

고출력 다이오드 레이저를 이용한 고탄소강의 경화특성에 관한 연구

황현태¹ · 김종도[†] · 소상우¹

(원고접수일 : 2011년 5월 11일, 원고수정일 : 2011년 7월 21일, 심사완료일 : 2011년 7월 21일)

A Study on Hardening Characteristics of High Carbon Steel by using High Power Diode Laser

Hyun-Tae Hwang¹ · Jong-Do Kim[†] · Sang-Woo So¹

요약 : 고탄소강은 사용자가 요구하는 특성을 만족시키기 위해 침탄, 질화, 고주파담금질 등에 의해 표면처리 되어져 왔다. 그러나 기존의 처리 방법은 모두 처리물 전체를 가열하거나 균일한 가열을 하지 못하여 표면처리 후 변형의 문제와 처리후의 후가공의 경비문제, 그리고 극히 일부분만 경화가 필요한 부품에는 적용하기 어려운 문제점이 있었다. 이러한 문제를 해결할 수 있는 표면처리법으로써 레이저열처리 방법이 대두되고 있으며, 레이저열처리는 레이저 빔을 피처리물의 표면에 조사하고 적당한 속도로 이동을 하게 되면 레이저조사부위가 급속하게 가열되고 레이저 빔이 통과한 후에는 표면의 열이 내부로 열전도 되어 급속히 자기냉각(self-quenching)됨으로써 표면에 새로운 기계적 성질을 갖게 하는 열처리법이다. 본 연구에서는 기존의 CW Nd:YAG 레이저 열원보다 효율이 좋은 HPDL을 이용한 고효율, 고기능의 고탄소강 열처리 후 재료적 물성을 평가하였다. 그 결과 레이저빔의 조사속도 및 온도변화에 따른 열처리부 및 모재 부분에 대한 경도특성 및 미세조직의 특성을 명확히 할 수 있었다.

주제어 : 고출력 다이오드 레이저, 레이저 표면처리, 고탄소강

Abstract: Recently, high carbon steel has become essential not only for shipbuilding parts, but also mass production. Its surface has been treated by carburizing, nitriding and induction hardening, but these existing treatments cause considerable deformation and increase the expense of postprocessing after treatment; furthermore, these treatments cannot be easily applied to parts that requiring the hardening of only a certain section. This is because the treatment cannot heat the material homogeneously, nor can it heat all of it. Laser surface treatment was developed to overcome these disadvantages, and when the laser beam is irradiated on the surface and laser speed is appropriate, the laser focal position is rapidly heated and the thermal energy of surface penetrates the material after irradiation, finally imbuing it with a new mechanical characteristic by the process of self-quenching. This research estimates the material characteristic after efficient and functional surface treatment using HPDL, which is more efficient than the existing CW Nd:YAG laser heat source. To estimate, microstructural changes and hardness characteristics of two parts (the surface treatment part, and parental material) are observed with the change of laser beam speed and surface temperature.

Key words: High power diode laser(HPDL), Laser surface treatment, High carbon steel

1. 서 론

일반 기계부품이나 자동차부품 및 조선부품에

이르기까지 부품의 내구성과 수명 연장을 위해 최근 실용화 연구에 집중되고 있다. 특히 레이저를

[†] 교신저자(한국해양대학교 기관시스템공학부, E-mail: jdkim@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4253)

¹ (재)울산테크노파크 (자동차기술지원단)

이용한 열처리는 처리시간이 빠르고 자동화가 가능하여 고품질의 대량처리가 용이하다. 그리고 형상이 복잡하고 정밀한 부품에 대하여 요구하는 부위의 국부적 처리가 가능하고 레이저 시스템의 정밀제어가 가능하여 엔진 실린더 라이너의 안쪽벽면에 선택적인 경화효과를 얻을 수도 있다. 레이저에 의한 열처리인자로는 레이저출력, 열처리 온도 및 레이저 빔의 이송속도 등이 있으며 이러한 처리조건에 따라 부품의 요구되는 경화 특성을 자유자재로 얻을 수 있다.

레이저열처리에서 레이저 빔과 부품재료와의 상호작용은 레이저 빔의 단위 시간당 조사되는 거리와 단위면적당 레이저 빔의 입열량의 적절한 조절을 통하여 제어가 가능하다. 이러한 레이저열처리는 고열원의 레이저 빔에 의해 A3 이상의 고온으로 가열되어 오스테나이트화된 후 내부의 기지에 의한 순간 급냉효과로 자기퀵칭(self-quenching)이 이루어지는 동시에 열처리 표면부는 체적팽창을 일으키는 마르텐사이트 변태를 수반한다. 이러한 마르텐사이트 변태와 레이저 열원이 조사되는 시료의 표면부에 형성되는 잔류응력으로 인해 표면부는 고경도와 강인성을 나타내어 부품의 기계적 성질을 향상시키는 주 요인으로 작용하고 있다[1].

이와 같이 레이저열처리 기술은 최근 독일과 일본 등에서 활발히 연구되고 있다. 국내에서의 경우 일부 CW CO₂, 및 Nd:YAG 레이저를 이용한 표면처리 기술이 보고되고 있으나[2-5], 파장 및 레이저 빔모드의 제한으로 인하여 금속의 일부 가공분야의 적용에 국한되어 사용되고 있다.

본 연구에서는 고출력 다이오드 레이저를 이용하여[6-9] 고탄소강인 HP1A 시료를 사용하여 시료 표면에서 측정된 열처리 온도 및 레이저 빔의 이송속도를 각각 달리 변화시켜 레이저열처리를 실시한 후 현미경 조직관찰과 경도분포 특성을 고찰

하고 입열량 특성 및 표면조건 변화를 레이저열처리 인자에 따라 규명하고자 하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에서 사용된 재료는 진공탈가스 처리한 강괴로 단조하여 생산되기 때문에 재질의 청정도가 높고 기공이 없으며, 성분의 편석 또는 기타 유해한 결함이 적은 소재이다. 따라서 금형소재 및 기계부품 소재로 많이 사용되고 있어 국부적으로 기계적 특성을 달리하여 부품의 내구수명을 향상 시키기에 유리하다.

시험편은 레이저열처리 후 자기냉각 효과를 고려하여 90×50×30 mm로 제작하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 재료의 화학적 조성을 나타내었다.

2.2 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 레이저열처리 장비는 고출력 다이오드 레이저 장비로 Figure 1에 나타내었다. 여기서 레이저 최대출력은 4.0 kW이며, 레이저 빔은 직경이 400 μm의 파이버로 전송된다. 레이저 빔의 전송은 파이버를 통해 6축 로봇에 부착된 광학 렌즈로 전송되고, 대형부품의 레이저열처리 적용을 위해 레일을 설치하여 넓은 범위로 빔의 전송이 가능하도록 구성하였다. 레이저 빔 사이즈는 40×7 mm의 열처리 광학렌즈를 사용하였고, 레이저의 WD(working distance)는 235 mm이다. 시험편의 온도 측정을 위하여 열처리 헤드부분에 적외선 온도센서인 2색 온도계(two color pyrometer)가 부착되어 있으며, 측정지점은 빔조사부의 중앙이며 측정온도의 범위는 350~1,300℃이다. 또한 온도제어는 고온계를 통해 측정된 온도를 통하여 레이저출력이 자동조절 되게 구성하였다.

본 연구에서는 레이저열처리 조건으로 열처리

Table 1: Chemical composition of specimen

Element(wt%) Material	C	Si	Mn	Ni	Alloy element
HP1A	0.50 ~ 0.55	0.15 ~ 0.35	0.70 ~ 0.90	~ 0.50	added

온도 및 레이저 빔의 이송속도에 따른 열처리를 실시하여 공정변수에 따른 경화특성을 분석하였다. 또한 광학계에 부착되어 있는 적외선 온도센서를 이용하여 시험편 표면온도를 측정 후 레이저 출력에 따른 표면온도 변화를 관측하였다. 그리고 표면열처리부의 열처리 공정변수에 따른 입열량 특성을 분석하고, 미세조직을 관찰하여 경화특성을 규명하였다.

mm/sec로 고정하고 열처리 온도를 900~1,150℃ 사이에서 50℃ 간격으로 실시하고, 열처리 온도 1,050℃로 고정하고 레이저 빔의 이송속도 2, 3, 5, 7, 10 mm/sec로 변화시키면서 열처리를 실시하였다.

열처리 온도의 경우 레이저 빔이 시편 표면에 입사되어 시편의 입열량의 증감으로 인해 경화 특성에 영향을 미치는데 열처리 온도가 낮을 경우 입열량의 감소로 열처리 성능이 감소하여 경화 폭 및 표면경도가 낮아진다. 또한 열처리 온도가 너무 높을 경우 입열량의 과다로 시편의 표면이 용융하게 된다. 표면을 용융시키지 않고 열처리하기 위해서는 입열량, 즉 열처리 온도 제어가 필수적이다. 따라서 Figure 2(a)에서 보는 것과 같이 측정된 온도가 증가 할수록 경화 폭이 선형적으로 상승하는 경향을 나타내었다. 열처리 온도 1,100℃ 이상의 경

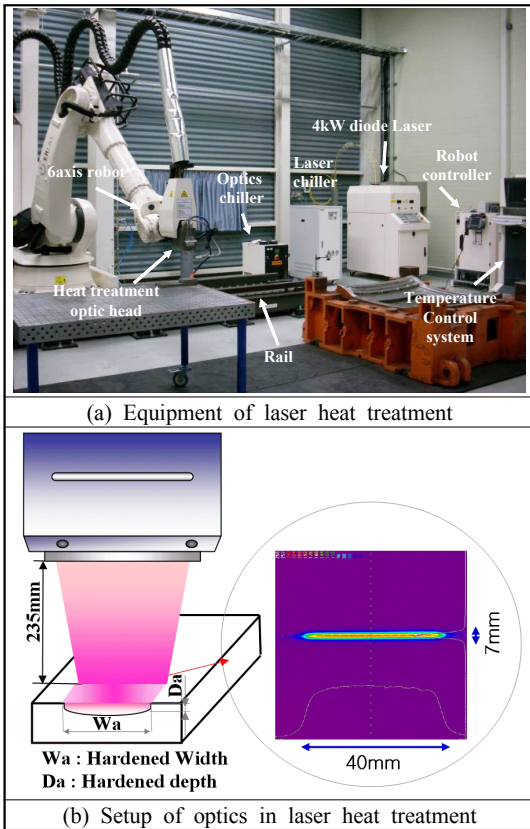


Figure 1: Experimental method for laser heat treatment

3. 실험결과 및 고찰

3.1 공정변수에 따른 표면경화특성

본 연구에 사용된 고탄소강 소재에 대한 경화특성을 파악하기 위해 주된 공정변수인 열처리 온도 및 레이저 빔의 이송속도를 변화시키면서 레이저 열처리를 실시하였다. 레이저 빔의 이송속도 2

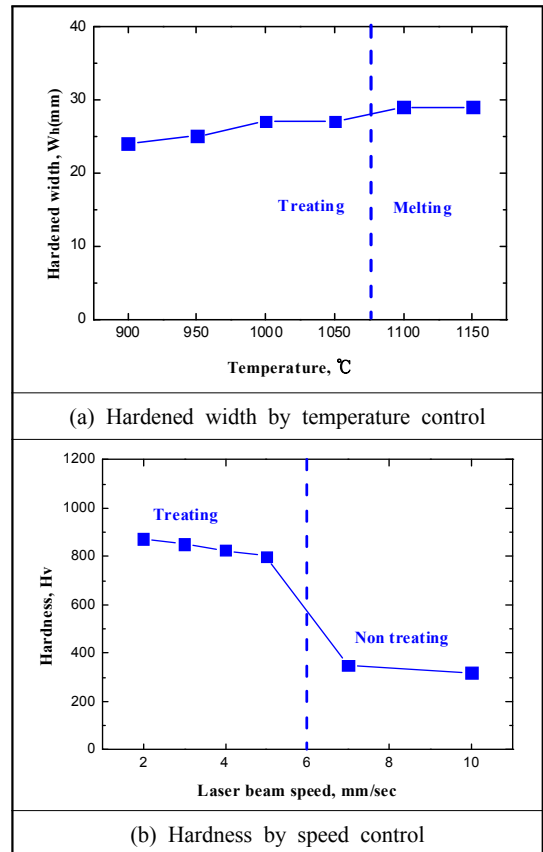


Figure 2: Hardening characteristics on hardened zone

우 일부 표면용융이 발생하였다. **Figure 2(b)**는 레이저 빔의 이송속도에 따른 표면경도를 나타낸 것으로 열처리속도 7 mm/sec 이상에서는 표면경도가 모재와 같았다.

따라서 레이저열처리의 주된 공정변수인 열처리 온도의 경우 900~1,050°C, 레이저 빔의 이송속도의 경우 2~5 mm/sec에서 열처리능이 우수한 경향을 보였다.

3.2 열처리 온도에 따른 레이저 출력 특성

Figure 3은 레이저 열처리하는 동안 시험편의 표면온도 제어를 통한 각 온도별 레이저 출력변화를 나타내었다. 레이저 빔 조사 후 시험편의 표면온도를 제어온도까지 상승시키는데 약 3초 정도 걸리는 것으로 나타났다. 그 후 레이저 출력은 제어온도를 유지하기 위하여 계속적으로 변화하는데 이때 제어온도 폭에 비해 레이저 출력의 폭은 크지 않았다.

이는 레이저 열처리시 약간의 출력 변화에도 경화특성에 큰 영향을 미칠 수 있으며, 레이저 출력 제어의 경우 열처리 범위가 매우 제한적이라는 것을 알 수 있다. 이와 같이 레이저 출력으로 열처리 품질을 제어할 경우 레이저 출력 0.1 kW 단위의 제어가 필요하다. 따라서 레이저 열처리의 경우 온도제어를 통한 레이저 출력 제어가 유리할 것으로 판단된다.

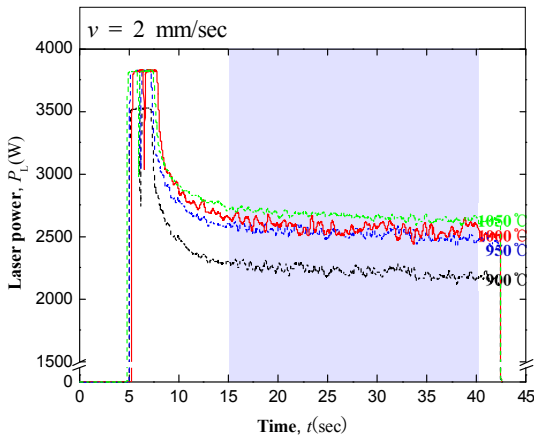


Figure 3: Variation of laser power with temperature

3.3 공정변수에 따른 경화특성

레이저열처리 후 표면경화부의 평가는 한국산업

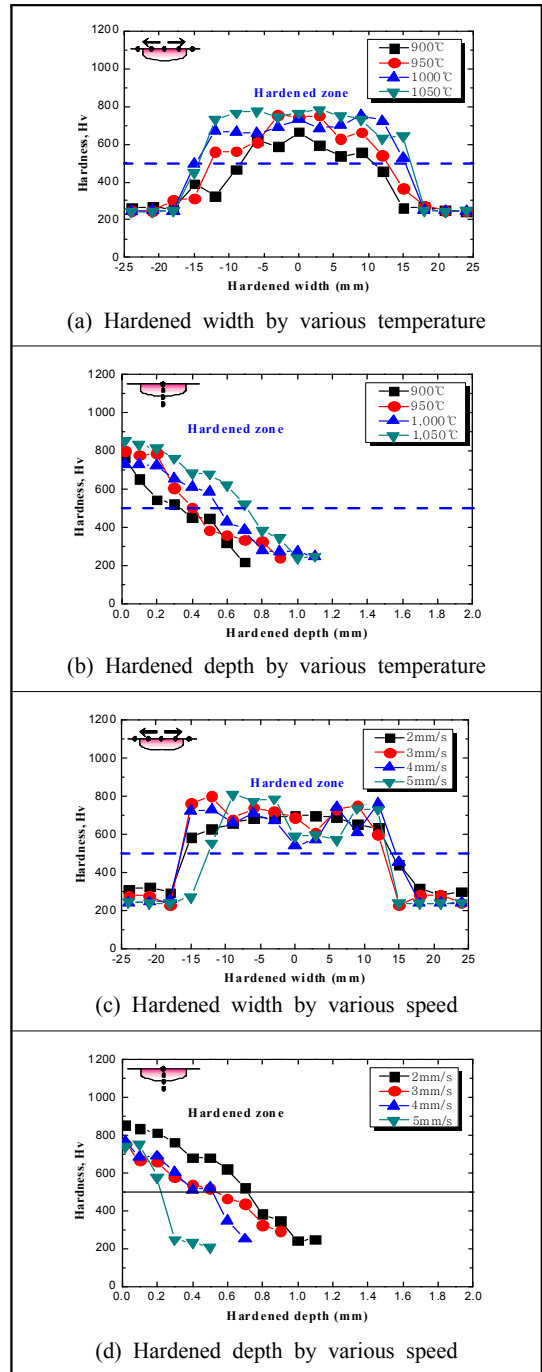


Figure 4: Hardness profile of laser hardened zone

규격 ‘강의 화염 경화 및 고주파 경화층 깊이 측정 방법’(KS D 0027)에서 켈칭 템퍼링한 경화층의 표면에서 경도값 500 Hv를 유효 경화층의 한계 경도로 정의하고 있다. 따라서 본 연구에서 경도값을 토대로 500 Hv 이상의 경도값을 나타내는 부분을 경화부로 정의하였다.

본 연구에 사용된 시험편의 모재경도는 대략 196~230 Hv 이다. Figure 4는 열처리 온도 및 레이저 빔의 이송속도에 따른 경화특성을 나타내었다. 여기서 Figure 4(a), (b)는 레이저 빔의 이송속도 2 mm/sec로 고정하고 열처리 온도에 따른 경화특성이며, Figure 4(c), (d)의 경우 열처리 온도 1,050℃로 고정하고 레이저 빔의 이송속도에 따른 경화특성을 나타내었다.

레이저열처리 후 최대 표면경도는 861 Hv로 관찰되어 모재경도에 비해 약 3.7배 이상 상승한 것으로 관찰되었다. 또한 레이저 빔의 이송속도가 낮을수록 열처리 온도가 증가할수록 시험편 두께방향으로 입열량이 증가하여 오스테나이트로 변태되는 부분도 증가되며, 그 후 자기냉각효과로 인하여 마르텐사이트를 형성하는 부분이 넓어 졌음을 알 수 있다. 따라서 Figure 4(a)에서와 같이 열처리 온도가 낮을수록 경화폭이 감소하고 있음을 알 수 있으며, 경화깊이의 경우 Figure 4(b)에서와 같이 레이저 빔의 이송속도 2 mm/sec일때 열처리 온도 1,050℃에서 0.7 mm 이상 나타났다. 또한 Figure 4(d)에서와 같이 열처리 온도 1,050℃일때 레이저 빔의 이송속도에 따른 경화깊이를 나타낸 것으로 레이저 빔이 이송속도가 낮을수록 경화깊이는 깊게 관찰되었다.

3.4 경화부의 입열량 특성

레이저빔이 시편표면에 조사된 후 급속가열 현상이 진행되면서 시편 내부로 열에너지가 침투하게 된다. 이런 현상을 정량화하기 위하여 레이저 공정변수에 대한 입열량을 계산한 후 경화폭과 경화깊이 관계를 비교하였다. 각각의 공정변수에 대한 입열량 분포를 분석한 후 고찰하였다.

이때 입열량은 아래의 수식에 의해 계산하였다.

$$E = \frac{P}{W_h \times V} (J/cm^2)$$

여기서 E 는 입열량, P 는 레이저 출력 ($1W=1J/sec$), W_h 는 경화 폭 그리고 V 는 레이저 빔의 이송속도이다. Table 2는 열처리 온도 1,050℃에서의 레이저 빔의 이송속도에 따른 레이저 출력, 경화 깊이 그리고 입열량을 나타내었다. Figure 5는 레이저 표면처리 후 입열량의 특성을 나타낸 것으로 레이저 열에너지가 시험편의 표면에 조사된 후 급속히 가열되고 시험편의 내부로 열에너지가 침투하게 된다. 이 현상을 정량화하기 위해 레이저 빔의 이송속도에 따른 입열량의 관계를 비교 분석 하였다. 레이저 열처리 온도 1,050℃로 고정하고 레이저 빔의 이송속도에 따른 입열량을 나타낸 것으로 레이저 빔의 이송속도 2~4 mm/sec에서는 선형적으로 감소하고 있다. 그러나 레이저 빔의 이송속도 5 mm/sec에서 입열량의 감소가 둔화되었다.

Table 2: Heat input by laser beam speed

Speed (mm/sec)	Laser power (W)	Hardened width (mm)	Heat input $E(\times 100 J/cm^2)$
2	2,651	31.77	4.172
3	3,275	29.48	3.703
4	3,820	30.98	3.082
5	3,820	25.75	2.967

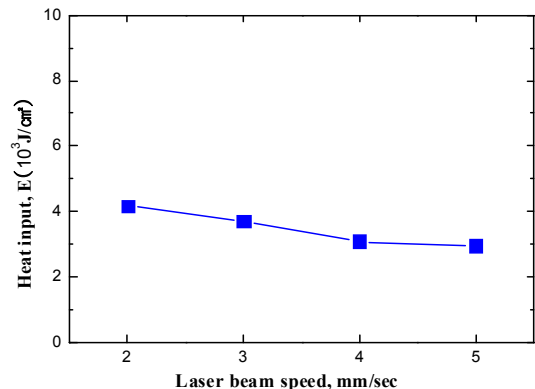


Figure 5: Relationships between heat input and laser beam speed

3.5 미세조직 특성

레이저열처리 온도 및 레이저 빔의 이송속도가 각각 1,050℃, 2 mm/sec의 공정변수에서 표면열처리시 미세조직 특성을 관찰 하였다. Figure 6은 미세조직을 나타낸 것으로 경화부와 모재부로 나누어 관찰하였다. 모재부의 기지조직은 페라이트가 뒤엉키듯 존재하고, 완전한 펄라이트가 페라이트 주위를 둘러싸고 있다.

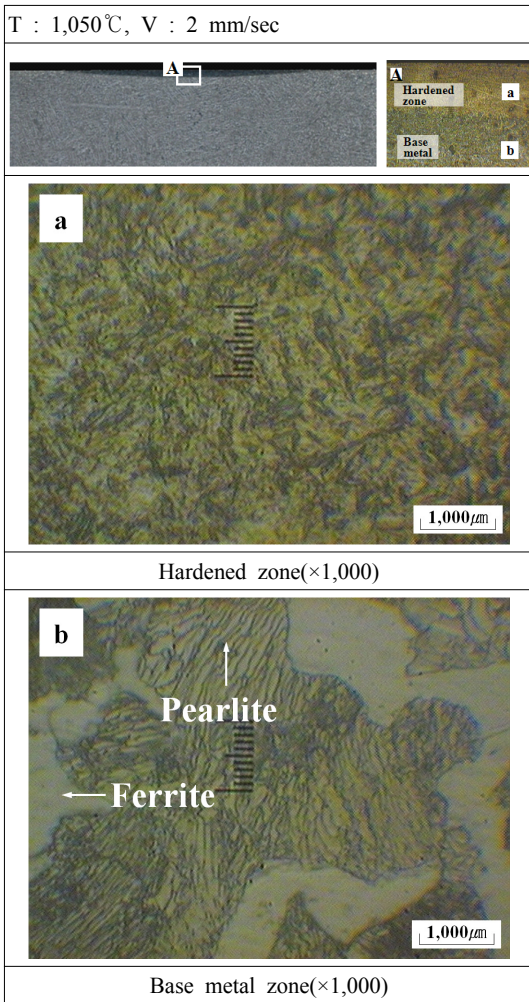


Figure 6: Micro structure of heat treated zone

경화부는 펄라이트의 시멘타이트 탄소가 페라이트로 고용되어 마르텐사이트 조직을 형성하고 있

다. 레이저열처리의 프로세스는 레이저 빔에 의한 표면 경화로 레이저 빔의 조사시 기지조직은 가열된 후 매우 빠르게 자기냉각 과정을 거쳐 조직성장이 극소화되고 마르텐사이트로 빠르게 변태된다. 이로 인하여 재료의 강도를 높이고 내마모성, 내충격 피로강도를 높이게 되어 기계적 성질도 향상된다. 시험에 사용된 소재는 고탄소강으로 열처리능이 우수한 소재로 레이저열처리에 의해 경화부의 침상 마르텐사이트 조직이 잘 형성되어 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 고탄소강 HP1A 소재를 사용하여 레이저열처리 특성을 평가 하였다. 고탄소강 소재에 대한 레이저열처리 특성에 미치는 지배인자 및 열처리 조건에 따른 경화특성에 관한 연구 결과를 다음과 같이 정리하였다.

1. 레이저 열처리에서 가장 중요한 지배적인 공정변수인 열처리 온도 및 레이저 빔의 이송속도의 범위를 선정하기 위해 열처리 온도별 및 레이저 빔의 이송속도별 열처리 후 표면경화특성을 분석한 결과 열처리 온도 1,100℃ 이상에서 표면 부분 용융이 발생하였다. 레이저 빔의 이송속도의 경우 실험조건(2, 3, 4, 5 mm/sec)에서 요구하는 경화특성을 얻었다.

2. 열처리 제어온도에 따른 레이저 출력 특성의 경우 열처리 온도가 높을수록 레이저 출력도 증가하였다. 그러나 열처리 온도 50℃씩 증가에 따른 레이저 출력 증가는 0.08~0.33 kW로 크지 않았다. 또한 레이저 출력의 경우 열처리 중 0.1 kW 이상 출력 변화가 있는 것으로 나타났으며, 이는 약간의 출력변화의 차이에도 표면경화특성에 영향을 줄 수 있을 것으로 판단한다. 따라서 레이저열처리시 온도제어에 의한 열처리가 레이저 출력제어에 비해 유리할 것으로 판단된다.

3. 공정변수에 따른 경화특성 분석 결과 레이저 열처리 온도 900~1,050℃와 레이저 빔의 이송속도 2~5 mm/sec 사이에서 표면용융없이 요구하는 경화특성을 얻을 수 있었으며, 열처리 조건에 따라 경화폭 및 경화 깊이 차이는 있는 것으로 나타났다.

4. 레이저 열에너지가 실험편 내부로 침투하게 되는 현상을 정량화하기 위해 레이저 빔의 이송속도에 따른 입열량의 관계를 분석 하였다. 분석결과 레이저 빔의 이송속도의 증가에 따라 입열량은 선형적으로 감소하였다.

5. 페라이트와 펄라이트로 혼재된 모재를 레이저 열처리 후 경화부는 펄라이트의 시멘타이트 단소가 페라이트로 고용되어 마르텐사이트 조직을 형성하고 있는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업핵심기술개발사업으로 수행된 연구 결과임.

참고문헌

- [1] 한국표준과학연구원, 알기 쉬운 국제단위계 해설, 한국표준과학연구원, 1987.
- [2] K. W. Park, J. B. Lee, Y. H. Han and S. Y. Lee, "A Study on the Residual Stress of AISI4140 Formed during Surface Hardening Treatment by using the CO2 Laser Beam", J. of the Korea for Heat Treatment, vol. 9, no. 4, pp. 289-300, 1996.
- [3] R. Vilar, R. Colaco and A. Almeida, "Laser surface treatment of tool steels", Optical and Quantum Electronics, vol. 27, no. 12, pp. 1273-1289, 1995.
- [4] M. Heitkemper, C. Bohne, A. Pyzalla and A. Fischer, "Fatigue and fracture behaviour of a laser surface heat treated martensitic high-nitrogen tool steel", International Journal of Fatigue, vol. 25, pp. 101-106, 2003.
- [5] T. Hirogaki, H. Nakagawa, M. Hayamizu, Y. Kita and Yoshiaki Kakino, "In-situ heat treatment system for die steels using YAG laser with a machining center", Precision Engineering, vol. 25, pp. 212-217, 2001.
- [6] S. Skvarenina and Y. C. Shin, "Predictive modeling and experimental results for laser hardening of AISI 1536 steel with complex geometric features by a high power diode laser", Surface and Coatings Technology, Vol. 201, pp. 2256-2269, 2006.
- [7] H. T. Hwang, J. D. Kim, H. S. Song, M. K. Song and Y. K. Kim, "Surface treatment in edge position of spheroidal", Korean Journal of Materials Research, vol. 19, no. 9, pp. 457-461, 2009.
- [8] J. D. Kim, H. T. Hwang, S. W. So, Y. K. Kim and B. H. Kim, "Heat treatment characteristics of a press draw mold by using high power diode laser", J. of the Korean Society for Heat Treatment, vol. 22, no. 6, pp. 339-344, 2009.
- [9] J. D. Kim, B. L. Kil and W. J. Kang, "Surface transformation hardening for rod-shaped carbon steels by high power diode laser", The Korean Society of Marine Engineering, vol. 31, no. 8, pp. 961-969, 2007.

저 자 소 개



김종도(金鍾道)

1963년 1월생, 1985년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1993~1997년 일본오사카대학 생산가공공학과 응용고온공학코스(공학석사 및 공학박사), 2003년 1월~현재, 대한용접학회 고에너지연구위원회 위원장, 2004년 1월~한국레이저가공학회 운영이사, 1998년 3월~현재, 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수, 당학회 편집이사, 관심분야 : 레이저용접, 가공현상의 고분해능 계측과 실시간 모니터링



황현태(黃鉉泰)

1972년 2월생, 1999년 경일대학교 기계공학과 졸업, 2001년 영남대학교 기계공학과 기계전공(공학석사), 2007년~현재, 한국해양대학교 기관시스템공학과 박사과정, 관심분야 : 레이저열처리, 레이저-이온질화 복합열처리



소상우(蘇相祐)

1977년 11월생, 2004년 대구가톨릭대학교 자동차공학과 졸업, 2006년 국민대학교 자동차공학과 (공학석사), 2010년~현재, 울산과학기술대학교 기계신소재공학부 박사과정, 관심분야 : 레이저열처리, 가공형상의 변형모드 예측

모니터링