

구상흑연주철의 CO₂ 레이저 표면경화 특성

The Characteristics of Ductile Cast Iron Heat-treated by CO₂ Laser

정원기*(인하대 대학원), 전병철(인하대 대학원), 김재도(인하대학교 기계공학과)

W. K. Jeong*, B. C. Cheon, J. D. Kim

ABSTRACT

This study has been performed to predict beam absorption with analysis of temperature field by using a FEM in CO₂ laser hardening and to investigate into some effects of power density and travel speed of laser beam on the microstructure and hardness of ductile cast iron treated by laser surface hardening technique.

Optical micrograph has shown that large martensite and small amount of retained austenite appear in inside hardened zone. Hardness measurement has revealed that the range of maximum hardness value is Hv=415±10. The power density increases and the travel speed decreases, the depth of hardened zone increases due to increase of input power density.

Key Words : Effective case depth(유효경화깊이), Substrate(기지), Heat Affected Zone(열영향부)
Self-quenching(자기퀵칭), Finite Element Method(유한요소법),
Beam absorption(빔흡수율), Quadrilateral Element(사각형요소)

1. 서 론

자동차 산업, 항공기 산업, 선박산업 등의 수송산업이 급속도로 발전하고, 장기운행에 따른 기기부품 및 기계를 이용한 생산 분야에서 만들어지는 부품은 오늘날 더 나은 기계적 특성을 요구하게 되었다. 최근 표면경화 처리가 용이하고 빠르며 고부가 가치가 뒤따르는 레이저 표면경화 처리는 이미 선진국에서는 산업전반에 실용화가 확산되어 활발히 진척되고 있으며, 대기오염과 환경과괴에 대한 문제점으로 인해 대기중에서 환경오염을 전혀 일으키지 않는 국부적인 표면경화 처리가 가능한 레이저 표면경화 처리는 실린더 라이너, 밸브시트, 캠 샤프트, 크랭크 샤프트, 피스톤 링, 기어 등의 내마모성 및 내피로성이 요구되는 기기부품에 적용이 이뤄지고 있다.^{1~5)}

레이저 표면경화 처리는 고열원의 레이저 빔을 이용하여 형상이 복잡하고 정밀제품 등에 기존의 표면경화 처리시 품질이 불균일하고 제품의 치수변형 등의 문제점이 없이 시료의 선택적 경화처리에 효과적이며 자동화 시스템에 의한 대량 생산이 가능하다. 또한 처리공정이 간단하고 요구하는 기계적 성질을 얻기 위해 레이저 표면경화 인자인 레이저 빔 모드, 빔직경, 출력밀도, 조사속도 등의 정

밀제어가 가능하다. 레이저 표면경화 처리시 표면층에 형성되는 마르텐사이트 조직은 체적 팽창으로 인한 압축 잔류응력을 형성시켜 내마모성과 내피로성을 향상시키며 자기퀵칭으로 인해 표면경화부의 경도치는 높게 나타나 내마모성을 더욱 향상시킨다.^{1~8)}

본 연구에서는 실린더라이너, 실린더 헤드, 피스톤 등 선박용 디젤 주기관용 재료로 널리 사용되는 구상흑연주철을 시료로 이용하여 레이저 빔 모드와 빔 직경을 일정하게 하고 출력밀도와 조사속도를 각각 달리 변화시켜 레이저 표면경화 처리를 한 후 현미경 조직 및 레이저 표면경화부의 경도분포 특성을 고찰하고 수치해석을 통해 레이저 표면경화 가공변수인 레이저 빔의 흡수율, 표면경화층의 깊이 및 경화폭을 예측하여 실험결과와 비교함을 목적으로 하였다.

2. 실험 방법

2.1 시편준비

본 연구에 사용된 시편은 구상흑연주철(GCD45)이며 화학조성은 Table 1과 같다.

시료의 레이저 비임의 흡수율을 높이기 위해 공업적으로 많이 적용되는 흑연(graphite) 흑색 스프레이를 시료 표면에 균일하게 코팅

하였다.

specimen	C	Si
GCD45	2.5이상	2.5이하
Mn	P	S
0.4이하	0.08이하	0.02이하

Table 1. Chemical composition (%)

2.2 실험장치

본 연구에 사용된 레이저 표면경화 실험장치는 다음과 같다.

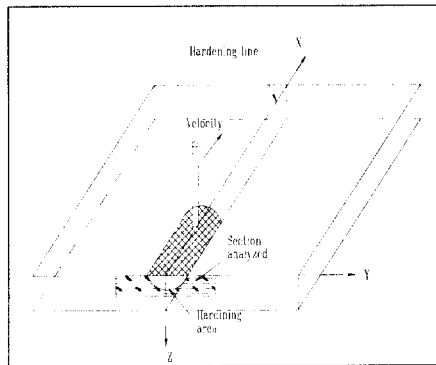


Fig. 1 Hardening configuration of model

2.3 레이저 표면경화 처리조건

레이저 표면경화 처리조건은 표면경화처리가 가능한 조건인 용융이 일어나지 않는 범위 내의 빔조건으로 한정하며, Table 2에 나타낸 바와 같이 빔직경은 일정하게 하고 출력밀도 변화와 조사속도의 변화를 유도하여 실험을 행하였으며 레이저 빔 모우드는 TEM₀₁₊를 적용하였다.

specimen	power (kW)
ductile cast iron	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5
travel speed (m/min)	beam diameter (mm)
0.25~3.0(0.25 step)	1.5

Table 2. Laser hardening parameter

2.4 현미경 조직 관찰

레이저 빔으로 조사된 시편 표면경화부의

미세조직을 관찰하기 위해 5% nital로 부식시킨 후 광학현미경(optical microscope)을 사용하여 관찰하였으며 압축잔류응력의 세기에 영향을 미치는 표면경화부의 마르텐사이트의 미세조직을 고찰하였다.

2.5 단면경도 시험

레이저 비임으로 조사된 시편의 단면경도 측정을 위해 시료표면을 0.1 μ m 알루미나 분말로 정마(polishing)한 후 미소 비커스 경도시험기(micro Vickers hardness tester)를 사용하여 하중 1,000g으로 고정하고 경화부 최외 표면으로부터 중심부에 이르기까지 0.2mm 간격으로 측정하였다. 경도 측정 후 표면경화부의 경도치가 시편의 최외표면으로부터 Hv=200 \pm 10의 경도치를 나타내는 깊이까지를 유효경화깊이(effective case depth)로 설정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 현미경조직

파장이 10.6 μ m의 긴파장과 2.8kW의 고출력을 갖는 CO₂레이저를 이용하여 레이저 빔 직경을 1.5mm으로 일정하게 하고, 0.75m/min의 조사속도와 2.0kW의 출력의 조건에서 레이저 표면경화 처리된 구상흑연주철의 현미경 조직을 Fig. 2에 나타내었다. 현미경 조직관찰은 그림에서 나타낸 바와 같이 표면경화부의 최외 표면(a), 내부(b) 및 기지조직(c)으로 되었으며 최외표면부에서는 단위면적당 입열되는 고열원의 레이저빔과 시료와의 상호작용에 의해 오스테나이트 온도구간으로 가열되어 냉각된 내부에 의해 자기퀵칭(self-quenching)되어 마르텐사이트 조직을 나타내고 있다. 최외표면에서는 구상흑연이 레이저 빔에 의해 일부는 분해되어 기지에 고용되었기 때문에 기지의 Ms점이 강하하여 마르텐사이트 변태가 완료되지 못한 미량의 잔류오스테나이트도 나타남을 알 수 있다. (b)에서는 미세한 마르텐사이트 조직을 나타내고 있는데 이는 레이저 빔강도가 최외표면보다 약하여 열영향력이 감소됨에 따른 현상으로 나타난다. 또한 마르텐사이트 형상도 최외표면부보다는 비교적 균일하게 전면에서 걸쳐 미세하게 분포하고 있음을 알 수 있다. 레이저 빔에 대한 열영향이 미치지 못

하는 기지(substrate)에는 미세한 펄라이트와 미량의 페라이트 및 구상흑연으로 구성되어 있음을 알 수 있다.

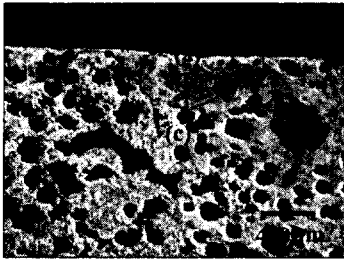
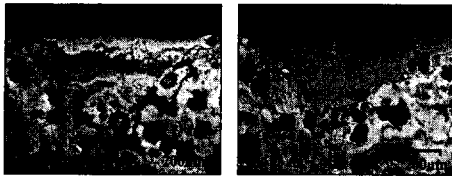


Fig. 2 Microstructures of ductile cast iron coated with black graphite spray and laser surface hardened for laser power of 2.0kW and travel speed of 0.75m/min

(a) outside hardened zone
(b) inside hardened zone (c) substrate

0.75m/min의 조사속도와 2.0kW의 출력의 조건에서 흑연 흑색 스프레이를 코팅처리하여 레이저 표면경화처리된 구상흑연주철의 현미경 조직을 Fig. 3에 나타내었다. 코팅처리를 하지 않은 것에 비해 흡수율이 높기 때문에 경화폭 및 경화깊이가 증가되고, 구상흑연의 마르텐사이트 변태가 증가됨을 알 수 있다. 그리고 경화층과 모재와의 경계가 확실히 구분됨을 알 수 있다.



(a) (b)

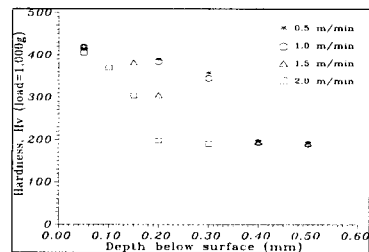
Fig. 3 microstructure of laser heat-treated ductile cast iron (Power 1.5kW, beam diameter 1.5mm, Travel speed 0.5m/min)

(a) black graphite spray coating
(b) no coating

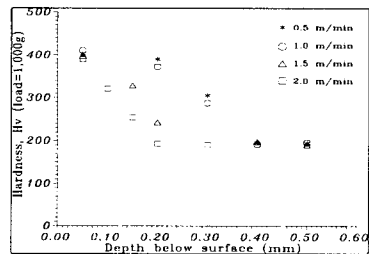
3.2 경도 특성

동일한 출력하에서 조사속도를 0.5m/min에서 2.0m/min으로 증가시켜 레이저 표면경화처리한 후 표면경화부에 분포하는 경도특성을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4 (a)는 흑색 흑연 스프레이 코팅처리한 후 1.5kW의 출력에서 조사속도의 변화에 따른 경도분포 곡선을 나타낸 것으로서 조사속도가 증가할수록 표면층의

경도분포는 최표면경도 범위가 $Hv=415 \pm 10$ 으로 나타나며 표면에서 0.35mm 부위에서 급격한 강도하락곡선을 나타내는데 이는 고열원의 레이저 비임과 시료표면과의 상호작용 시간이 0.1~1sec의 극히 짧기 때문에 시료의 내부로까지 충분한 빔열원의 전달이 안되어 급속가열 경화깊이가 감소하기 때문에 나타나는 전형적인 레이저 표면경화 처리후의 경도분포곡선과 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 4 (b)는 코팅처리를 하지 않고 1.5kW의 출력에서 조사속도의 변화에 따른 경도분포 곡선을 나타낸 것으로 0.30mm 부위에서 급격한 강도하락곡선을 나타낸다. 이는 코팅처리를 한 것은 안한 것에 비해 빔흡수율로 차이로 인해 경화깊이가 다소 차이가 있음을 알 수 있다. Fig.5 (a)와 (b)는 1.0kW에서 2.5kW으로 출력을 변화시키고 조사속도를 일정하게 하여 레이저 표면경화 처리한 후의 표면경화층에 분포된 경도곡선을 나타낸 것으로서 조사속도가 빠를수록 경도분포는 현저히 감소하여 나타남을 알 수 있다. 시료 내부의 기지에서는 경도치는 $Hv=190$ 정도로 나타나 레이저 표면경화처리한 시료의 표면경도치가 현저히 높게 나타남을 알 수 있다.

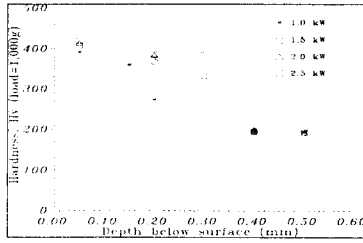


(a)

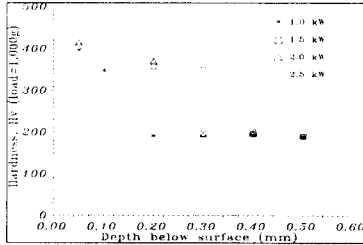


(b)

Fig. 4 Relation between hardness and depth below surface of ductile cast iron coated with black graphite spray and laser hardened for different travel speeds with laser power 1.5kW
(a) black graphite spray coating (b) no coating



(a) travel speed 1.0 m/min



(b) travel speed 2.0 m/min

Fig. 5 Relation between hardness and depth below surface of ductile cast iron coated with black graphite spray and laser surface hardened for different

3.3 수치해석

본 연구에서 사용된 모델은 두께 8mm의 GCD45를 사용하였고 입사되는 레이저 빔에 대하여 재료 내부에서 발생하는 비정상 온도 분포를 해석하여 흡수율을 예측하였다. 온도 분포 해석을 하기 위해 해석모델의 4절점 등방체 2차원 사각형 요소(two-dimensional quadrilateral element)를 사용하여 806개의 절점과 750개의 요소로 분할하였다. 온도해석을 위하여 빔의 이송방향으로는 온도변화가 거의 없다고 가정하고, 재료는 등방체(isotropic material)로 취급하였다. 초기 상태에서 경화 가능한 온도는 780℃이며, 소재의 온도는 대기온도인 20℃로 일정하다. 재료의 물성치는 Table 3과 같이 상수로 가정하여 해석하였으며, 보조가스는 질소(N₂)가스를 0.1bar의 압력으로 사용하였으며, 동일한 초점크기로 이송 속도 및 레이저 출력을 변화시켜가며 레이저 표면경화를 실시하였다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] = (k_{ij} T_{,i})_{,j} \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

density (kg/m ³)	specific heat (J/kg °C)
9,134	40.5
thermal conductivity (W/m °C)	heat transfer coefficient (J/m ² sec °C)
423	6.1

Table 3. Physical properties of material for analysis

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

이때 {φ}는 전체절점의 온도벡터(temperature vector), [k]는 강성행렬(stiffness matrix), [c]는 질량행렬(mass matrix), {f}는 힘벡터(load vector)이다.

비정상 열전도 문제의 열전도 해석을 위해 미분항은 유한차분법 중에 Crank-Nicolson차분식을 이용해 초기조건을 대입하고 Gauss소거법을 이용하여 미소시간 증분 Δt에 따른 전 영역의 열전도과정을 해석하였다.

Fig. 6은 레이저 출력에 따른 재료내부의 온도분포를 나타낸 것으로 흡수율을 70%로 가정하였을 때이다. 레이저 빔의 흡수는 금속의 표면상태나 조직, 조성에 따라서 다르며, 표면에 입사되는 레이저 빔에 대하여 파장 및 금속의 온도에 따라 차이가 있으므로 더욱 정확한 흡수율 결정을 하기 위해서는 이러한 모든사항을 고려한 실험과 해석이 병행되어야 할 것이다.

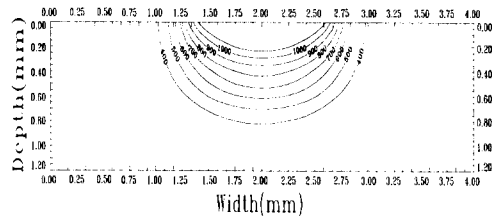


Fig. 6 Temperature field calculated by FEM

Fig. 7은 유한요소법을 이용하여 계산한 경화층과 실험에 의해 경화된 부분을 관찰해서 비교 도시한 그림이다.

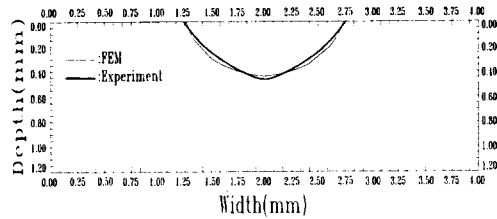


Fig.7 Comparison between the calculated and observed hardening boundaries of laser hardening

4. 결 론

레이저 빔모우드와 직경을 일정하게 유지하고 출력밀도와 조사속도를 변화시키면서 레이저 표면경화 처리된 구상흑연주철의 현미경조직, 경도특성 및 수치해석에 관한 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 주어진 조사속도와 출력 밀도에서 구상흑연주철의 현미경조직 특성은 최표면경화부에서 조대한 마르텐사이트와 미량의 잔류오스테나이트로 구성되며 경화부 내부에서 미세한 마르텐사이트로 나타났다.
- 2) 구상흑연주철의 최대표면경도 범위는 $Hv=415 \pm 10$ 로 모재에 비하여 2.2배 정도로 증가하며 출력이 증가하고 조사속도가 감소할수록 경도분포는 단위 면적당 입열량의 증가로 인해 경화층 깊이가 증가함을 나타내었다.
- 3) 구상흑연의 Martensite화는 graphite를 코팅하였을 경우 증가함을 알 수 있었고, 경화 깊이가 증가함을 알 수 있었다.
- 4) 레이저의 출력이 1.5kW, 이송속도가 0.5m/min일 때는 경화깊이가 0.42mm였고, 출력이 2.0kW, 이송속도가 0.75m/min에서 경화 깊이가 0.45mm로 가장 깊었다.
- 5) FEM을 이용하여 수치해석을 한 결과와 실제 실험 결과를 비교하였을 때 거의 일치함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) M. Bass, "Laser Materials Processing", North-Holland, 1983.
- 2) 김도훈, "레이저가공학", 경문사, 1990.
- 3) I. C. Hawkes, "Practical Experience with Laser Heat Treatment" Proc. 4th Int. Conf., Lasers in Manufacturing, May, 1987, pp.19~32.

- 4) J. F. Ready, "Industrial Application of Lasers", Academic Press, 1978.
- 5) Leonard Migliore, "Laser Materials Processing", Marcel Dekker, Inc.
- 6) Y. Asaka, H. Kobayashi and S. Arita, "Laser Heat Treatment of Piston Ring Groove", Proceedings of LAMP, May, 1987.
- 7) 서정원, "CO₂레이저 표면경화에서 경화깊이 예측", 인하대학교 석사학위 논문, 1993.
- 8) 이동석, "CO₂레이저 표면경화에서 빔 흡수율 예측 및 잔류응력 측정", 인하대학교 석사학위 논문, 1995.
- 9) 한유희, "레이저 표면경화처리된 회주철의 내마모특성에 관한 연구", J. of the Korean Society for Heat Treatment, Vol. 9, No. 4, December, pp.271~280.
- 10) Condon & Odishaw, "Handbook of Physics 2nd ed.", McGRAW-Hill Book Company, pp. 5-61~5-72.
- 11) 김재도, "12%-Cr강의 CO₂ 레이저 표면경화에서 금속조직과 경도분포", 대한기계학회지, 제16권, 제10호, 1992, pp. 1861~1868.
- 12) 飯高一郎, "구상흑연주철의 연구", 제2집, 1954, pp. 1~16.
- 13) 張博, "구상흑연주철", 1983, pp. 8~23.
- 14) A. K. Mathur, "Laser Heat Treatment of Cast Irons-Optimization of Process Variables", Transactions of the ASME, Vol. 107, July 1985, pp. 200~207
- 15) 김재도, 조용무, "금형용 합금공구강 STD11의 레이저 표면경화특성", 한국열처리학회지, Vol. 6, No. 4, 1993, pp. 230~236.
- 16) D. Rosenthal, "Mathematical Theory of Heat Distribution During Welding and Cutting", Welding J., 20(5), 1941, pp. 220s~234s.
- 17) D. J. Sanders, "Temperature Distributions Produced by Scanning Gaussian Laser Beams", Applied Optics, 23(1), 1984, pp.30~35.
- 18) N. Kikuchi, "Finite Element Methods In Mechanics", Cambridge Univ. Press, 1986.
- 19) S. J. Na and Y. S. Yang, "The Finite Element Method", Hemisphere Publishing, 1992.
- 20) M. Lax, "Temperature Rise Induced by a Laser Beam", J. of Appl. phys., 48(9), 1977, pp. 3895~3900.