

금형용 합금공구강 STD11의 레이저 표면경화 특성

조용무*·김재도**

인하대학교 대학원*

인하대학교 기계공학과**

The Laser hardening Characteristics of the Alloy
 Tool Steels STD11.

Y. M. Cho*, J. D. Kim**

Dept. of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon

ABSTRACT

The laser beam hardening has been experimentally tried to find the hardened characteristics of STD11. Experiment was performed on the optimum hardening condition with 2kW CO₂ laser. The microstructure of the hardened layers was observed using the microscope. The hardened zones exhibits very high Vickers microhardness of 720 Hv, however, the deoxidation was observed under the surface of hardened area. The case depth of hardened zones is about 0.6mm and case width is 4mm.

FEM-simulation on laser surface hardening of STD11 steel are described. With the proper assumption of the absorbed energy density, the calculated case depth and width in 2 kW CO₂ laser hardening were in good agreement with the experimental result. It was found that there is optimum absorbed energy density of STD11.

Nomenclatures

[c] : Thermal capacity matrix

C_p : Specific heat (J/kg °C)

{f} : Heat flux vector

K : Thermal conductivity(W/m °C)

[k] : Stiffness matrix

[N] : Shape function matrix

N_i : Shape function

n_x, n_y : Directional cosine

P : Laser power(W)

Q : Source/sink term

q : Heat flux (W/m²)

t : Time(sec)

T : Temperature(°C)

Ω : Element domain

Γ : Boundary condition

{Φ} : Temperature vector of total
 nodal point

1. 서 론

레이저를 이용한 표면경화 처리는 레이저 빔을 주사시켜 가열된 재료표면에 압축공기를 이용하여 급냉시키면 금속조직이 오오스테나이트에서 마르텐사이드로 변화되는 원리로 탄소강, 합금강 및 공구강 등에 적용되고 있다. 이러한 고출력을 이용한 표면경화 법에 비해서 매우 빠르기 때문에 선진각국의 산업체에서 급속히 적용되고 있다. 특히 탄소강과 주철에 대한 연구가 많았으며,¹⁻⁶⁾ 프레스금형의 다이(die)와 펀치(punch) 등에 많이 사용되는 STD11에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. STD11의 일반 열처리에서는 탈탄을 방지하기 위해서 염욕(salt bath)이나 가스분위기로를 사용하나,^{7,8,9)} 레이저 표면경화는 일반 열처리와 같은 분위기 속에서 표면경화 처리하기 어려워 가공재료 표면에 탈탄 혹은 경도 저하 층이 발생할 수 있다. 요구되는 균일한 경도를 얻기 위해서는 레이저 표면경화 처리의 가공조건에 따른 가공변수들이 많아 모든 실험을 다할 수 없어서 컴퓨터를 이용한 수치해석적 방법이 연구되고 있다.^{10,11,12)}

레이저 표면경화 처리에 영향을 주는 변수로는 레이저 출력(power), 초점반경(spot size), 주사속도(travel speed) 및 흡수율(absorptivity) 등이 있으며, 수치해석을 통한 경화층의 예측시 가장 어려운 것이 재료의 흡수율 결정이다. Arata¹³⁾는 재료의 흡수율은 초점반경이 작을수록, 재료표면의 온도가 증가할수록 낮아지며, 인산염 피막코팅을 하면 약 55%의 흡수율이 된다고 하였다. F. Dausinger¹⁴⁾는 재료표면의 반사율에 관하여 연구하였는데 폴리싱하였을 경우 90%, 흑연 피막처리의 경우 20%의 반사율이 된다고 하였다. J. Meijer¹⁵⁾는 주사시간과 에너지 밀도의 관계에서 레이저 표면경화 가능 범위에 관하여 발표하였다. 흡수율은 결국 가공재료의 종류, 가공 재료 표면조건, 에너지 밀도, 주사속도 및 레이저 빔에 의해 가열된 재료 표면의 온도와 관계가 있기 때문에 같은 재료에서도 다르게 변한다. 수치해석을 통하여 실험결과와 일치하는 흡수된 에너지 밀도를 찾음으로서 가공재료의 흡수율과 주사속도에 따른 경화폭과 깊이를 예측할 수 있어 이에 대한 연구가 필요하며, 레이저 표면경화 처리

에 대한 연구도 실험 뿐만 아니라 이론적으로도 많은 논문이 발표되고 있으나 아직도 많은 재료들에 대한 최적 레이저 가공변수들의 예측은 불충분하다.

본 연구에서는 2kW CO₂ 레이저를 이용하여 합금공구강 STD11를 주사속도 변화에 따른 표면경화 처리하여 경화부위를 고찰하였고, Galerkin method을 이용한 유한요소법을 이용하여 흡수된 에너지 밀도를 변수로 표면경화 폭과 깊이를 예측하여 실험결과와 비교 검토하였다.

2. 유한요소법 모델

2. 1. 열전달에 관한 유한요소법¹⁶⁻¹⁹⁾

레이저에 의해 공급되는 열원은 공작물에서 복잡한 열 사이클이 진행되며, 이것은 비선형이며 3차원적 불안정한 상태이다. 그러나 열원의 주사속도가 빠르다면, y-방향, z-방향에 비하면 x-방향을 온도변화는 무시할 수 있다. 재료는 등방체이며, 물리적 성질은 온도 변화에 관계없이 일정한 것으로 가정하면 2차원 열확산 방정식은 다음과 같다.

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

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

$$\text{초기조건 : } T = T_0 \quad \text{at } t = 0 \quad (2)$$

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

여기서 n 은 y, z 각 방향에 대한 방향여현(direction cosine)을 나타낸다. 지배방정식과 경계조건 및 초기조건을 이용하여 사각형 요소를 유한개로 분할하면 요소 내의 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 형상함수 행렬로서 요소 절점수가 n 개라 하면 $[N]$ 은 $1 \times n$ 의 행렬로 구성되고 (t) 는 시간 t 에서 요소의 절

접은도벡터를 나타낸다. 형상함수[N]을 가중함수로 하여 식(1)에 Galerkin법을 적용하여 정리하면 비정상 열전도문제에 대한 유한요소식은 식(5)와 같다.

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

여기서 [k]는 열전도 행렬(heat conductivity matrix), [C]는 열용량 행렬(heat capacity matrix), {f}는 열유속 벡터(heat flux vector)이다.

비정상 항은 유한차분법 중에 Crank-Nicolson차분식을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{1}{2}[k] + \frac{1}{\Delta t}[c]\right)\{\phi(t + \Delta t)\} = \left(-\frac{1}{2}[k] + \frac{1}{\Delta t}[c]\right)\{\phi(t)\} + \{f\} \quad (6)$$

식(6)에 초기조건을 대입하고 Gauss소거법을 이용하여 미소시간증분 t에 따른 해석영역의 열확산 과정을 해석하였다.

2.2. 해석 과정

Fig.1은 레이저 표면처리 모델을 도시한 것으로 레이저 빔을 중심으로 형상 및 경계조건이 대칭이므로 한쪽 부분만 해석하였다. Fig.2는 해석에 이용된 모델의 우측면을 도시한 것으로, 온도 해석을 위한 초기조건으로 시편의 초기온도는 20℃이며, 주위온도는 20℃로 일정하다고 가정하였다. 모델길이 방향의 양끝단은 평판의 두께에 비하여 길어, 열전달이 일어나는

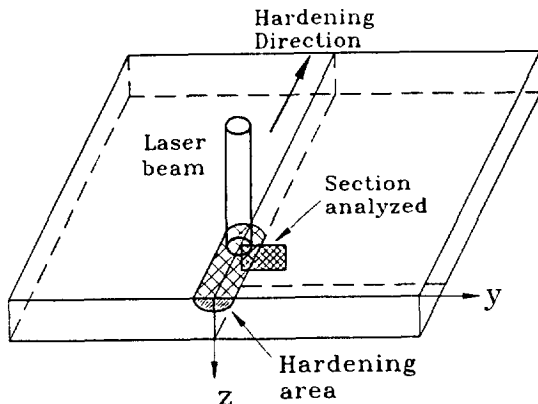


Fig. 1. Hardening configuration of model

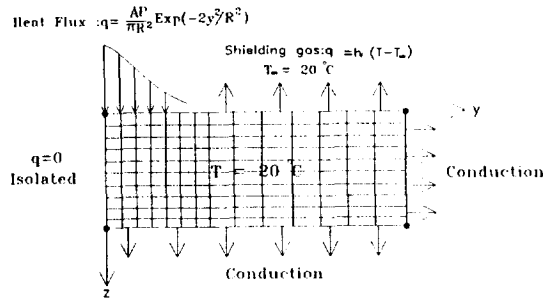


Fig. 2. Solution domain and boundary condition

경우이나 반무한 경계조건(semi-infinite convection)으로 가정하여 온도해석을 수행하였다. 온도해석에 사용된 시편의 절점 및 요소수는 각각 546개와 500개하여 요소크기에 비교적 영향을 받지 않는 사각형 요소를 취하여 4절점요소를 이용하였다.

대류 열전달 계수 h는 재료의 크기, 재질, 형상 및 내부조건 등 여러가지 복잡한 인자들의 영향을 받는데 여기서는 6.5W/m²℃로 하였고, 레이저 빔이 조사될 때 보호가스를 사용하였기 때문에 금속 상면부는 강제 대류로 가정하여 대류 열전달 계수 75W/m²℃를 사용하였다.²⁰⁾

FEM해석에서 중요한 변수는 재료의 에너지 흡수율로서, Arata에¹³⁾ 의하면 가공재료의 흡수율은 20~90%이라 하였지만 이 범위는 상당히 큰 범위이고 레이저 빔의 출력과 주사속도에 따라 재료에 도달되는 에너지 밀도가 다르므로 이론적 계산에 사용하기 어렵다. L. E.Greenwald²¹⁾는 흡수된 에너지 밀도를 이용하여 해석하였는데 흡수된 에너지 밀도가 5.5×10⁹W/m²에서 경우 재료의 표면 온도가 2,730℃, 5×10⁷W/m²일 때 1,469℃까지 온도가 증가한다고 하였다. 재료표면에 흡수된 최대 에너지 밀도가 10⁹W/m²이상일 때 재료표면이 증발온도 이상으로 올라간다. J.Meijer¹⁵⁾는 4.3×10⁷W/m²에서 경화깊이가 0.5mm라 하였다. 지금까지의 연구는 초점반경 내의 열원을 균일하게 계산하였으나, 본 연구에서 사용된 흡수되는 에너지는 초점반경 내의 최고 에너지 밀도를 6.3×10⁷, 5×10⁷, 3.8×10⁷W/m²로 하고 요소(element)의 크기에 따라 초점반경 내의 가우시안 에너지 분포를 계산하여 입력하였다.

3. 실험재료 및 실험방법

3. 1. 레이저 실험장치

본 연구는 Panasonic에서 제작한 연속과 2kW CO₂ 레이저를 사용하였다. 레이저 발진장치는 보조가스로 N₂를 사용한 고속충류타입이다. 집속장치는 직경 22mm, 초점거리 127mm인 ZnSe렌즈이며, 공작 테이블은 NC형이다.

3. 2 실험재료

실험재료는 KS규격으로 STD11인 합금공구강으로, 프레스금형의 블랭킹 다이(Blanking die), 포밍(Forming die), 펀치(Punch) 및 사출금형 등에 많이 사용되는 재질이다. 화학적 성분은 Table 1에 표시하였다. 표면경화를 하기 위해서 시편을 200×30×5.1mm 크기로 기계가공하였으며, 레이저 빔의 에너지 흡수가 일정하도록 샌드페이퍼(#400)로 표면처리를 하였다.

Table 1. Chemical compositions of STD11 steel for experiment.(wt%)

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

3. 3 실험방법

실험은 레이저 표면경화의 가능변수 범위에서 이루어졌다. 레이저 출력은 2kW로 사용하였고, 빔 주사속도는 0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.4m/min으로 변경하며 표면경화 처리하였다. 또한 에너지 밀도를 줄일 수 있고 경화폭과 깊이를 조절할 수 있는 defocused beam을 사용하였으며, TEM₀₀모드의 빔을 사용하여 초점반경을 2mm로 하였다. 레이저 표면처리 도중에 표면의 산화를 방지하기 위해서 일반적으로 아르곤이나 질소를 보호가스로 사용하는데, 본 실험에서는 질소를 측면에서 수평과 60° 경사지게 50kPa의 압력으로 분사하였다. 또 경화폭을 넓게 하기 위해서 부분적으로 겹치는 멀티패스(multipass) 표면경화 처리도 하였다.

표면경화처리된 시편은 폴리싱하여 Villela's (1 gr picric acid+5% HCl in alcohol)에 15초 담가처리하였

다. 경화폭, 경화깊이 측정 및 금속조직 검사는 금속 광학현미경을 사용하였고, 경도시험은 비이커스 경도시험기를 사용하였으며 하중은 4.9N(0.5kg)을 적용하였다.

4. 결과 및 고찰

Photo 1은 주사속도 0.8m/min일 때 STD11의 표면경화 처리된 부분의 단면사진이다. 사진에서 A,B,C의 3부분의 다른 경계층이 발생함을 알 수 있었으며, A에서 C방향(재료표면에서 깊이방향)에 따라 경도분포를 살펴보면 Fig. 8과 같다. Photo 1의 A부분은 가공재료 표면 부분으로 경도가 400~450Hv의 분포로 STD11의 일반 열처리 강도(700Hv이상)보다 작게 나타났다. 이것은 합금공구강 STD11의 일반적인 열처리 방법은 1,050℃ 근처에서 1시간 동안 유지한 후 공냉 혹은 오일 냉각하는데 반하여 레이저 표면경화 처리는 탈탄현상을 방지하기 위해 질소가스를 불어주고 있으나 일반 열처리보다 완전한 탈탄현상을 방지하지 못한 것으로 생각된다. B부분의 경우는 최고 720Hv 경도를 나타내고 있어, 레이저 표면경화 처리를 하면 모재(C부분) 약 2.5배의 경도가 증가함을 알 수 있었다. Fig.3에서 주사속도가 작을수록 경화 깊이와 폭이 커짐을 알 수 있다. 그러나 경도저하 층은 주사속도가 작을수록 크게 나타나는데 이러한 이유는 에너지 입사량이 커서 재료표면의 온도가 높아 냉각시에도 탈탄현

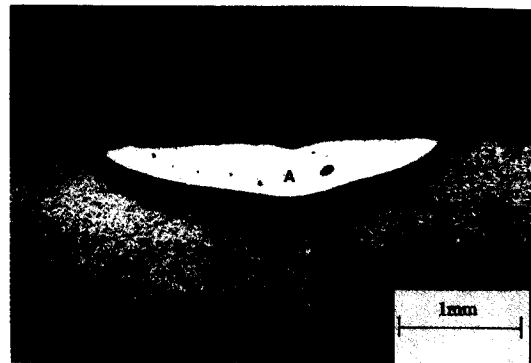


Photo. 1 Cross-section of laser hardened STD11 steel Laser power, 2kW, travel speed, 0.8 m/min, d=2mm

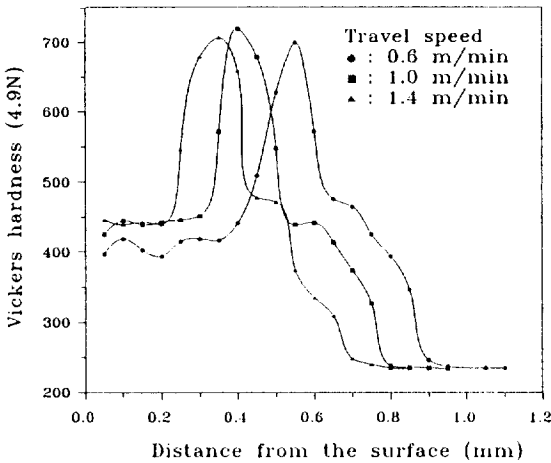


Fig. 3. Vickers microhardness distribution of laser hardened STD11 steels : Laser power 2kW

상이 발생하는 것으로 생각된다. 본 실험에서 2kW CO₂ 레이저에 의해 얻을 수 있는 STD11의 경화깊이는 0.6mm, 경화폭은 4mm이었다. 이 실험결과는 SM45C를 인산염 코팅을 하여 1.5kW레이저로 표면경화 처리한 결과⁹⁾와 비슷함을 알 수 있었다.

레이저 빔 표면경화 처리는 빔 크기 특성 때문에 국부적인 표면경화만 가능하지만 멀티패스 경화처리 (multi passes hardening)를 사용할 수 있다. Photo 2는 주사속도 0.8m/min으로 2회 표면경화 처리한 단면사진을 나타낸 것으로, 경화폭이 4.3mm가 되었다.

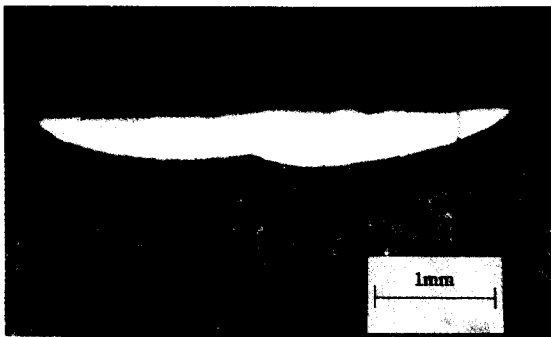


Photo. 2. Cross-section of partly overlapping hardened STD11 steels Laser power, 2kW, travel speed, 0.8m/min, d=2mm

Fig. 4는 STD11의 TTT곡선을 도시한 것으로 nose 부분은 약 700℃에 있으며 비교적 냉각시간이 길어도 마르텐사이트 조직을 얻을 수 있다. STD11의 일반적인 열처리 온도는 약 1,050℃에서 공냉⁹⁾하므로 레이저 표면경화 처리시에도 재료의 온도가 이 온도까지 가열되어야 한다. 레이저 빔을 조사(scanning)하면 가공 재료표면의 온도는 증가하다 감소하므로 재료의 온도분포를 알면 경화층을 예측할 수 있다. Fig. 5는 레이저 빔 조사시간(초점반경/주사속도)이 0.12초, 에너지 밀도가 $5.0 \times 10^7 - 7.6 \times 10^6 \text{W/m}^2$ 일 때 온도분포를 유한요소법을 이용하여 예측한 것이다. 이 온도분포에서 냉각을 시작하면 0.1sec 이내에 TTT곡선상의 nose부분에 해당되는 700℃ 이하 온도로 낮아지기 때문에 마르텐사이트 조직이 발생됨을 예상할 수 있어, 각각의 주사속도와 에너지 밀도에 따른 경화폭과 깊이를 예측할 수 있었다.

Fig. 6은 주사속도에 따른 경화깊이를 나타낸 것으로, 초점반경내의 에너지 밀도 분포가 $5.0 \times 10^7 - 7.6 \times$

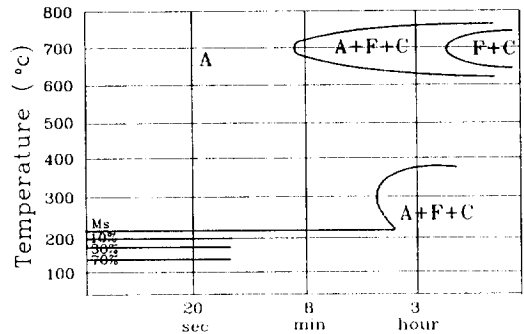


Fig. 4. Time-Temperature-Transformation of STD11 steels⁷⁾

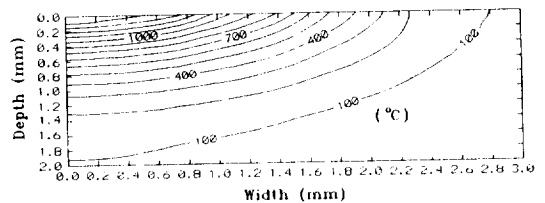


Fig.5. Temperature field at interaction time 0.12sec Laser power; 2kW, spot size; 2.0mm

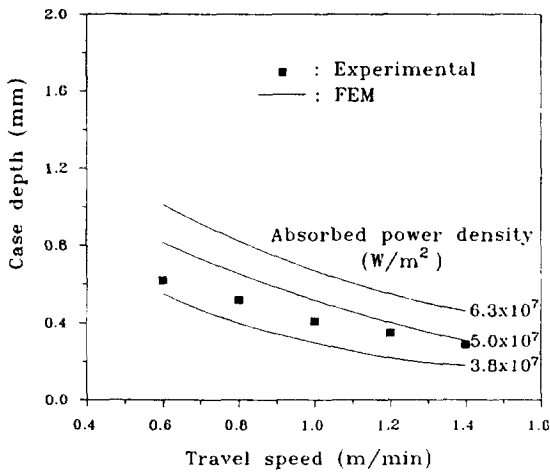


Fig. 6. Comparison of calculation depth of hardened zone with experimental result; spot size : 2.0mm

10⁶W/m²로 재료에 흡수될 때 수치해석과 실험결과와 근사함을 알 수 있었다. 에너지 밀도가 낮을수록, 주사속도가 빠를수록 경화깊이는 작아짐을 알 수 있었다. Fig. 7은 주사속도에 따른 경화폭을 나타낸 것이다. 수치해석과 실험결과를 비교하면 경화폭과 같은 에너지 밀도에서 실험결과와 근사하다. 초점반경내의 에너지 밀도가 5.0 × 10⁷ - 7.6 × 10⁶W/m²은 레이저 빔

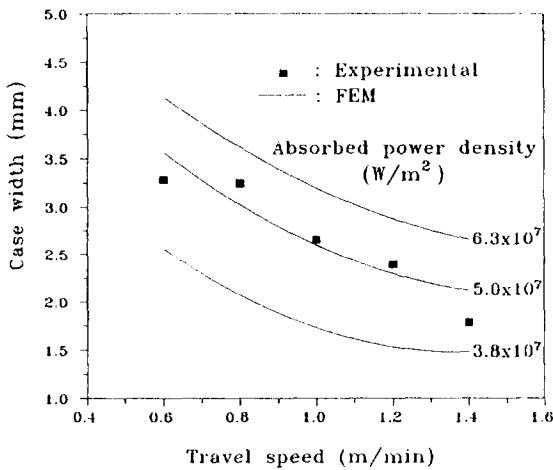


Fig. 7. Comparison of calculation width of hardened zone with experimental result; spot size : 2.0mm

입사 에너지의 40%가 된다. F. Dausinger는 인산염 피막 코팅의 경우 흡수율이 80%, 폴리싱 했을 경우 20%라 했으며, 본 실험시 샌드페이퍼(#400)로 표면 처리 했을 때 40%가 예측되므로 압연한 소재를 그대로 사용하면 재료표면에 기름과 녹이 있어서 흡수율이 40%보다 높을 것으로 사료된다.

Fig. 8은 실험결과와 해석결과에서 예측된 에너지 밀도(5.0 × 10⁷ - 7.6 × 10⁶W/m²)를 이용하여 주사속도에 따라 경화된 단면현상을 예측한 것이다. 속도가 증가함에 따라 유한요소법에 의해 계산한 경화폭과 깊이는 실험결과보다 크게 나타났으며 이는 속도가 증가하면 재료의 최고 온도는 감소되고 레이저 빔 중심으로 부터 뒤쪽으로 최고 온도가 이동되는데 이것을 유한요소방법에서 고려하지 못했고, 열원을 일정한 시간의 함수로 계산했기 때문에 실험에 의한 경화층보다 크게 나타난 것으로 사료된다.

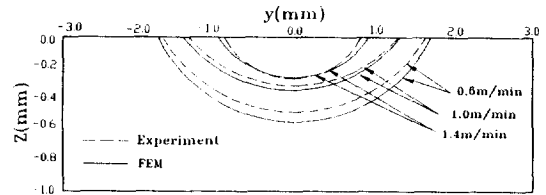


Fig. 8. Comparison between the calculated and observed hardening boundaries of laser hardening made at P=2kW and spot size 2.0mm STD11 steels

5. 결 론

출력이 2kW인 CO₂레이저를 사용하여 합금공구강 STD11을 표면경화 처리하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 경화층의 최고 경도는 모재의 경도보다 약 2.5배 높은 경도 값을 얻을 수 있었고, 경화깊이는 약 0.6 mm, 경화폭은 4mm를 얻을 수 있다.
2. 레이저 표면경화 처리된 표면층은 경도가 400~500Hv가 되는 경도 저하층을 볼 수 있었으며, 추후로는 이를 없애는 레이저 표면경화 처리법의 연구가 필요하다.

3. 주사속도가 작을수록 경화폭과 깊이는 증가하나 경도 저하층이 커짐을 알 수 있었다.
4. FEM에 의한 수치해석으로 경화폭과 깊이를 예측할 수 있었으며, 가공재료에 초점반경 내의 에너지 밀도 분포가 $5 \times 10^7 - 7.6 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ 일로 흡수될 경우 실험결과와 근사함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. J. Benedek, A. Shachral and L. Levin : Case Hardening of Steel by a CO₂ Laser Beam, Optics and Laser Technology, Oct.1980, pp.247~253
2. 김재도 : 12%-Cr 강 의 CO₂ 레이저 표면경화에서 금속조직과 경도분포, 대한기계학회지, 제16권 제10호, 1992, pp.1861~1868
3. 서정원 : CO₂ 레이저 표면경화에서 경화깊이 예측, 인하대학교 석사학위 논문, 1993
4. 김도훈, 김경배, 김웅 : 레이저에 의한 Cr 표면합금층 형성에 미치는 Cr 첨가 방법의 영향, 대한금속학회지, 1985, 제23권 제8호, pp.788~793
5. 김도훈, 윤영주 : CO₂ 레이저에 의한 탄소강의 표면경화시 온도구배와 이력현상, 대한금속학회지 제22권 제4호, 1884, pp. 361~369
6. Riabkina, M. et al., 1988 : Structure and Microhardness of Laser-Hardened 1045 Steel, J. of Materials Science, Vol.23, 1988, pp.1547~1552
7. 한국종합특수강(주), 특수강, 1982, pp.206~213
8. 박준규, 철강열처리, 6nd ed., 세진사, 1993, pp. 65~233
9. 複島貞夫, 機械材料, 朝倉書店, 1991, pp.52~92
10. J. D. Kim : Prediction of the Penetration Depth in Laser Beam Welding, KSME J, Vol.4, No.1, 1990, pp.32~39
11. Sindo Kou, et al., : A Fundamental Study of Laser Transformation Hardening, Metall. Trans., V. 14A, 1983, pp.643~653
12. M. F. Ashby, et al., : The Prediction of Case Depth in Laser Transformation Hardening, Metall. Trans., V.22A, 1991, pp.2459~2466
13. Y. Arata, H. Maruo and I. Miyamoto : Application of Laser for Material Processing-Heat Flow in Laser Hardening, IIW Doc, IV-241-78, 1978.
14. F. Dausinger : Laser hardening in precision components, Dusseldorf, 1984.
15. J. Meijer : Optimization of Laser Beam Transformation Hardening by One Single Parameter, CIRP, Vol.40/1, 1991, pp.183~186
16. 矢川元基, 宮崎則幸 : 有限要素法による熱応力. クリブ. 熱傳導解析, サエソス社, 1985.
17. L. J. Segerlind : Applied Finite Element Analysis, John Wiley & Sons, 1976.
18. D. W. Pepper and J. C. Heinrich : The Finite Element Method, Hemisphere Publishing, 1992.
19. G. W. Krutz and L. J. Segerlind : Finite Element Analysis of Welded Structures, Welding J., Research Suppl., July. 1978, pp.211s~216s.
20. J. P. Holman : Heat Transfer, McGraw-Hill, 1986.
21. L. E. Greenwald : Heat Transfer Properties and Microstructures of LASER Surface Melted Alloys, Laser Processing and Analysis of Materials, 1983, pp. 189~204.