

고출력 레이저에 의한 표면 경화

김재도

인하대학교 기계공학과

Transformation Hardening of High Power Laser

J. D. Kim

Dept. of Mechanical Engineering Inha University

ABSTRACT

Heat flow equation and FEM have been used to calculate the hardening section of material in laser transformation hardening. SCM440 used as the diesel engine piston of vessel has been hardened by a CO₂ laser with the wavelength of 10.6 μ m. The specimens were inclined from 0 to 70 degree to investigate the characteristics of laser hardening. The geometrical factor of heat flow equation affects the size of hardening area. The case width decreased with increasing travel speed and the case width increased with increasing inclined angle. Maximum case depth was achieved about 1.0mm and maximum hardness of laser hardened area was of 2.8 times than that of base metal. Experimental data show good agreement with the theoretical calculations for given laser hardening conditions.

1. 서 론

레이저 표면 경화는 레이저 빔이 조사된 금속 표면이 공기 중에서 급냉되는 원리로서, 탄소강, 합금강, 공구강 및 주철에 적용되고 있다. 레이저 표면 경화는 국부처리가 가능하고, 제품의 열변형이 없으며, 처리 속도가 종래의 표면 경화법에 비해서 매우 빠른 장점이 있다.

국부적으로 표면 경화가 요구되는 기계 부품에 침탄법, 질화법, Induction hardening 등의 재래식 경화법을 레이저 표면 경화법으로 대체시킬 수 있

다. 마모가 심하게 일어나는 기계부품의 마모 특성을 향상 시키고, 피로특성을 향상시켜 내구 연한을 증가시킬 수 있다. 대부분의 기계부품은 마모가 심하게 일어나는 부위는 일부분으로서 국부적인 표면 경화가 요구된다.

레이저 표면 경화는 빔을 다루는 기술이기 때문에 다른 경화 처리법에 비해서 고도의 기술이 필요하다. 빔 모우드에 의해서 에너지 분포가 다르기 때문에 경화에 적절한 빔 집광시스템이 필요하다. 레이저 표면 경화에서 중요한 변수는 레이저 출력, 처리속도, 에너지 분포 및 가공 재료 특성 등이다.

에너지 밀도와 처리시간의 최적 조건을 만족하지 못하면 원하는 깊이의 경화층을 얻기 어렵다.

1973년에 General Motors에서 레이저를 자동차 부품의 레이저 표면 경화에 처음 적용한 이후, 선진 각국의 자동차 제작 회사와 기계 제품 생산업체에서 널리 사용하고 있다. 특히 자동차 부품 중 국부적으로 내마모성이 요구되는 부위의 표면경화는 레이저 빔이 아니고는 높은 생산성을 기대하기 어렵다. 선진국 일부 자동차 제작 회사에서는 자동차의 피스톤 링 그로브, 크랭크 샤프트의 필릿부, 디젤 엔진의 실린더 라이너 등의 레이저 표면 경화를 적용하고 있다¹⁻⁴⁾.

모양이 일정하지 않은 부품에 최적의 표면경화를 하기 위해서는 우선 경사진 재료 표면에 레이저 빔이 조사되었을 때에 대한 연구가 필요하다. 경사진 면이나 불규칙한 부분에서의 표면경화시 사전에 레이저 가공변수를 선정할 수 있을 것이다.

선박용 디젤엔진의 피스톤 링 그로브는 기계적 부하의 증대, 연료의 저질화에 따른 연소잔사의 발생으로 마모 문제가 야기되어 표면개질에 의한 내구성 향상이 요구된다. 선박용 디젤 엔진의 피스톤 재질로 많이 사용되고 있는 SCM440을 표면경화 처리하였다. 경사각 변화에 대한 표면경화 특성을 고찰하였으며, 열전달 해석식과 유한요소법으로 재료내부의 온도해석을 하여 경화층의 단면 형상을 계산하였다.

2. 레이저 빔 특성

레이저 열처리를 위한 광학장치에는 Defocused beam, Overlapping passes, Oscillating beam 등이 있다. Defocused beam은 에너지 밀도를 줄일 수 있는 가장 간단한 방법이며 경화폭 조절이 가능하다. 중심 부분에 가장 많은 에너지가 조사되기 때문에 재료의 중심 부분에서 가장 큰 경화깊이를 얻을 수 있다. Overlapping passes방법은 Defocused beam보다 균일한 경화깊이를 줄 수 있으나 빔

이 중첩되는 부분의 경우 템퍼링 효과에 의해 경도가 감소하는 경향이 있다. 반사거울에 진동을 주어 사용하는 Oscillating beam은 균일한 경화깊이를 줄 수 있으나 광학장치 설치가 어렵고 고가이다⁵⁻⁷⁾.

레이저는 전자기 형태의 빔으로 연속적 혹은 단속적인 펄스의 형태로 방출되는데 광학장치에 의해서 작은 초점직경을 갖도록 조정할 수 있다. 레이저 표면경화에서도 재료가 용융되기 전 최적의 표면경화를 할 수 있는 에너지 밀도가 존재하게 된다. 광학 공진기 내에서 전자기장은 반사경 사이에서 반복적인 반사에 의해 진폭의 분배와 위상이 증폭되며, 이는 공진기의 횡축 방향의 전자기장 모우드(Transverse Electromagnetic Mode)를 형성한다. 빔 모우드는 TEM₀₀, TEM₀₁*, 및 multi 모우드가 있다⁸⁾. Fig. 1은 레이저 표면 경화에 이용할 수 있는 레이저 에너지 밀도에 대한 것을 보여 주고 있다^{8, 9)}.

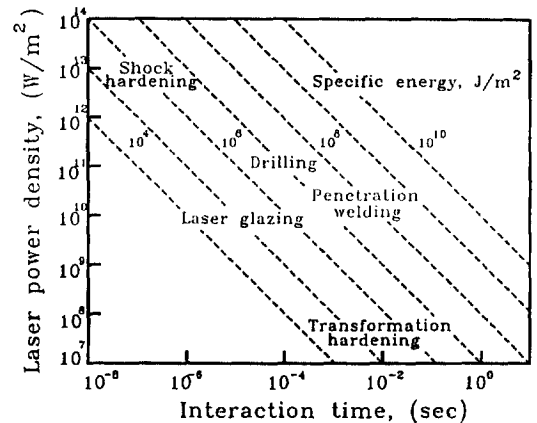


Fig. 1 Operational regime for various laser materials processing techniques.

3. 이론 해석

3. 1 열원 해석식

레이저 빔은 t_1 에서 켜지고 t_2 에서 꺼지며, 표면으로부터의 열손실은 재료내부에서 일어나는 전도와 비교해서 무시할 수 있다고 가정하였다. 열전

도열(K), 밀도(ρ), 비열(C) 등은 온도에 대하여 무관한 상수로 가정하였다¹⁰⁾.

열전달 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\chi} \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{G}{K} \quad \text{----- (1)}$$

여기서, χ 는 열확산율, G는 가우시안 빔에 대한 단위 길이당 열원 함수로서 다음과 같다.

$$G = \frac{\alpha P}{\pi b_0} \cdot \exp\{-(y/b_0)^2 - az\} \quad \text{----- (2)}$$

α 는 Absorption coefficient, b_0 는 y축 방향의 빔 폭, P는 레이저 출력이다. 가우시안 빔에 대한 해는 무차원화된 변수로 표현될 수 있으며, $\xi = y/b_0$, $\zeta = az$, $\tau = 4kt/b_0^2$, $r = ab_0/2$ 이고, ϕ 는 무차원화된 온도이고 온도, T는 다음과 같다.

$$T(y, z, t) = [P\gamma / (4\pi K b_0)] \cdot \phi(\xi, \zeta, \tau, r) \quad \text{--- (3)}$$

$$\begin{aligned} \phi(\xi, \zeta, \tau, r) = & \left[\int_{\tau_0}^{\tau + \tau_1} \exp(r^2 \tau') / (\tau' + 1) \right] \\ & \cdot \exp\{-\xi^2 / (\tau' + 1)\} \cdot [\exp(\zeta) \\ & \cdot \operatorname{erfc}(r\sqrt{\tau'} + \zeta/2r\sqrt{\tau'} + \exp(-\zeta)) \\ & \cdot \operatorname{erfc}(r\sqrt{\tau'} - \zeta/2r\sqrt{\tau'})] dr' \quad \text{----- (4)} \end{aligned}$$

여기서 $\tau_0 = 0$, $-\tau_1 < \tau < \tau_2$
 $= \tau - \tau_2$, $\tau > \tau_2$

τ_1 은 t_1 일 때의 무차원 시간이고 τ_2 은 t_2 일 때의 무차원 시간이며 τ' 는 dummy 변수이다. 레이저 빔 에너지 분포가 사각형인 경우 가우시안 빔을 y축에 대하여 Fig. 2와 같이 중첩하여 구할 수 있다. 경사진 재료에 대한 레이저 빔의 에너지 분포는 경사각에 대한 성분만큼 계산하여 구한다. Schercliff¹¹⁾도 이와 유사한 중첩법을 사용하여 온도 분포식을 유도한 바 있다.

윗 식에서 알 수 있는 것은 조사되는 빔의 폭과 흡수 계수에 의해서 결정되는 r 에 의해서 온도 분포에 미치는 영향이 클 수 있다. 레이저 출력과 이송속도가 같을 경우, 레이저 표면 경화 폭을 증가시키고 경화 깊이를 증가시키는 방법으로 r 를 증가시키는 방법이 있을 수 있다.

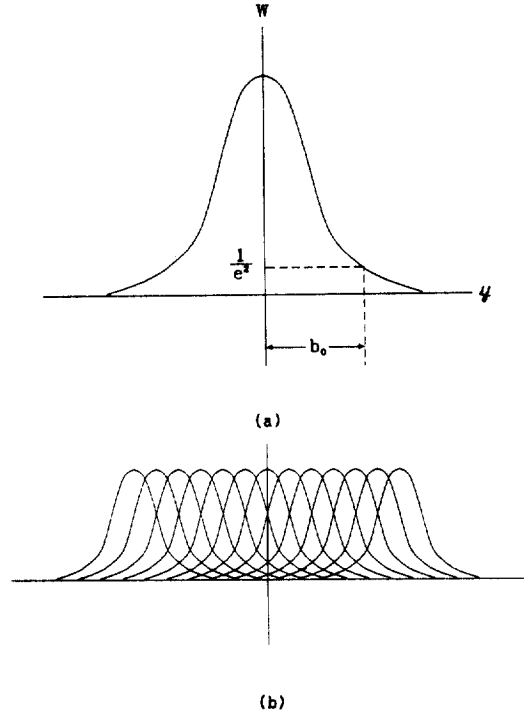


Fig. 2 (a) Gaussian distribution, (b) Approximate rectangular distribution made by superposition of Gaussian.

3. 2 유한요소법

실제의 상태는 복잡한 열적거동을 하나 다음과 같은 가정을 하여 2차원 열전도 방정식으로 해석하였다. 주위의 온도와 소재의 온도는 일정하고, 경화가 가능한 온도는 840°C이다. 재료는 등방체이고, 물리적인 성질은 온도변화에 관계없다. 복사에 의한 손실은 없고, 레이저 이송방향으로의 온도변화는 없다. 미소요소에 대한 열평형 관계식은 다음과 같다¹²⁻¹⁴⁾.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = (K_{ij} T_{,j})_{,i} \quad \text{----- (5)}$$

$T = T(y, z, t)$ 는 온도, ρ 는 밀도, C_p 는 비열, K는 열전도도이고, 유한요소식은 다음과 같다.

$$[K]\{\phi\} + [C]\dot{\phi} = \{f\} \quad \text{----- (6)}$$

{ ϕ }는 전체 절점의 온도벡터, [K]는 강성행렬, {C}는 열용량 행렬, {f}는 열 유속벡터이다.

온도분포 해석을 위하여 해석모델의 4절점 등방 체요소를 사용하여 765개의 절점과 700개의 요소로 분할하였다. 대류열전달 계수는 재료의 크기, 재질, 형상 및 내부조건 등 여러 가지 복잡한 인자들의 영향을 받는데 $6.5W/m^2C$ 로 하였고, 상면부는 보호가스가 재료표면 위에 $15kgf/cm^2$ 의 압력으로 불어주기 때문에 강제 대류로 가정하여 대류열전달 계수 $75W/m^2C$ 를 사용하였다¹⁴⁾.

레이저 빔의 열유속치는 재료에 인입되는 각도 변화에 대하여 벡터의 양으로 계산하였다. 임의의 위치에서 받는 레이저 빔의 밀도는 이송거리를 레이저 빔의 이송속도로 나누어 빔의 조사시간을 구하였다. 초점크기 $2.5 \times 4mm$ 와 조사속도 $0.4m/min$ 인 경우 레이저 빔 조사시간은 $0.375초$ 이므로 미소시간 증분은 $0.01초$ 간격으로 계산하였다.

4. 실험

4.1 레이저 장치

실험은 $1.5kW$ CO_2 레이저를 사용하였으며, 본 실험에서는 사각형 빔 모우드를 사용하여 표면경화 실험을 하였다. 집속 렌즈는 초점거리 $127mm$ 인 ZnSe 렌즈이다. 작업 테이블에 θ 만큼 경사지게 시편을 고정하여 실험하였다.

4.2 실험재료

실험에 사용된 시편은 두께 $80 \times 30 \times 8mm$ 의 SCM440 강이다. 흡수율을 증가시키기 위해서 흑연을 재료표면에 코팅하였다. 피막의 두께는 피막 두께측정기를 사용하여 측정하였는데 두께는 약 $10\mu m$ 정도였다. Table 1과 Table 2는 SCM440의 화학적 조성 및 물성치이다.

4.3 실험방법

재료의 경사각 변화에 따른 경화특성을 연구하기

Table 1. Chemical compositions of SCM440 steel (wt%).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.39	0.23	0.76	0.017	0.004	0.95	0.17

Table 2. Physical properties of material for analysis.

Density (kg/m ³)	Specific heat (J/kg °C)	Thermal conductivity (W/m °C)	Heat transfer coefficient (J/m ² sec °C)
7845	42.7	473	6.5

위하여 입사되는 레이저 빔에 대하여 시편을 0° 에서 70° 까지 변화시켰으며 각도에 대하여 빔 이송속도를 $0.4m/min$, $0.8m/min$, $1.2m/min$, $1.5m/min$ 로 하여 $1kW$ 출력으로 실험하였다. 초점크기는 $2.5 \times 4mm$ 로 하였으며 광학부품의 손상을 방지하기 위하여 보조가스로 압축공기를 측면에서 공급하였다.

열영향부의 조직 및 크기를 측정하기 위해 시편의 단면을 절단하여 연마한 후 5% Nital 용액으로 2초동안 부식시켜 금속 광학현미경을 이용하여 조직검사를 하였으며 경화폭과 경화깊이를 측정하였다. 비커스 경도시험기(Vickers hardness tester, 하중 $0.3kg$)를 사용하여 경화부 표면과 깊이 방향으로 $0.1mm$ 간격으로 경도를 측정하였다.

5. 결과 및 고찰

레이저 빔을 재료에 조사시키면 입사된 레이저 빔의 일부는 재료표면에서 반사되고 일부는 투과되며 나머지는 흡수된다. 금속표면에 조사된 레이저 빔은 빔의 파장, 재료의 열전도도, 에너지 밀도, 온도, 전기전도도, 코팅두께, 코팅재료 등에 따라 흡수되는 정도는 다르게 된다. 흡수된 레이저 빔은 금속격자의 음자 및 자유전자들과 충돌에 의하여 $10^{-13}sec$ 이내에 열로 바뀌어 금속표면의 온도를

증가시킨다. 금속의 온도가 증가함에 따라 전기전도도는 감소하므로 레이저 빔의 흡수되는 양은 증가하게 된다.

재료의 흡수계수 α 는 단위 길이당 감소된 에너지 밀도로 나타낸다¹⁵⁾. 입사하는 빔의 파장에 따라 자유 이온수가 증가되며 이 때문에 흡수율이 증가한다. 낮은 온도에서 흡수계수 α 는 이온화 정도에 비례하며 온도에 따라 급속도로 증가한다. 본 연구에서는 계산에 사용한 재료의 흡수계수로 Klemens¹⁶⁾, Mazumder¹⁷⁾, Schuöcker¹⁸⁾ 등 여러 연구자들이 사용한 6cm^{-1} 을 사용하였다.

Fig. 3는 무차원 온도 분포를 재료 깊이 방향으로 식(4)에 의해서 계산한 것이다. 깊이가 증가할수록 최고 온도는 감소함을 알 수 있다. 사각형 빔의 가장 자리에서 급격히 온도가 감소하지 않는 이유는 금속 재료에서 재료의 가장자리로 열전도에 의한 열전달이 일어나기 때문이다.

Fig. 4는 무차원 온도 분포를 조사되는 빔의 폭과 흡수 계수에 의해서 결정되는 r 에 대하여 계산한 결과이다. $\xi(=y/b_0)$ 가 증가할수록 무차원 온도는 감소하고, 같은 ξ 에 대하여 r 가 증가함에 따

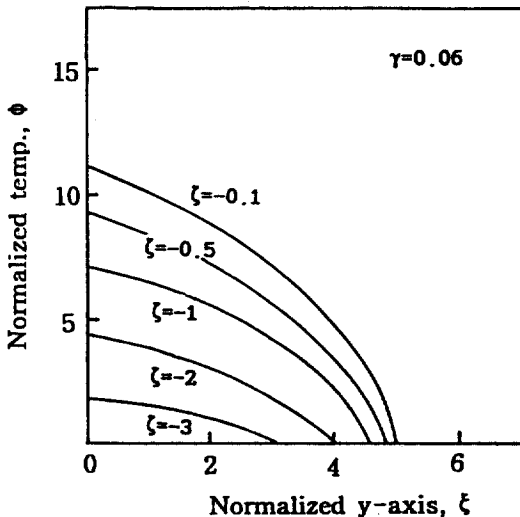


Fig. 3 Normalized temperature distribution for normalized y-axis at different normalized depth.

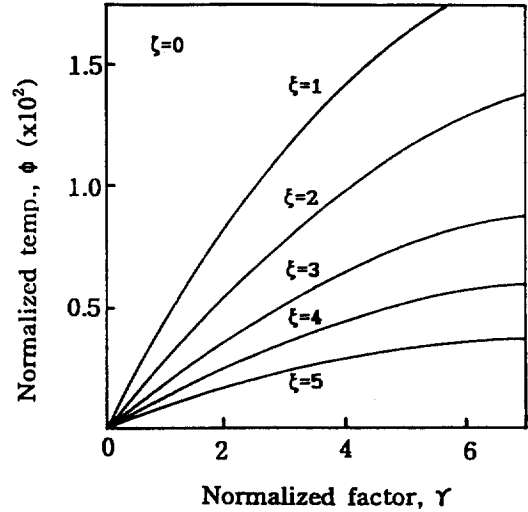


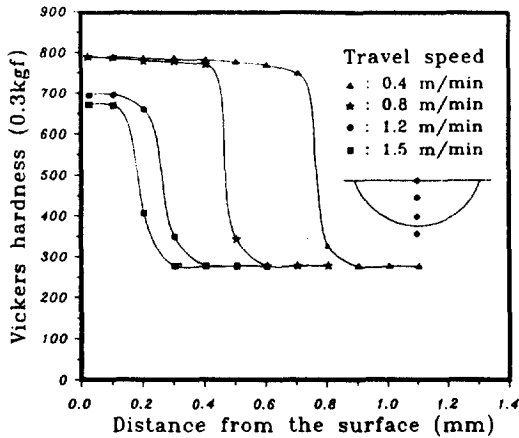
Fig. 4 Normalized temperature distribution for normalized factor at different normalized y-axis.

라 무차원 온도가 증가함을 알 수 있다. 즉, 레이저 빔 크기가 같을 때 y 가 증가할수록 온도는 감소한다.

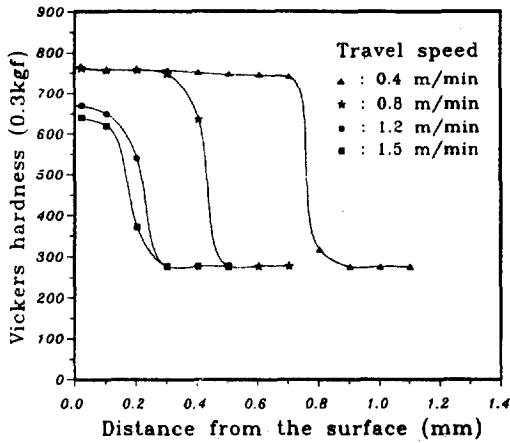
Fig. 5는 레이저 표면경화 조건에 따라 경화처리된 시편의 깊이 방향으로 측정된 경도분포를 보여주고 있다. 시편 경사각 50° 일때는 이송속도 $0.4\text{m}/\text{min}$ 일때만 경화처리가 되었으나, $0.8\text{m}/\text{min}$ 이상의 이송속도에서는 경화가 되지 않았으며, 70° 일때는 $0.4\text{m}/\text{min}$ 일때도 경화가 되지 않았다. 모재의 경도치는 270Hv 인 반면 레이저 경화처리 후의 경도는 790Hv 정도로 약 2.8배 증가함을 알 수 있었으며 경사각 변화에 따른 경화부위의 최고 경도값은 거의 변화가 없었다.

Fig. 6은 경화폭과 경화깊이의 측정 결과를 나타낸 것이다. 레이저 출력, 빔 이송속도, 빔 에너지 분포 등의 레이저 표면경화 변수에 따라서 경화구역과 경도분포가 달라지게 된다. 이송속도 증가에 따라 경화폭과 경화깊이가 감소함을 알 수 있다.

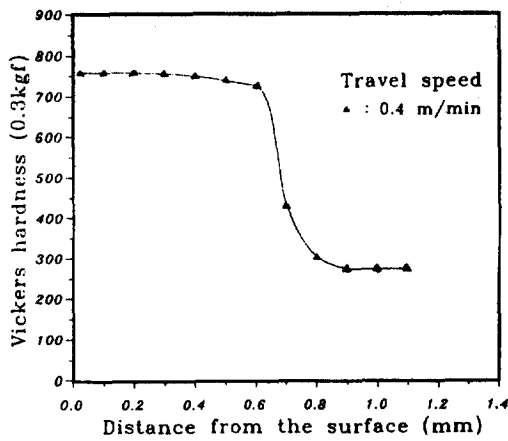
Fig. 7은 이송속도 $0.4\text{m}/\text{min}$ 일때 재료의 경사각 변화에 따른 경화깊이와 경화폭을 나타낸 것이다. 경사각이 증가함에 따라 경화 깊이는 약간 감



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Vickers microhardness distributions of laser hardened specimen at the various travel speeds and inclined angles.

(a) $\theta=0^\circ$ (b) $\theta=30^\circ$ (c) $\theta=50^\circ$

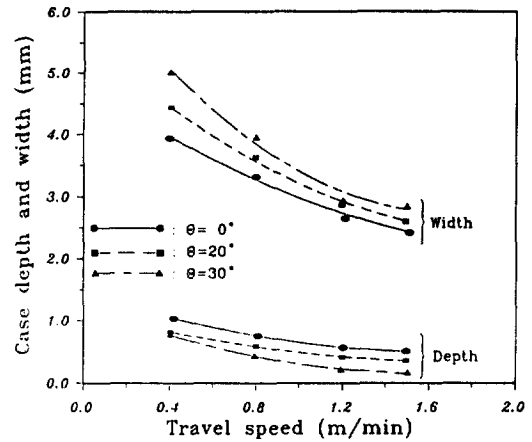


Fig. 6 Experimental result of case depth and case width at various travel speeds.

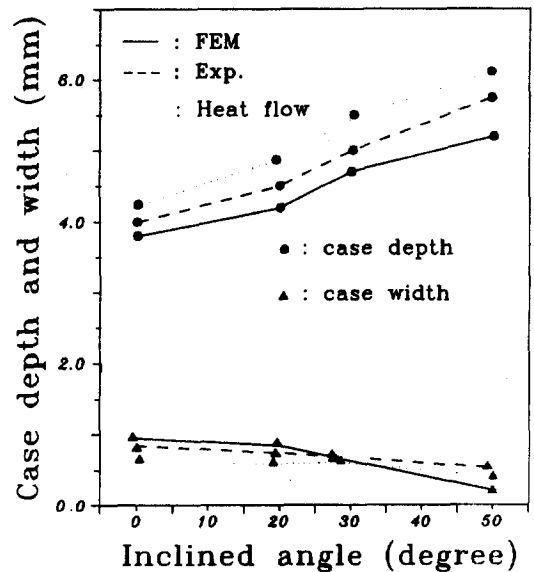


Fig. 7 Comparison between the calculated and experimented case depth and case width at various inclined angles.

소하지만 경화 폭은 증가함을 알 수 있다. 이것은 경사각이 증가함에 따라 단위 면적당 에너지 밀도가 감소하고 초점 크기가 커지기 때문이다. 50°까지의 경사각 증가에 따라 경화폭은 증가함을 보여주고 있으나 경화깊이는 약간 감소함을 알 수 있다. 경사각 증가에도 표면경화가 가능한 것은 레이저 빔이 접촉하는 면적이 증가하여 빔 에너지의 밀

도는 감소하지만 레이저의 재료 표면에서의 정체시간이 길어지게 되기 때문이다. 경화 깊이에서 해석식에 의해 구한 결과가 유한 요소법이나 실험 결과보다 약간 크게 계산됨을 알 수 있다.

Fig. 8은 경사각 30°, 50°, 70° 일때 재료 내부의 온도분포를 나타낸 것으로 재료의 레이저 흡수율은 70%로 하여 계산한 것이다. 여러 연구자들의 보고서에 의하면 표면 경화의 조건에 따라서 흡수율을 60%에서 80%로 함을 알 수 있었다¹⁸⁻²⁰⁾. 경사각 70° 일때는 재료의 최고 온도는 표면에서도

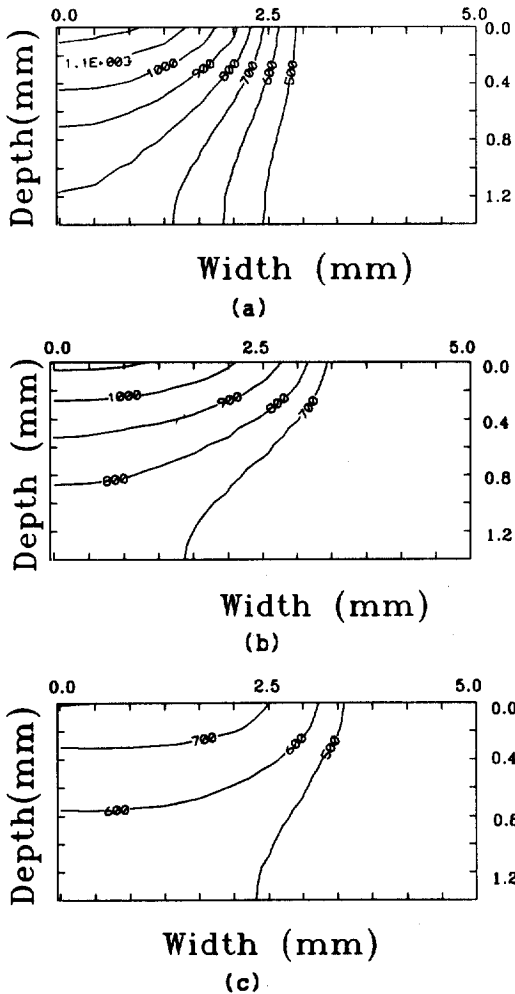


Fig. 8 Temperature field calculated by FEM at various inclined angles.
 (a) $\theta = 30^\circ$ (b) $\theta = 50^\circ$ (c) $\theta = 70^\circ$

상변태 온도인 840°C가 되지 못하였다.

Fig. 9는 해석식과 유한요소법을 이용하여 계산한 경화층의 단면과 실험에 의해 구한 경화층의 단면을 비교한 그림이다. 계산된 결과와 실험 결과가 비교적 잘 일치하고 있다. 주어진 레이저 표면 경화 조건에 따라서 해석식과 유한요소법을 이용하여 미리 경화층의 단면(경화 깊이, 경화폭)을 예측해 볼 수 있다.

Fig. 10는 이송속도 0.4m/min이고 재료의 경사각이 50° 일때 표면경화된 부분의 단면사진이다.

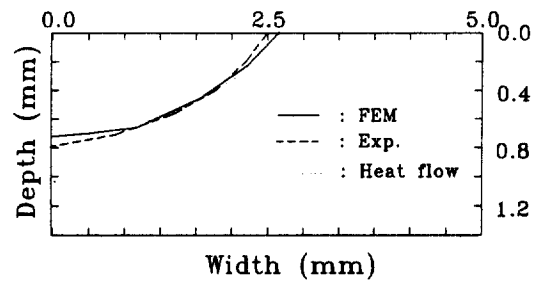


Fig. 9 Comparison between the calculated and experimented hardening boundaries.
 (P=1kW, V=0.4m/min)

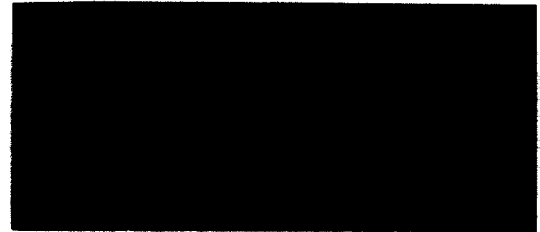


Fig. 10 Macrosection of laser hardened specimen.
 (P=1kW, V=0.4m/min, $\theta = 50^\circ$, X50)

6. 결 론

레이저 표면 경화 실험과 열전달 방정식의 해석 및 유한요소법을 사용하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 레이저 경화처리 후의 경도는 모재보다 약 2.8배 증가함을 알 수 있었고, 경사각 변화에 따른

경화부의 최고 경도값은 거의 변화가 없었다.

2) 재료의 경사각이 0° 에서 50° 까지 증가할수록 경화폭은 상당히 증가하나 경화깊이는 약간 감소하였다.

3) 해석식과 유한요소법을 이용하여 경화층(경화 깊이, 경화폭)의 크기를 예측해 볼 수 있었다.

4) 레이저 빔을 경사지게 하여 디젤엔진의 피스톤 링 그로브를 표면 경화할 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 논문은 1993년도 교육부 특성학과 해외과건 연구비에 의하여 연구되었습니다. 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. L. Branst : Lasers & Appl., Oct., 1985, pp.10~16.
2. R. Walker : Lasers & Appl., Apr., 1984, pp. 62~69.
3. J. Benedek, A. Shachral and L. Levin : Optics and Laser Tech., Oct. 1980, pp. 247~253.
4. H. J. Hegge : Metall. Trans., A, Vol. 21A, 1990, pp. 987~995.
5. P. J. Oakley : TWI, Research Report, 1981, pp. 4~10.
6. J. T. Luxon and D. E. Parker : Industrial Lasers and their Applications, Prentice-Hall, 1985.
7. A. K. Mathur and P. A. Molian : Trans. of ASME, Vol. 107, July. 1985, pp. 200~207.
8. S. S. Charschan : Lasers in Industry, van Nostrand Reinhold, 1972.
9. 김재도 : 대한기계학회 논문집, 16권 12호, 1992, pp. 1861~1868.
10. J. D. Kim : KSME J, Vol. 4, No.1, 1990, pp. 32~39.
11. H. R. Shercliff : Metall. Trans. A, Vol. 22A, Oct., 1991, pp. 2459~2466.
12. N. Kikuchi : Finite Element Methods In Mechanics, Cambridge University Press, 1986.
13. D. W. Pepper and J. C. Heinrich : The Finite Element Method, Hemisphere Publishing, 1992.
14. 김재도, 조용무 : 열처리공학회지, Vol. 6, No. 4, 1993, pp. 230~236.
15. S. D. Ferris, H. J. Leamy and J. M. Poate : Laser-Solid Interactions and Laser Processing, American Institute of Physics, 1978.
16. H. E. Cline and T. R. Anthony : J. of Appl. Phys., Vol. 48, no. 9, 1977, pp. 3895~3900.
17. H. Maruo : J. of Japan Welding Soc., Vol. 50, 1981, pp. 82~88.
18. P. G. Klemens : J. of Appl. Phys., Vol. 47, no. 5, 1976, pp. 2165~2173.
19. J. Mazumder and W. M. Steen : J. of Appl. Phys., Vol. 51, no. 2, pp. 941~947.
20. D. Schuöker and D. Abel : Proc. of SPIE, 1985, pp. 88~95.