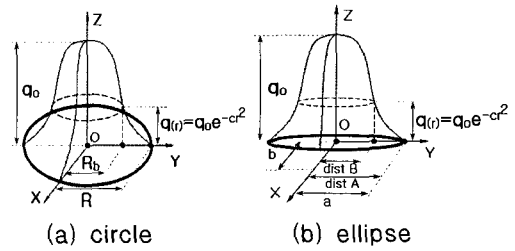


Fig. 4 Gaussian distribution of heat source

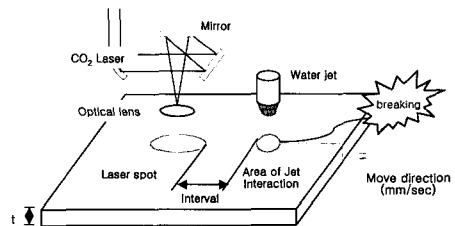
수학적 열원모델을 나타낸 것으로 원형 가우시안 열원의 단위면적당 입열량을 수식적으로 표현하면 다음 식과 같다. 여기에서  $Q$ 는 단위면적당 입열량,

$$Q = Q_0 \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right)$$

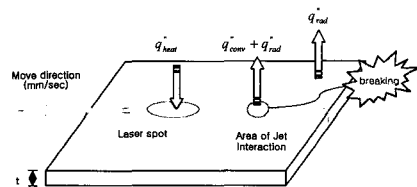
$Q_0$ 는 열원중심의 최대 에너지밀도,  $r$ 은 열원중심부터 입열 지점까지의 거리,  $r_0$ 는 가우시안 정규분포 반경 값이다. 타원형 열원은 위의 기본식을 응용하여 적용하였다.

2.3 경계조건 및 물성치

Fig. 5의 실험장치 구성에 대한 열응력 해석을 위해 열원형상에 따른 입열, 워터제트에 의한 냉각, 가열부 복사에 대한 서브



(a) manufacturing



(b) analysis

Fig. 5 Schematic process of laser breaking for glass

프로그램을 작성하여 열적 경계조건으로 적용시켰고 자연대류 또한 해석에 고려하였다. 기계적 경계조건으로 X, Y, Z축에 대한 변위를 구속하였다.

열응력 해석에 있어서 재료의 기계적, 열적 물성은 온도에 따른 데이터가 적용되어야 한다. 유리의 경우 물성취득에 어려움이 있어 Table 1의 데이터를 적용하였다.

### 2.4 해석 및 실험조건

Table 2 해석조건에 나타난 바와 같이 3가지 열원형태에 대해서 빔파워, 워터제트의 냉각성능, 레이저와 워터제트의 사이거리를 변화시켰다. 그 결과인 온도분포, 최대주응력분포 분석을 통해 열원평가 및 가열 및 냉각의 적정조건 설정방향을 제시하고자 하였다.

해석을 통해 예측된 열원에 따른 적정 절단조건으로 Table 3 조건의 실험을 하였으

며 절단면 조도측정을 통하여 해석결과의 타당성을 검증하고자 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 해석결과

빔파워 200W(원형) 및 250W(타원, 두 개 타원형), 냉각부 충돌제트의 열대류계수 값이 0.105W/(mm<sup>2</sup>·K)인 조건에서 레이저 빔과 워터제트 사이거리에 따른 냉각부 최대주응력 값들을 비교하여 그 중 가장 큰 인장응력이 발생하는 조건에서 결과를 정리하였다.

Fig. 6은 각 열원에 따른 유리표면의 온

Table 1 Material properties of glass

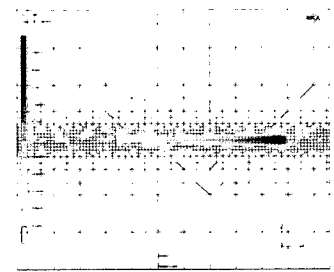
Mechanical Property	Young's Modulus	72.5 GPa (at 293K)
	Poisson's Ratio	0.24
	Mass Density	2.54E-6 kg/mm <sup>3</sup>
	Breaking Stress	50~138 MPa
Thermal Property	Thermal Conductivity	0.0013 W/mm·K
	Thermal Expansion	4.2E-6 mm/mm·K
	Specific Heat	0.81 (at 293K)
	Emissivity	0.87

Table 2 Considered condition for analysis

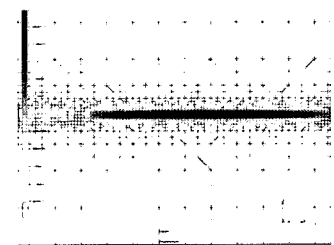
Heat source type	Beam Power (W)	Convection Coeff. (W/mm <sup>2</sup> ·K)	Interval (mm)	Velocity (mm/sec)
Circle	200	0.105	5~30	100
Single Ellipse	250	0.210		
Double Ellipse	300	0.315		

Table 3 Experimental condition of laser breaking for glass

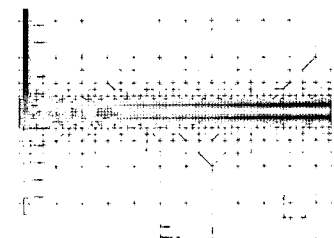
Heat source type	Beam Power (W)	Convection Coeff. (W/mm <sup>2</sup> ·K)	Interval (mm)	Velocity (mm/sec)
Circle	200	0.1	0 ~ 30	100
Single Ellipse		0.2		
Double Ellipse	250			



(a) circle type heat source



(b) single ellipse type heat source



(c) double ellipse type heat source

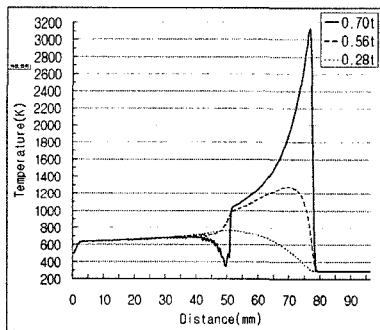
Fig. 6 Temperature distribution

도분포를 나타낸 것이다. 이동형 열원의 적용으로 가열부에 긴 꼬리모양의 온도분포가 형성되며 냉각부에서 순간적인 급속한 온도하강으로 압축에서 인장으로 변하는 열충격이 발생됨을 알 수 있다.

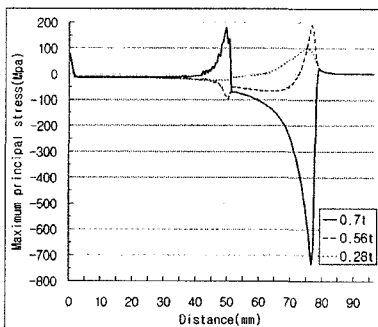
Fig. 7은 반경 1mm인 원형의 이동형 가우시안 열원과 워터젯을 적용한 해석결과이다. 유리 절단면의 깊이에 따른 온도와 최대주응력은 Fig. 7과 같이 모델 전체길이(96mm)에 걸쳐 분포됨을 알 수 있다. Fig. 7 (a)에서 유리표면(0.7t)의 가열부 최고온도는 3144K으로 유리의 용점(1998K)을 초과했으며 냉각부에서는 343K으로 가열과 냉각 시 2800K의 매우 큰 온도변화를 나타내었다. Fig. 7 (b)에서 가열부 최대 압축응력은 735Mpa로서 매우 큰 값을 나타낸 반면, 냉각부의 최대 인장응력 값은 179Mpa

이었다. 유리표면에서의 극심한 온도값 변화는 비교적 작은 열전도율과 큰 비열값의 열적물성에 기인된다. 원형열원의 경우 냉각부 최대 인장응력은 유리의 파괴강도 값(50~138Mpa)을 초과 했지만 과도한 가열이 필요하고 가열표면부에 큰 열충격이 발생되었다. 또한 냉각부에 발생된 인장응력은 표면부에만 국한되고 내부에는 압축응력이 발생됨으로 원활한 전단이 쉽게 발생할 수 없을 것으로 생각된다. 따라서 원형열원은 빔 형상으로 부적합하고 절단면 품질면에도 좋지 못할 것으로 생각된다.

Fig. 8은 장축 50mm, 단축 2mm인 타원형 열원을 적용한 절단면의 깊이에 따른 해석결과이다. Fig. 8 (a)에서와 같이 가열 표면부(0.7t) 온도는 원형열원에서와 달리 완만한 곡선의 분포를 나타내었다. 또한 250W

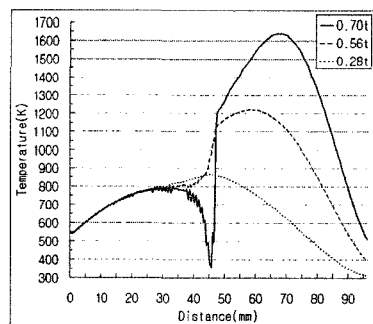


(a) temperature distribution

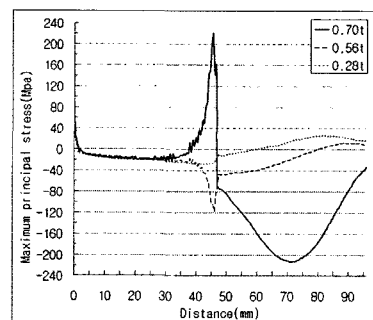


(b) maximum principle stress distribution

Fig. 7 Results in cutting section with a circular heat source(200W, 100mm/sec,  $h=0.105$ , interval=25mm)



(a) temperature distribution



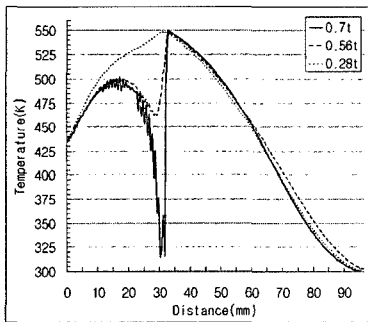
(b) maximum principle stress distribution

Fig. 8 Results in cutting section with a single ellipse heat source(250W, 100mm/sec,  $h=0.105$ , interval=5mm)

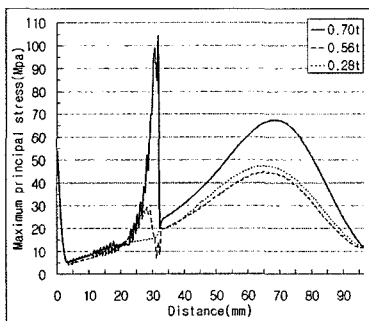
의 보다 큰 입열에 비해 최고온도는 1636K으로 유리의 용점(1998K)에 도달하지 않았고 깊이에 따른 온도차이도 현격히 줄었다. 이것은 이동방향으로 긴 타원형의 빔 조사로 그 길이만큼 가열시간이 길어졌고 조사면적이 커진 만큼 열원중심의 최대 에너지 밀도 값이 보다 작아졌기 때문으로 생각된다. 에너지가 국부적으로 집중 되지 않으므로 Fig. 8 (b)에서 가열부 표면의 압축응력(212Mpa)은 작아지고 냉각부에서 보다 큰 인장응력이 220Mpa이 발생되었다. 또한 가열 표면의 순간적인 압축으로 인해 발생하는 유리 내부의 인장응력 크기도 0~50Mpa 정도로 비교적 작은 값들의 분포를 나타내었다. 타원형의 빔 조사는 보다 안정적으로 유리표면의 온도를 상승시킴으로 열충격을 줄이고 가열 표면부의 압축응력 값을 낮춤

으로써 냉각 시 유리 절단부에 발생하는 인장응력 값을 크게 할 수 있다. 따라서 빔의 형상은 원형 보다 타원형이 보다 적합할 것으로 생각된다.

Fig. 9는 장축 50mm, 단축 1mm, 단축간 사이거리 1mm인 두 개의 타원열원을 적용한 경우에 절단면의 깊이에 따른 온도 및 최대주응력분포로서 앞의 두 열원의 경우와 매우 다른 양상의 결과를 볼 수 있다. Fig. 9 (a)의 가열 최고온도는 550K, 냉각 최저온도는 314K으로 가열 후 냉각 폭(236K)이 매우 작고 깊이방향으로의 온도차이도 적음으로 가공 중 절단선상의 열충격은 매우 작을 것으로 생각된다. Fig. 9 (b)의 최대 주응력분포에서 절단면 전체에 압축응력이 발생되지 않는 특성이 있음을 알 수 있고 깊이에 따른 응력값 차이 또한 작게 나타났다. 원형 및 타원형 열원의 경우와 달리 절단선상에 가열과 냉각 모두 67Mpa, 104Mpa의 인장응력이 발생됨으로 보다 안정적인 크랙성장이 가능하다. 따라서 세 가지 형태의 열원 중 레이저 빔의 형상으로 가장 적합하며 유리 절단면의 품질 또한 좋을 것으로 생각된다.



(a) temperature distribution

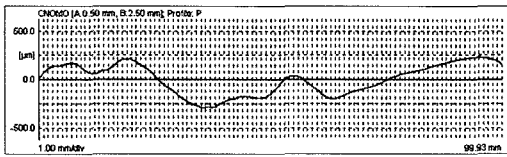


(b) maximum principle stress distribution

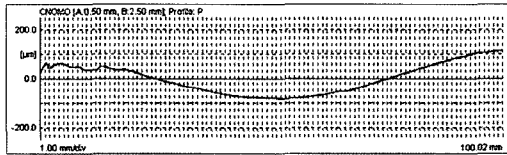
Fig. 9 Results in cutting section with a double ellipse heat source(125W×2, 100mm/sec, h=0.105, interval=20mm)

### 3.2 실험결과

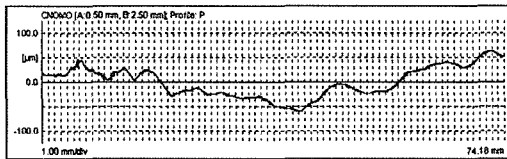
실험조건은 해석조건과 동일하며 열원형태에 대한 유리절단 후 각 조건에서 가장 양호한 가공면의 표면조도를 측정하여 해석 결과를 검증 하고자하였다. 그러나 원형열원의 경우는 렌즈의 성능부족으로 반지름 1mm의 열원은 구현하지 못하고 10mm의 열원으로 실험하였다. CO<sub>2</sub>레이저를 이용한 빔파워 200W와 250W의 유리절단에서 원형 빔의 경우는 가열과 냉각부의 사이거리가 가장 가까운 조건에서만 절단이 되었고 타원열원에서는 모든 사이거리에서 절단이 되었다. 냉각부의 워터제트에서 분출되는 유량은  $7.64 \times 10^{-4}$ 와  $9.86 \times 10^{-4}$ kg/sec로 강제냉



(a) circle type heat source



(b) single ellipse type heat source



(c) double ellipse type heat source

Fig. 10 The result of the measured shape profile

각에 대한 열대류계수 값은 0.1~0.2의 값으로 된다.

Fig. 10의 절단면의 표면조도그래프에서 Fig.10 (a)의 원형열원은 표면조도 값이 500  $\mu\text{m}$ 인 반면, Fig. 10 (b)의 타원형열원은 200  $\mu\text{m}$ , Fig.10 (c)에서 두 개의 타원열원은 100  $\mu\text{m}$ 의 값을 나타내었다. 따라서 열응력 해석에서 두 개의 타원형 열원이 가장 적합할 것으로 예측된 결과는 실험시편의 비교로써 검증될 수 있었다. 레이저를 이용한 유리절단의 최적조건 설정을 위해서는 보다 다양한 빔 형상의 고려, 실험을 통한 가열열원 및 충돌제트의 수학적 모델설계, 재료물성보충 등이 필요할 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

상용 유한요소 프로그램인 MARC를 사용하여 레이저를 이용한 유리절단의 열응력 해석과 실험의 결과를 비교해 봄으로써 다

음과 같은 결론을 얻었다.

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

#### 후 기

본 연구는 산업자원부의 지역산업기술개발사업 중 한국기계연구원 위탁사업의 연구 지원에 의하여 연구되었음

#### 참 고 문 헌

1. Kurobe, T., "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, M., "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 CO<sub>2</sub> 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., "CO<sub>2</sub> 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.