

## 합금공구강(STD11)의 레이저 절단에서 절단폭 형상 예측과 열 영향부에 관한 연구

조 용 무,\* 유 응 재,\*\* 김 재 도\*\*\*

### A Study on the Prediction of the Kerf Width Geometry and the Heat-affected zone in Laser Cutting of the Alloy Tool Steels(STD11)

Y. M. Cho,\* U. J. You,\*\* J. D. Kim\*\*\*

#### ABSTRACT

With the rapid growth of the die and mold, the new die making method has been developed. Especially, the laser is very useful, because it has a very fast cutting speed and is possible to manufacture complicated geometry. The quality of the laser cut is to be evaluated with respect to some characteristic quality parameters such as kerf width geometry, roughness and heat affected zone.

This paper describes the laser cut characteristic(heat-affected zone) of the alloy tool steels(STD11) and the prediction of the kerf width geometry by the FEM. On using the oxidation heat and laser beam, the prediction of kerf geometry is more accurate than that only by the laser beam. After laser cutting, the heat-affected zone is generated on the cutting cross section. The magnitude of hardness on the cutting cross section was similar to that of the heat treatment. It was possible to predict heat-affected zone by using the FEM program.

**Key Words** : kerf width geometry(절단폭 형상), laser cut(레이저 절단), FEM(유한요소법), oxidation heat(산화발열), heat-affected zone(열영향부)

\* 대우공업전문대학 금형설계과(정회원)

\*\* 인하대학교 기계공학과 대학원(정회원)

\*\*\* 인하대학교 기계공학과(정회원)

Nomenclatures

- $C_p$  : Specific heat (J/kg °C)
- [C] : Thermal capacity matrix
- $h$  : Heat transfer coefficient (W/m<sup>2</sup> °C)
- {f} : Heat flux vector
- K : Thermal conductivity (W/m°C)
- Q : Source/sink term
- [N] : Shape function matrix
- t : Time (sec)
- T : Temperature (°C)
- $n_y, n_z$  : Directional cosine
- $\Omega$  : Element domain
- { $\Phi$ } : Temperature vector of total nodal point
- $\rho$  : Density (kg/m<sup>3</sup>)

1. 서 론

금형 재료는 제품의 수량, 형상, 정밀도, 가공 되는 재료의 기계적 성질 및 가공방법 등을 고려하여 가장 적합한 재질을 선택해야 한다. 현재 사용되는 프레스금형 재료는 합금공구강으로 탄소공구강에 Cr, W, Ni, Mn, Mo, V 및 Co등을 한가지 이상 첨가시켜 기계적 성질을 개선한 것이다. 여러 합금강 중에서도 인성, 경도 및 충격성이 좋은 STD11은 열처리 후 경도가 높아 가공에 어려움이 있어 방전가공법을 이용하나, 이 방법은 가공시간이 길다는 단점이 있어 금형 제작 시간 단축에 어려움이 있다.<sup>(1),(2)</sup> 이에반해 레이저 가공 기술은 가공속도가 빠르고 가공재료에 구애됨이 없이 사용할 수 있는 장점 때문에 자동차 및 항공기 산업등 전 분야에 급속히 확산되고 있으며, 새로운 소재 개발에 따른 레이저의 사용이 빈번해 지고 있다. 그러나 금형 가공상 레이저를 이용하기 어려운 실정이었으나 다품종 소량 생산용 금형 및 새로 개발하는 시작 금형 등에 사용되기 시작하였으며, 이에 따라 STD11의 레이저 절단 특성에 관한 연구가 필요하게 되었다.<sup>(3),(4)</sup>

레이저 절단 가공은 고출력에 의한 용융 및 증발을 통하여 가공재료가 절단되며, 절단 품질을 결정하는 조건은 절단 속도, 절단폭의 크기, 열영향부의 크기, 가공후 공작물의 변형정도, 표면조도등이다. 따라서 양호한 절단품질을 얻기 위해서는 이러한 조건을 만족시켜야 하며 이를 위해서 적절한 레이저 절단가공 변수를

선택해야 한다. 절단가공에 영향을 주는 변수들을 최적화 하기 위하여 절단속도는 경제적인 문제로 가능한 한 빠르게 하고, 고 정밀도를 얻기 위해서 절단폭이 매우 작도록 해야 한다. 또 절단 단면은 작은 열 영향부, 좋은 표면 거칠기를 얻을 수 있도록 해야 한다. 그러나 최적의 가공변수를 결정하기 위한 정확한 수학적 접근은 어려우며 여러 가정으로 모델을 단순화하여 절단 메카니즘을 설명하고 있다. 또한, 유한요소법에 의한 절단폭 형상 예측에 대한 연구는 여러 변수로 인하여 현재도 연구 중에 있다.<sup>(3)~(5)</sup>

본 논문은 금형용으로 많이 사용되는 합금공구강(STD11)을 레이저 절단하여 절단폭의 형상을 유한요소법에 의해 예측된 결과와 비교 검토하였으며, 절단후 절단 단면의 열영향부에 관해서 고찰하였다.

2. 유한요소법을 이용한 해석

유한요소법을 이용한 레이저 빔의 열전달 해석은 주로 표면 경화처리에 관해서 많은 연구가 있으나 절단에 관한 것은 없는 실정이다. 이러한 이유는 산소를 이용한 레이저 절단에 사용된 에너지는 레이저 빔에 의한 에너지와 산소와 금속과의 산화 발열 반응 에너지의 합이며 여기에 강한 제트 가스 유동이 있어 해석하기 어려움이 있기 때문이다.<sup>(6)~(6)</sup> 그러나 에너지를 정확히 계산하기는 어려운 실정이나 몇가지 가정으로 단순화시킬 수 있다. 즉 열원 진행 방향으로 열원 이송속도가 열전달 속도보다 빠르다고 가정하고, 열원 진행 방향으로의 열전달 및 레이저 빔 입사측에서 보호가스에 의한 에너지 이동을 무시하면 2차원 해석이 가능하다. 또 재료는 등방체이며, 물리적 성질은 온도변화에 관계없이 일정한 것으로 가정하면 2차원 열확산 방정식은 다음과 같다.<sup>(7)~(10)</sup>

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = Q + \left[ k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] + \left[ k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (1)$$

레이저 빔의 초점이 가공물 표면에 맞추어 에너지 밀도를 계산하며, 복사에 의한 열손실은 없는 것으로 가정하여 초기조건과 경계조건은 다음과 같다.

$$\text{초기조건 ; } T = T_1 \quad \text{at } t = 0 \quad (2)$$

$$\text{경계조건 ; } k \frac{\partial T}{\partial t} n_y + k \frac{\partial T}{\partial z} n_z + h(T - T_\infty) = 0 \quad (3)$$

지배방정식과 경계조건 및 초기조건을 이용하여 사각

형 요소를 유한개로 분할하면 요소내의 온도분포는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T(y, z, t) = [N(y, z)]\{\Phi(t)\} \quad (4)$$

여기서  $N$ 은 절점온도와 요소내 온도 등을 결합한 형상 함수 행렬로서 요소 절점수가  $n$ 개라 하면  $[N]$ 은  $1 \times n$ 의 행렬로 구성되고,  $(t)$ 는 시간  $t$ 에서 요소의 절점온도 벡터를 나타낸다. 형상함수  $[N]$ 을 가중함수로 하여 식(1)에 Galerkin법을 적용하여 식을 정리하면 비정상 열전도 문제에 대한 유한요소식은 식(5)과 같다.

$$[K]\{\phi\} + [C]\frac{\partial \phi}{\partial t} = \{f\} \quad (5)$$

이때  $\Gamma$ 는 전체 절점의 온도벡터,  $[K]$ 는 열전도 행렬,  $[C]$ 는 열용량 행렬,  $\{f\}$ 는 열유속 벡터이다.

시간  $(t + \Delta t/2)$ 에서 절점온도 벡터의 시간 미분은 다음 식으로 표현된다.

$$\left\{ \frac{\partial \phi}{\partial t} \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right) \right\} = \frac{\{\phi(t + \Delta t)\} - \{\phi(t)\}}{\Delta t} \quad (6)$$

비정상 항은 유한차분법 중에 Crank-Nicolson 차분식을 이용하여 식(5)을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \left( \frac{1}{2}[K] + \frac{1}{\Delta t}[C] \right) \{\phi(t + \Delta t)\} \\ & = \left( -\frac{1}{2}[K] + \frac{1}{\Delta t}[C] \right) \{\phi(t)\} + \{f\} \end{aligned} \quad (7)$$

식(7)에 초기조건을 대입하고 Gauss소거법을 이용하여 미소시간 증분  $t$ 에 따른 전영역의 열전도 과정을 레이저 주사속도에 따라 해석하였다.

온도해석에 사용된 절점 및 요소수는 각각 546개와 500개로 하여 요소 크기에 비교적 영향을 받지 않는 사각형 요소를 취하여 4절점 요소를 이용하였다.

해석에 사용된 에너지 원은 1) 에너지 밀도를 레이저 빔만을 고려할 경우, 2) 레이저 빔에 산화발열을 고려할 경우 2가지에 대해서 해석하였다. Herziger<sup>(10)</sup>에 의하면 반응시간이  $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 초일 때 레이저 절단에 필요한 에너지 밀도는  $10^{10} \sim 10^{11} \text{W/m}^2$ 의 범위라고 하였다. 에너지 원을 레이저 빔만을 고려하면 Fig. 1의 (a)와 같이 Z방향에 따라 계산한 값을 사용하였다. (b)는 초기에 레이저 빔에 의한 에너지가 작용하고 두께방향(Z방향)에 따라 산화발열에 의한 에너지가 공급된다고 가

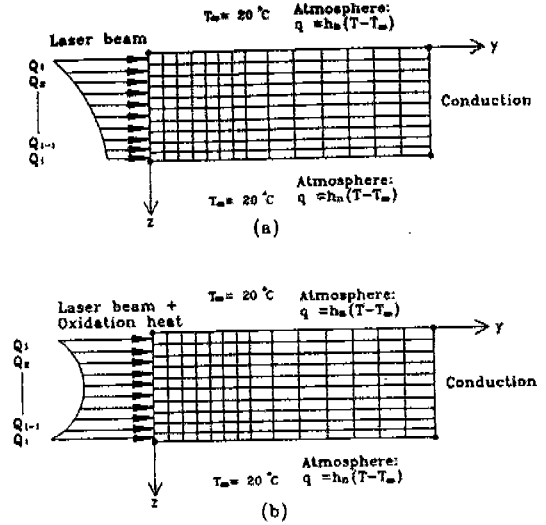


Fig. 1 Solution domain and boundary condition:  
(a) Heat source by beam  
(b) Heat source by laser beam oxidation heat.

정을 한 것이다. 에너지 밀도는 레이저 출력을 고려하여 Z방향에 따라 Beer's law에 의하여 계산하였고 여기에 Ivarson<sup>(11)</sup>의 산화발열 실험값을 더하여 에너지 원으로 해석하였다.

### 3. 레이저 절단실험

#### 3.1 실험재료

사용된 실험재료는 KS 규격으로 STD11(AISI 규격으로 D2)인 합금공구강으로, 프레스 금형의 블랭킹 다이(Blanking die), 포밍(Forming die), 펀치(Punch) 및 사출금형등에 많이 사용되는 재질이다. 재료의 물성치와 화학적 성분은 Table 1, 2에 나타내었다.

Table 1 Physical properties of material for analysis.

Thermal conductivity (W/m °C)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Specific heat (J/kg °C)	Melting temperature (°C)	Boiling temperature (°C)
17.7	7612	460	1496	2900

Table 2 Chemical composition of STD11 for experiment. (wt%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
1.48	0.32	0.4	11.4	0.83	0.2

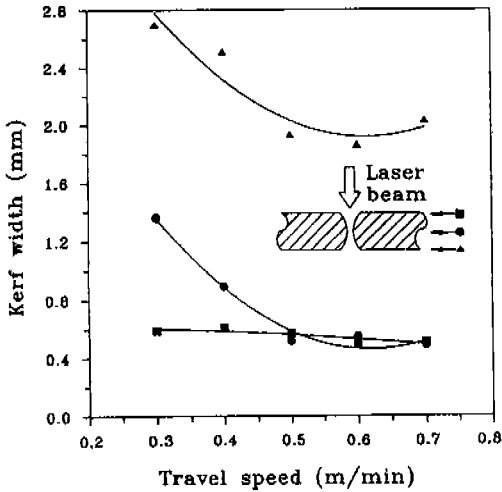


Fig. 2 Variation of kerf width with the travel speed (Beam: CW, power: 1.2kW, gas pressure: 0.47MPa material: STD11)

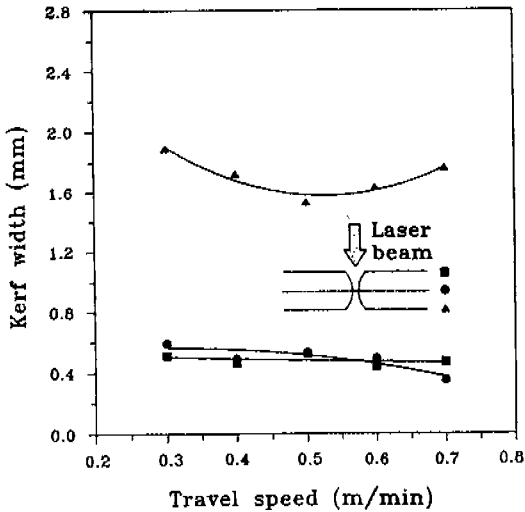


Fig. 3 Variation of kerf width with the travel speed (Beam: CW, power: 1.2kW, gas pressure: 0.74MPa material: STD11)

### 3.2 레이저 시스템

본 연구는 Nippei Toyama에서 제작한 1.2 kW CO<sub>2</sub> 레이저(초점거리 127mm, 파장 10.6μm)를 사용하였다. 레이저 발진장치는 고속 축류타입이고 초점을 맞추기 전의 레이저 빔 직경은 약 18mm이다. 절단에서 가장 좋은 모드는 TEM<sub>00</sub>이나, 사용된 레이저의 모

드가 TEM<sub>01</sub>\*기 때문에 그대로 사용하였다.

### 3.3 레이저 절단 실험

실험은 레이저 절단가공 가능 변수범위에서 이루어졌다. 레이저 출력은 1.2kW이며 주사속도는 0.25m/min ~ 0.75m/min, 보조가스의 압력을 0.47~0.74MPa의 범위에서 변경시켰다. 초점위치를 재료 표면에 일치시키고 산소를 보조가스로 이용하여 폭 30mm의 강판을 15mm 절단 하였다.

절단후 절단폭은 절단 표면에서 표면, 중간 및 하부를 측정하였고, 표면거칠기는 절단면 상부에서 0.5mm, 2.5mm의 위치를 측정하였다. 금속의 조직은 절단된 시편을 폴리싱하여 Villela's agent에 담가 처리하여 금속광학현미경을 사용하여 금속조직 검사를 하였다. 경도시험은 비커스 경도시험기를 사용하였다.

## 4. 결과 및 고찰

Fig. 2~Fig. 3은 STD11을 1.2kW CO<sub>2</sub> 레이저로 절단했을 때 보조가스와 주사속도에 따른 절단폭을 측정한 결과이다. 주사속도가 빠르면 절단 단면의 표면과 중심부에서 절단폭의 크기는 약 0.4mm이나, 절단 단면 하부의 경우는 감소하다 커지는 경향을 나타내고 있다. 이러한 이유는 주사속도가 빠르면 레이저 빔에 의한 입사 에너지가 적고 보조가스에 의한 용융침의 냉각 능력이 떨어져 산화발열이 지속적으로 작용하여 절단하부의 용융부가 커지기 때문으로 생각된다. Fig. 2에서 주사속도가 0.3 m/min로 느리면 입사 에너지가 크기 때문에 절단 단면의 중심부와 하부에서 다른 주사속도에 비해 절단폭이 크게 나타났다. 보조가스의 압력은 최소압력 이상이 되면 절단 폭에 큰 영향을 주지 않으나, 주사속도가 느리고 보조가스 압력이 낮으면 가공이 어렵기 때문에 일정 압력 이상으로 유지해야 한다.

Photo. 1은 보조가스 압력 0.74MPa를 사용했을 때 절단폭을 나타낸 절단 단면 사진으로, 절단 표면에서 아래로 내려감에 따라 감소하다가 절단하부에서는 크게 증가하고 있는데, 이것은 보조가스의 압력과 산화발열에 의해 절단하부의 절단폭이 크게 된 것으로 생각된다. 펄스 빔의 경우는 재료가 얇은 경우 더 협소한 절단폭을 얻을 수 있다.

Fig. 4는 가공재료에 가해지는 에너지원을 레이저 빔 하나로 가정했을 때 해석한 결과를 실험 값과 비교

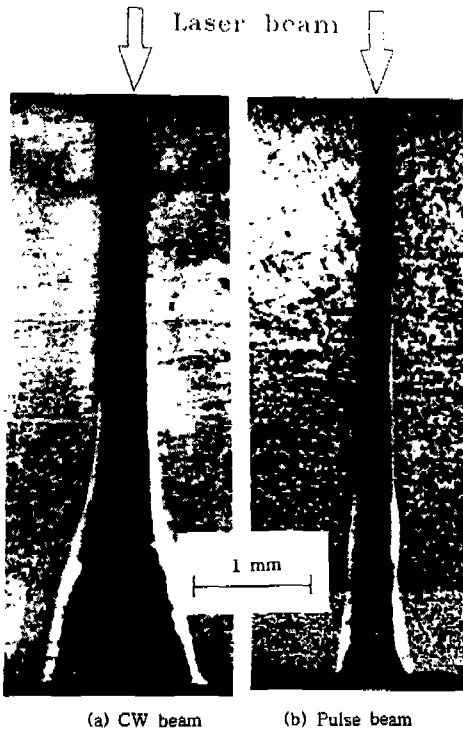


Photo. 1 Example of cutting section by laser (Power: 1.2kW, travel speed: 0.4m/min).

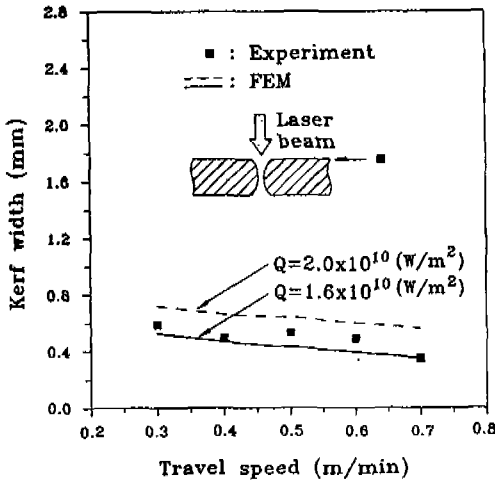


Fig. 4 Comparison of experimental kerf width with theoretical results at the surface(Heat source by Laser beam).

한 것이다. 에너지 밀도가  $1.59 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$  일 때 실험 결과에 근사함을 알 수 있으며, 주사속도가 커짐에 따

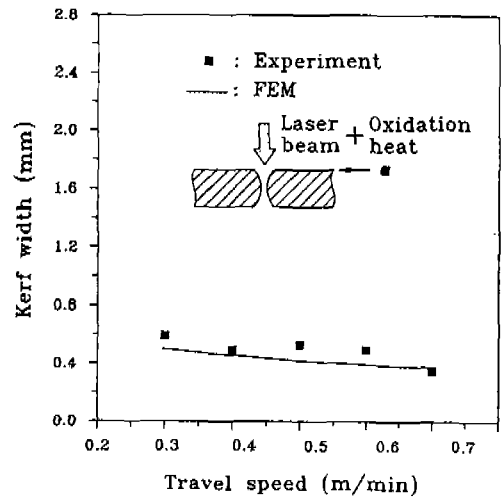


Fig. 5 Comparison of experimental kerf width with theoretical results at the surface(Heat source by Laser beam & oxidation heat).

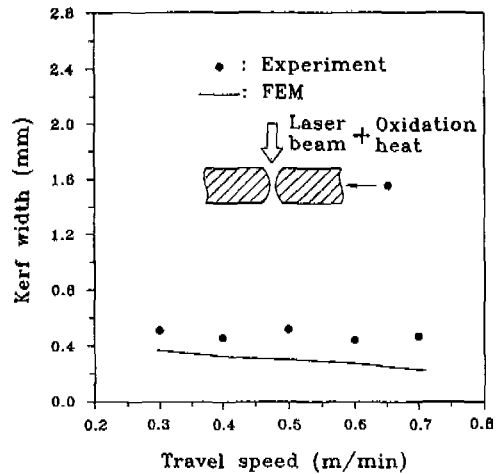


Fig. 6 Comparison of experimental kerf width with theoretical results at the middle(Heat source by Laser beam).

라 절단폭이 작아짐을 보여주고 있다. 이러한 이유는 주사속도가 증가함에 따라 가공재료에 입사되는 에너지 밀도가 작아지고 때문이다.

Fig. 5는 에너지원을 레이저 빔과 산화발열이 동시에 작용한다고 가정했을 때 해석한 결과와 표면에서의 절단폭을 비교한 것으로, 에너지 밀도가  $1.6 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$  일 때 실험 값과 일치하였다. Fig. 4와 비슷한 에너지 밀도에서 일치하는 이유는 레이저 절단 초기에

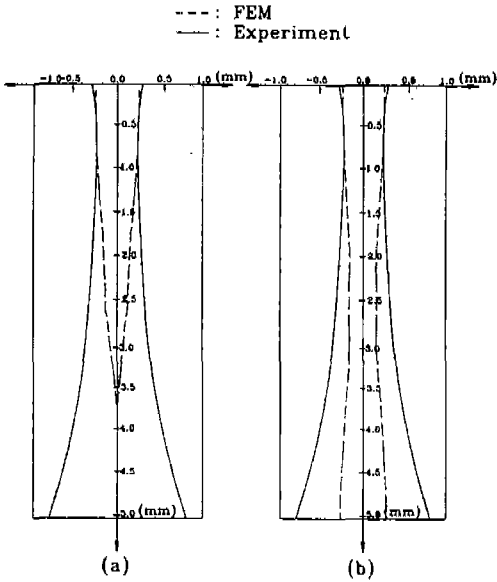


Fig. 7 Comparison of experimental and theoretical results at the geometry of cross section (Beam: CW travel speed: 0.7m/min, gas pressure: 0.74MPa):  
 (a) Heat source by Laser beam  
 (b) Heat source by Laser beam & oxidation heat.

서는 주로 레이저 빔만을 작용하기 때문이다. Fig. 6은 절단면 중심부의 절단폭을 예측한 것으로 실험 값 보다 작게 나타나고 있다. 레이저 절단가공에서 보조가스의 역할은 가공재료의 화학적인 작용에 의한 에너지 증대와 용융된 재료를 빠르게 제거하는 것으로, 이 때문에 절단폭의 변화를 줄 수 있다. 그러나 이론적 해석에서는 보조가스의 영향을 무시하여 해석했기 때문으로 생각된다. Fig. 7은 주사속도가 0.7m/min일 때 절단폭 단면을 예측한 것으로 (a)는 레이저 빔만을 고려한 경우이고 (b)는 레이저 빔과 산화발열을 고려한 것이다. 하부의 절단폭을 예측한 것으로 실험과 많은 차이가 있다. 레이저의 초점을 표면에 고정시키고 가공할 경우에 일반적으로 절단면 하부의 형상은 상부보다 커진다. 이러한 이유는 용융과 증발에 의한 칩이 보조가스의 강한 압력에 의해 분출되어 절단폭이 증대되거나, 피절단물이 용융되면 흡수율이 증대되어 용융량이 증대되기 때문에 커지는 것으로 알려졌다.<sup>(5) (6), (14) (15)</sup> 본 해석에서는 이와 같은 영향을 고려하지 않았기 때문에 차이가 발생한 것으로 생각된다. 따라서 본 해석은 절단면 상하부

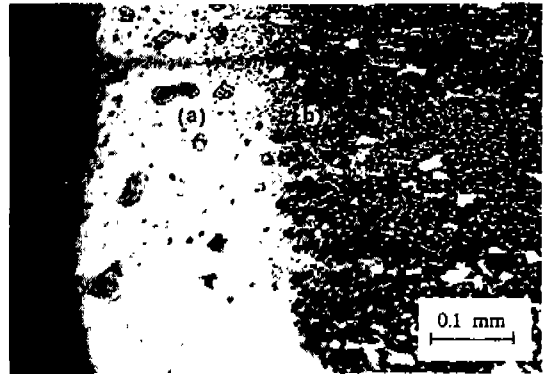


Photo. 2 Cross section by laser cutting(Power: 1.2kW, travel speed: 0.4m/min):  
 (a) Heat affected zone (b) Base metal

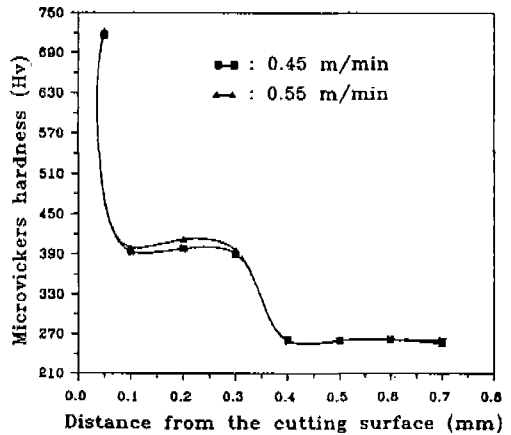


Fig. 8 Microvickers hardness distribution at cutting cross section(Power: 1.2kW, material: STD11).

의 절단폭이 크게 다르지 않는 경우나 두께가 얇은 재료에는 예측이 가능하다. 하부의 정확한 예측은 절단 하부에서의 열원을 정확히 계산할 수 있는 식 또는 실험이 필요할 것으로 생각된다.

Photo. 2는 절단 단면을 나타낸 사진이다. (a)는 경화된 부분이고, (b)는 모재이다. (a)부의 경우는 레이저 절단시 재융착 및 열경화에 의해 경도가 높아진 부분이다. Fig. 8은 주사속도 0.45, 0.5m/min일 때 절단 단면의 경도분포를 도시한 것이다. 모재 경도는 255 Hv인데 절단 후 절단면에서 0.05mm에서 717Hv, 0.2~0.3mm 부근에서는 394Hv의 경도분포를 보여주고 있다. 이 재료의 열처리 후 경도가 700Hv이므로 특

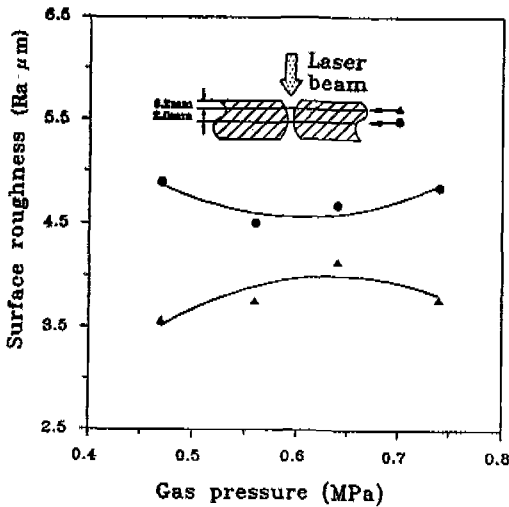


Fig. 9 Variation of surface roughness with the gas pressure (Beam: pulse, power: 1.2kW, travel speed: 0.55m/min, material: STD 11).

별한 열처리 없이 사용이 가능하다는 것을 알 수 있다. 또한, 이것은 방전가공후 방전에 의한 경도 증가보다 높게 나타나고 있다. 이러한 이유는 방전가공시 계속적인 아크 발생에 의한 칩이 방출되면서 2차 방전에 의한 약간의 풀림 처리가 되지만, 레이저 절단의 경우는 공기 중에서 급냉하거나 용융된 칩이 모재에 재응착하여 경도가 높아지기 때문인 것으로 생각된다.<sup>(15)</sup> 절단 후 경도의 증가는 프레스 금형의 펀치와 다이로 사용시 절단후 따로 열처리할 필요가 없으므로 간이 금형 제작시 제작시간을 단축할 수 있는 장점이 있다. Fig. 9는 절단면의 표면거칠기를 나타낸 것이다. 절단표면에서의 거칠기가 중심부보다 불량하나, 하부의 경우는 아주 거칠다. 프레스 금형에서 가공에 영향을 주는 깊이는 2mm미만 이므로<sup>(2), (15), (16)</sup> 펀치와 다이를 적층하여 사용하면 금형을 쉽게 제작할 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문은 1.2kW CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 금형 재료로 많이 사용되는 합금공구강(STD11)을 절단했을 때 절단폭의 형상을 유한요소법에 의한 해석으로 예측하였고, 열 영향부에 관해서 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 에너지 밀도가  $1.6 \times 10^{10} \text{W/m}^2$ 일 때 실험 값과

근사함을 알 수 있었다.

2) 에너지원으로 레이저 빔만을 고려한 경우 보다 산화발열과 레이저 빔만을 동시에 고려한 경우가 근사하게 절단 상부에서 실험 값에 접근함을 알 수 있었다.

3) 레이저 절단 후 절단면에서 0.05mm 정도가 열 영향부가 됨을 알 수 있었다.

4) 개발된 프로그램을 이용하여 레이저 절단후 절단면의 열영향부의 예측이 가능하며, 프레스 금형을 제작할 경우 다이와 펀치의 가공단면을 열처리 없이 사용할 수 있는 범위를 알 수 있다.

### 참고문헌

1. F. D. Jones, Die Design and Die Making Practice, Mech. Pub. Co., 1952.
2. 栗原昭人, 實用プレス金型設計法, 工業調査會, 昭和56.
3. K. A. Bunting et. al, "Toward General Theory of Cutting: A Relationship Between the Incident Power Density and the Cut Speed", Trans. of the ASME, 1975, pp. 116-122.
4. J. T. Luxon & D. E. Parker, Industrial Lasers and their Applications, Prentice-Hall, 1985.
5. D. Schucker et. al, "Dynamic Effects in Laser Cutting and Formation of Periodic Striations", SPIE, 1987, pp. 258-264.
6. M. F. Modest et. al, "Heat Conduction in a Moving Semi-infinite Solid Subjected to Pulsed Laser Irradiation", J. of Heat Transfer, 1986, pp. 597-601.
7. S. J. Na, "Numerical Analysis of laser Surface hardening of a Medium Carbon Steel", Proc. 3th Int. Conf. Laser in Manufacturing, 1986, pp. 383-392.
8. D. W. Pepper & J. C. Heinrich, The Finite Element Method, Hemisphere Publishing, 1992.
9. E. Friedman, "Thermomechanical Analysis of the Welding Process Using the FEM", Trans. of ASME, Aug. 1975,

- pp.206-213.
10. Y. Arata, H. Maruo and I. Miyamoto, "Application of Laser for material Processing-Heat Flow in Laser Hardening", IN DOC., 1978.
  11. A. Ivarson, J. Powell, C. Magnusson "The Role of Oxidation in Laser Cutting Stainless and Mild Steel", Journal of Laser applications, vol. 3, No.3, 1991, pp.41-45
  12. 조용무, 김재도, "유한요소법을 이용한 레이저 절단폭 예측", 대한기계학회 추계학술대회 논문집, 제1권, 1993, pp.740-744.P
  13. 박준홍, 한국찬, 나석주, "FDM을 이용한 레이저 절단공정에서 절단 메카니즘 및 절단폭 해석", 대한기계학회 논문집, 제17권, 10호, 1993, pp.2418-2425.
  14. 이호준, 조용무, 유용재, 김재도, "STS304의 레이저 절단에서 보조가스 압력이 미치는 영향", 한국정밀공학회 논문집, 제12권, 제3호, 1995, pp.15-22.
  15. 조용무, 김재도, "레이저 절단 관재의 브레이징에 의한 적층사출금형", 한국정밀공학회 논문집, 제10권, 제3호, 1993, pp. 231 -238.
  16. Kiyonori Masui et al., "The Microhardness on the Wire-EDM'd Surface", JSPE, Vol. 57, 1991, pp.138-143.