

금형재료용 주철의 다이오드 레이저 표면경화처리에 관한 연구(I) - 금형재료에 따른 표면경화 특성 -

김종도[†] · 송무근¹ · 황현태²

(원고접수일 : 2011년 7월 4일, 원고수정일 : 2011년 8월 9일, 심사완료일 : 2011년 11월 8일)

A Study on the Diode Laser Surface Hardening Treatment of Cast Iron for Die Material(I) - Characteristics of Surface Hardening by Die Materials - Jong-Do Kim[†] · Moo-Keun Song¹ · Hyun-Tae Hwang²

요 약 : 본 연구에서는 거의 모든 기반산업에서 필수적인 생산기술로 사용되고 있는 금형의 기계적 성질을 향상시키기 위해 고출력 다이오드 레이저를 이용하여 두 종류의 금형재료용 주철을 표면경화처리하였다. 우선, 구상흑연 주철인 FCD550 소재에 대하여 열처리 특성을 파악한 후, 편상흑연 주철인 HCl350 소재를 열처리하여 두 소재의 표면경화 특성을 비교하였다. 경화부의 경도는 두 시험편 모두 모재에 비해 3배 이상의 경도 상승을 보였지만, 재료에 포함된 흑연의 함유량 및 형상의 차이에 의한 재료의 열전도도에 따라서 FCD550 소재에 비해 HCl350이 열처리하는데 있어서 더 많은 입력이 요구되었다.

주제어 : 표면경화처리, 다이오드 레이저, 구상 및 편상 흑연주철

Abstract: In this study, two types of die material cast iron was treated for surface hardening by using high power diode laser to improve mechanical properties of die which is using as essential production technology in the parts manufacturing in virtually all the infrastructure industries now. First of all, the heat treatment characteristics of FCD550 material which is spheroidal graphite cast iron, and through the heat treatment of HCl350 material which is flake graphite cast iron, the heat treatment characteristics of the two materials were compared. The hardness of hardened zone increased over 3 times over base material for both specimens, but as for required heat input, HCl350 was higher than FCD550 material depending on the heat conductivity of the materials by the content amount and shape of graphite contained in the material.

Key words: Surface hardening treatment, Diode laser, Spheroidal and flake graphite cast iron

1. 서 론

금형기술은 수송산업 및 전기, 전자 등 주요 산업에서 필수적으로 이용되고 있는 만큼 그 용도는 실로 광범위하고 다양하다. 또한 금형의 정밀도가 제품의 품질 및 생산성에 막대한 영향을 미치고 있으며, 그에 따른 금형의 우수한 기계적 성질이 요구되고 있다. 이러한 기계적 성질을 향상시키기 위

한 방법 중 하나로 금형의 표면경화처리가 행해지고 있다. 기존의 표면처리에는 질화나 침탄처리, 화염 및 고주파 표면처리 등이 적용되어 왔으나 이와 같은 방법들은 금형 형상의 제한 및 열변형 등의 문제점을 수반하고 있다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 표면처리 방법으로써 레이저를 이용한 표면경화 기술이 검토되고 있으며, 일부 산업현장

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

¹ 한국해양대학교 대학원

² (재)울산테크노파크(자동차기술지원단)

에서 이미 적용되고 있다[1-2].

일반적으로 산업계에서 널리 사용되고 있는 레이저는 CO₂ 레이저나 Nd:YAG 레이저 등을 들 수 있다. 하지만 이들 레이저를 이용한 열처리시 가우시안 빔(gaussian beam)을 비초점거리(defocused distance)에서 적용하기 때문에 높은 에너지 밀도에도 불구하고 효율이 떨어지는 경향이 있다. 반면에 특유의 빔 안정성 및 사각형의 빔 프로파일로 인해 상대적으로 넓은 영역의 표면을 균일하게 가열할 수 있는 고풍력 다이오드 레이저는 다른 레이저에 비하여 효율이 높기 때문에 레이저 표면처리시 가장 적합한 열원이라고 할 수 있다[3-7]. 따라서 본 연구에서는 고풍력 다이오드 레이저를 이용하여 프레스 금형의 표면경화처리 적용을 위한 열처리를 실시하였다.

본 논문에서는 금형 재료의 차이에 따른 경화특성을 파악하기 위해 흑연의 분포상태가 다른 두 가지의 재료를 열처리한 후 경화특성을 비교해보았다. 금형재로 사용되는 주철은 일반 금형강과 비교하여 조직내에 흑연을 포함하고 있지만, 기지의 조직은 같기 때문에 기본적으로는 탄소강과 같은 열처리가 가능하다. 탄소강의 열처리에서는 기지내의 탄소가 가열중에 확산하고, 그 후의 냉각에 의해 다양한 조직으로 변화한다. 주철에서도 마찬가지로 같은 양상을 나타내지만, 기지내에 탄화물로 존재하는 탄소 외에 편상 또는 구상으로 존재하는 흑연이 가열, 냉각시에 확산하여 조직에 변화를 미치게 된다. 또한 흑연의 함유량 및 분포상태에 따라 열처리 특성의 차이가 생기게 된다. 따라서 열처리시 재료에 포함된 흑연의 형상 및 함유량에 따른 열처리 영향을 면밀히 검토할 필요가 있다[8-10].

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험재료

일반적으로 금형재료는 높은 인성과 내마모성이 요구되며, 기계 가공성이 양호하고 열처리가 용이한 철강재가 가장 많이 사용되고 있다. 이 중 주철은 넓은 영역의 강도 및 경도를 갖는 우수한 합금으로 내마모성, 내식성이 뛰어나며 주조성이 우수하여 복잡한 형상의 주물 제품을 값싸게 생산할 수

Table 1 Chemical composition of specimen

Element(wt%) Material	C	Si	Mn	P	S	Alloy element
FCD550	3.0 ~3.8	1.8 ~2.6	0.10 ~0.50	~0.04	~0.02	Mg min 0.3, Cu min 0.02
HCI350	2.8 ~3.3	1.6 ~2.25	0.7 ~1.05	~0.12	~0.12	Mo 0.3~0.6 Cr 0.3~0.6

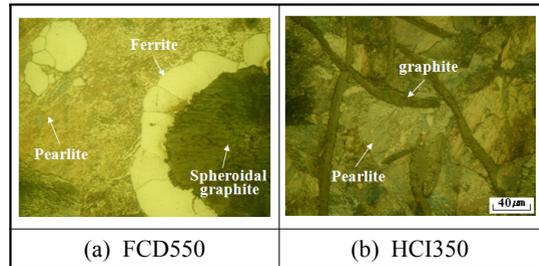


Figure 1: Microstructure of base metal

있어 금형재료로서의 활용 폭이 점차 증가하고 있다.

본 실험에서 사용한 시험편의 재료는 구상흑연 주철인 FCD550 및 편상흑연 주철 HCI350이며, 그 화학조성을 **Table 1**, 모재조직의 현미경 사진을 **Figure 1**에 각각 나타낸다. FCD550 소재는 구상화된 흑연 주위로 페라이트가 감싸는 형상을 하고 있으며, 기지조직으로 펄라이트가 분포되어 있는 펄라이트형 구상흑연 주철이며, HCI350은 흑연이 편상으로 존재하는 펄라이트형 편상흑연 주철이다. 시험편의 크기는 120×90×25 mm³이며, 표면을 연삭처리한 후 실험전에 메탄올로 표면을 탈지하였다.

2.2 실험방법

실험에 사용한 레이저 열처리 장치는 크게 최대 출력 4.0 kW의 다이오드 레이저와 6축 외팔보 로봇으로 구성되어 있다. 다이오드 레이저는 900~1,030 nm의 파장대를 가지며, 빔 품질(beam quality)은 40 mm · rad이다. 열처리 전용의 사각빔 광학계를 로봇에 장착하고, 400 µm 직경의 화이버로 레이저빔을 전송하여 열처리를 실시하였다. 또한 로봇 하부에는 레일이 설치되어 로봇의 좌우 이동을 가능하게 함으로써 대형 금형에서도 적용할 수 있도록 설계되었다.

실험은 **Figure 2**에 나타난 것과 같이 실시하였으

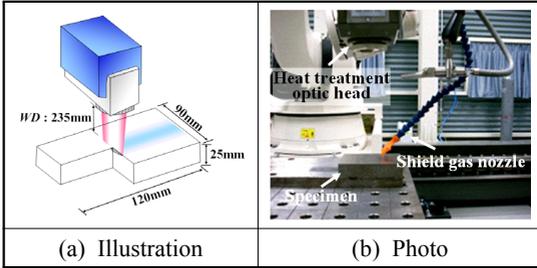


Figure 2: Experimental method for heat treatment of plate position

며, 이때의 집광광학계와 시편과의 거리WD(working distance)는 235 mm이고, 빔 사이즈는 40×7 mm이다. 또한 광학계 헤드 부근에는 340~1,300 °C의 측정범위를 가지는 적외선 온도센서(two color pyrometer)를 부착하여 레이저 열처리시 시험편의 표면온도를 실시간으로 측정할 수 있도록 구성하였다. 레이저빔 조사 중에는 빔 진행방향의 후면 20 mm 떨어진 위치에서 20 l/min 유량의 아르곤(Ar) 가스를 40°각도로 분사하여 시험편 표면을 실드하였다.

본 연구에서는 FCD550 및 HCl350 소재를 이용하여 레이저 출력(P_L) 및 빔의 이송속도(v)에 따른 표면 열처리를 실시하여 공정변수에 따른 경화특성을 파악하고, 재료에 따른 열처리 특성을 비교하였다. 또한 광학계에 부착되어 있는 적외선 온도센서를 이용하여 열처리 동안 두 시험편의 표면온도를 측정 후 레이저 출력에 따른 시험편의 표면온도 변화를 관측하였다. 그리고 측정된 온도를 기준으로 열처리 온도를 변화시키는 온도제어 열처리를 실시하여 경화특성을 파악하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 공정변수에 따른 열처리 특성

FCD550 소재에 대한 열처리 특성을 파악하기 위해 주된 공정변수인 레이저 출력 및 빔의 이송속도를 변화시키면서 표면 열처리를 실시하였다. 레이저 빔의 이송속도를 2~4 mm/sec로 설정하고, 레이저 출력을 2.0 kW에서 4.0 kW까지 0.5 kW 단위로 변화시키면서 열처리를 실시한 결과, 이송속도

가 감소할수록, 그리고 레이저 출력이 증가할수록 경화 폭 및 깊이는 증가하였다. 각 이송속도별 적정 열처리 출력은 2 mm/sec일 때 2.5 kW, 3 mm/sec일 때 3.5 kW, 4 mm/sec에서는 4.0 kW였다. 이 조건을 초과한 출력에서는 표면에 용융이 발생하였으며, 그 미만의 출력에서는 표면에 발색만을 일으키며 열처리가 이루어지지 않는 매우 제한적인 열처리 범위를 나타내었다. 적정 열처리 조건 중 레이저 출력이 어느 정도 안정적이고 경화깊이가 가장 깊은 조건인 이송속도 3 mm/sec, 레이저 출력 3.5 kW를 FCD550 소재의 최적 열처리 조건으로 선정하였으며, 이 조건에서의 경화폭은 27 mm, 경화깊이는 0.9 mm였다.

FCD550의 최적 열처리 조건을 기준으로 HCl350 소재의 열처리를 실시하였다. 빔 이송속도를 3mm/sec로 고정하고 레이저 출력을 변화시키면서 열처리

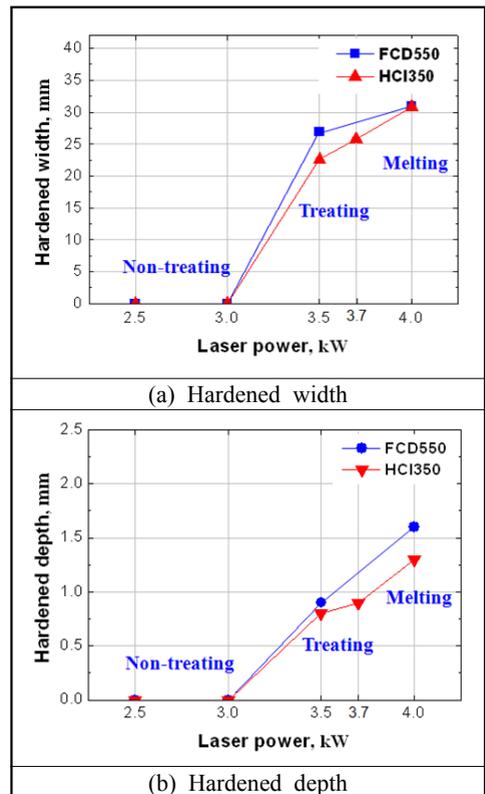


Figure 3: Variation of hardened zone with laser power at beam traveling speed 3 mm/sec

를 실시한 결과, HCl350 소재의 최적 열처리 조건은 FCD550의 열처리 조건보다 다소 높은 레이저 출력 3.7 kW였다. 이 조건에서의 경화폭은 약 26 mm, 경화깊이는 약 0.9 mm로 FCD550 소재의 열처리시와 거의 유사한 경화정도를 보였다. FCD550과 HCl350 소재의 열처리시 이송속도 3 mm/sec에서의 경화 폭 및 깊이의 변화를 Figure 3에 나타낸다.

편상흑연 주철인 HCl350의 열처리 조건이 구상흑연 주철인 FCD550 소재보다 다소 높은 열처리 출력 조건을 나타낸 이유는 각 재료별 열전도성의 차이에 의한 것으로 생각된다. 주철은 흑연의 형상과 분포 상태에 따라서 열전도성에 차이가 생겨, 열전도성이 뛰어난 흑연이 편상으로 존재하게 되면 구상으로 존재하는 것보다 열전달이 빠르게 된다 [10]. 따라서 HCl350 소재가 FCD550 소재보다 열전도가 좋고, 그로인해 HCl350 시험편은 표면에서 재료내로 열이 빠르게 전달되어 FCD550보다 더 빠르게 냉각되고, 시험편의 온도를 열처리 온도까지 높이기 위하여 더 높은 입열이 요구되는 것이다.

3.2 경화부의 경도분포

FCD550 및 HCl350의 경화부 경도는 폭방향 및 깊이방향으로 나누어 측정하였으며, 각 소재의 최적 열처리 조건에서의 경도분포를 Figure 4에 나타낸다.

일반적으로 주철은 흑연을 포함하고 있기 때문에 넓은 구역의 평균경도를 측정할 수 있는 브리넬(Brinell) 경도를 취하지만, 본 연구에서는 경화정도를 세밀하게 파악하기 위해 마이크로 비커스 경도기를 사용하여 경도를 측정하였다. 주철내의 흑연은 매우 연한 조직이기 때문에 경도 측정시 흑연의 영향을 피하기 위한 세심한 주의가 필요했으며, 흑연의 분포 상태 및 크기에 따라 측정값의 변동이 심하였다.

경도분포를 살펴보면 FCD550의 경우에는 모재 경도가 대략 230~280 Hv 정도이며, 경화부는 폭방향으로 최대 930 Hv, 평균 820 Hv의 경도값을 나타내었다. HCl350은 모재가 220~270 Hv, 경화부의 최고 경도는 870 Hv, 평균경도는 780 Hv으로 FCD550

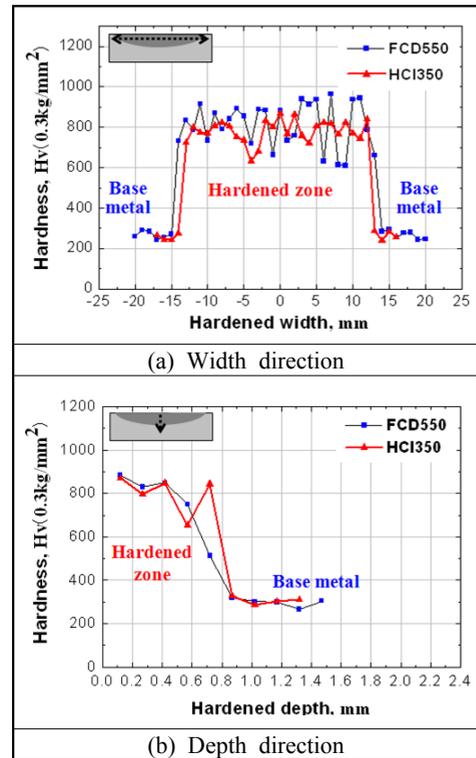


Figure 4: Hardness distribution of FCD550 and HCl350 at optimum condition

소재보다 다소 낮은 경도값을 나타내고 있지만, 두 소재 모두 경화부의 경도가 모재에 비하여 약 3배 정도 상승한 것을 알 수 있다. 깊이방향으로는 경화깊이가 모두 0.8 mm로 두 소재가 거의 유사한 경화정도를 나타내었다.

3.3 표면처리시 조사부의 온도변화 비교

Figure 5와 Figure 6에 FCD550 및 HCl350 소재의 빔의 이송속도 3mm/sec 조건에서 열처리시 온도센서를 통해 측정된 표면 온도의 변화를 각각 나타낸다.

두 그림의 온도변화를 살펴보면, 레이저 조사 후 약 5초부터 레이저 종료시까지 계속적인 입열에 따른 열축적에 의한 표면온도의 상승은 보이지 않는 상태로 전반적으로 최대온도를 일정하게 유지하고 있다. Figure 5의 각 출력별 온도변화를 살펴

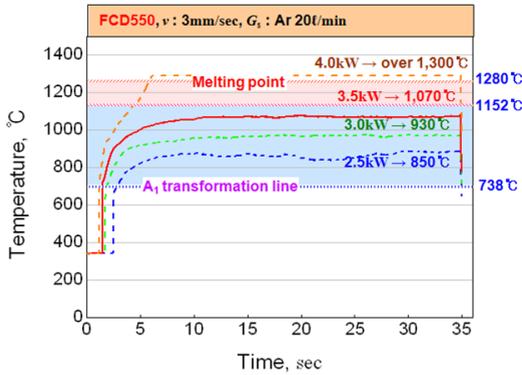


Figure 5: Variation of surface temperature with laser power of FCD550 at 3 mm/sec

보면, 적정 조건인 3.5 kW 미만의 출력에서 A₁변태 선을 모두 넘는 온도까지 상승하였으나 전술과 같이 열처리가 이루어지지 않은 이유는 레이저 열처리 특성에 기인한 급속 열싸이클로 인하여 조직 내의 탄소가 충분히 확산되지 못하여 마르텐사이트를 형성하지 못한 것으로 사료된다. 이와 같은 경향은 Figure 6에서도 나타난다.

FCD550의 등온 최대온도는 약 1,070 °C이며 HCl350은 약 1,020~1,040 °C로, 두 소재의 표면온도 모두 조직내 흑연의 공정반응에 가까운 온도까지 상승하여 금속내의 원자간 이동이 매우 활발히 이루어질 수 있는 상태로 되었다. 따라서 탄소의 활발한 확산으로 인해 충분한 오스테나이트 변태가 일어나고, 레이저 열처리 특성에 기인한 급속 열싸이클로 인해 마르텐사이트가 형성되어 경화가 이루어졌다.

하지만 HCl350의 표면온도는 FCD550의 경우와 비교하여 열처리 조건이 더 높은 출력임에도 불구하고 측정된 온도가 더 낮은 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 앞서 설명한바와 같이 재료의 열전도성에 기인한 것으로, FCD550에 비해 열전도성이 좋은 HCl350의 경우에는 레이저 조사 후 열원이 재료내로 빠르게 전달되기 때문에 표면온도가 낮게 나타나는 것이다. 레이저 조사 후 등온구간까지의 온도상승 경향을 살펴보면 FCD550의 경우는 표면온도가 급격하게 상승하는 반면, HCl350은 온도가 서서히 상승하는 온도변화를 보이고 있는 것

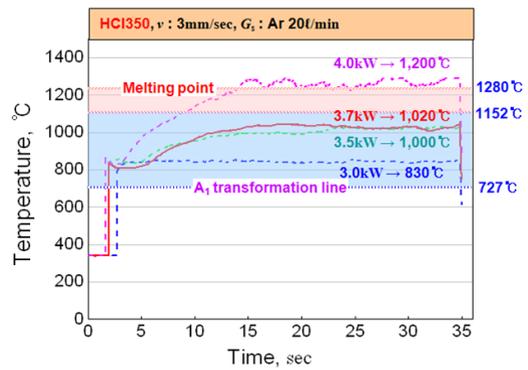


Figure 6: Variation of surface temperature with laser power of HCl350 at 3 mm/sec

도 이러한 이유 때문이다. 이와 같이 재료내에 포함된 흑연의 분포상태에 따라서 열전도성이 확연하게 다르며, 그에 따라 재료의 열처리 특성이 달라지는 경향이 있다.

3.4 온도제어 열처리 특성

본 연구에서 사용한 열처리 장치는 컨트롤러에 열처리 온도를 설정하면 레이저 조사동안 시험편 표면의 온도를 측정하고, 그 온도값을 토대로 레이저 출력을 자동으로 조절하는 온도제어 열처리가 가능하도록 구성되어 있다. 따라서 빔의 이송속도를 3 mm/sec로 고정하고 두 소재의 적정 열처리 조건에서 측정된 표면온도를 기준으로 열처리 온도를 변화시키면서 열처리를 실시하였다. Figure 7에 각 소재의 열처리 온도에 따른 경화 폭 및 깊이의 변화를 나타낸다. 온도가 증가할수록 경화정도는 선형적으로 상승하는 경향을 보이고 있으나, FCD550은 1,150 °C, HCl350은 1,100 °C 이상의 온도에서 표면의 용융이 발생하였다.

표면에 용융이 발생하지 않고 경화정도가 가장 뛰어난 온도에서 측정된 경화 폭 및 깊이는 레이저 출력을 변화시키면서 열처리를 실시한 출력제어 열처리시와 거의 동일한 값을 나타내었다. 또한 이때의 경도를 측정한 결과, 경도분포 역시 비슷한 경향을 나타내어, FCD550의 경우 최적의 열처리 온도는 1,100 °C에서 최고 경도는 900 Hv, 평균 경도는 780 Hv였다. 또한 HCl350 소재는 1,050 °C가 최적의 열처리 온도였으며, 이때의 최고 경도는

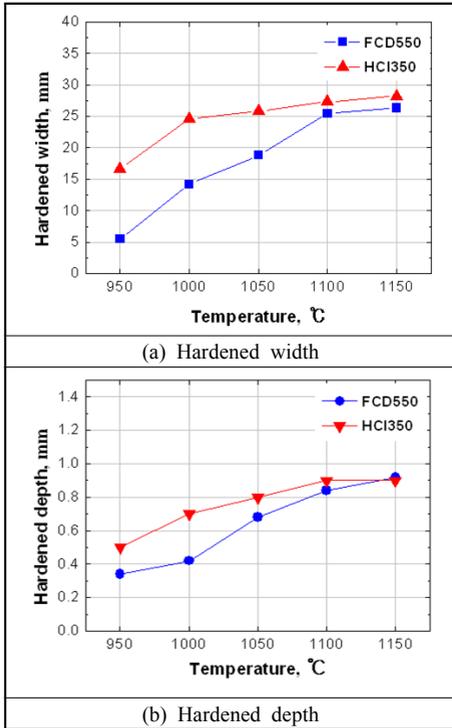


Figure 7: Variation of hardened zone with surface temperature

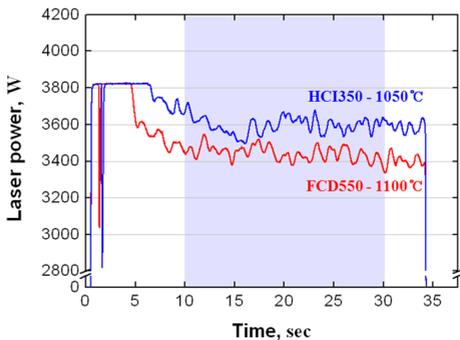


Figure 8 Variation of laser power with surface temperature

890 Hv, 평균 경도는 720 Hv까지 상승하였다. 이와 같이 출력제어와 온도제어시의 최적 열처리 조건에서의 경화특성이 비슷한 경향을 띠고 있는 것을 보아, 두 조건의 재료에 대한 입열량은 큰 차이가 없다고 판단할 수 있었다.

Figure 8은 각 시험편의 온도제어 열처리시 최적

조건에서의 레이저 출력변화를 나타낸 것이다. 레이저 조사 후 표면 온도를 제어 온도까지 올리기 위해 레이저 출력이 급속하게 증가한 후, 온도를 유지하기 위하여 지속적으로 변화하지만 그 차이가 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 열처리가 진행되는 10~30초 사이의 평균 레이저 출력을 측정된 결과, FCD550의 출력은 3.46 kW 였으며, HCl350은 3.65 kW의 출력을 나타내며, 모두 출력제어 열처리시의 적정 열처리 조건과 거의 동일한 수준임을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

고출력 다이오드 레이저를 이용하여 금형재료용 주철인 FCD550과 HCl350의 표면 열처리를 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 공정변수인 레이저 출력 및 빔의 이송속도에 따른 열처리를 실시한 결과, FCD550 및 HCl350 소재의 적정 열처리 조건은 빔의 이송속도가 3 mm/sec일 때, 각각 레이저 출력 3.5 kW와 3.7 kW로, 편상흑연 주철인 HCl350의 열처리 출력이 다소 높게 나타났다.

(2) 최적 조건에서의 열처리시 두 소재의 경화폭 및 깊이는 거의 같은 경향을 나타내었다. 열처리 조건에 차이가 있지만 경화정도가 비슷한 경향을 나타내는 이유는 재료의 열전도성에 차이가 있기 때문으로, 흑연이 구상으로 존재하는 FCD550 소재보다 편상인 HCl350의 열전도도가 높아 열처리시 상대적으로 높은 입열이 요구되었다.

(3) 마이크로 비커스 경도기를 사용하여 열처리부에 대한 경도를 측정된 결과, 경화부의 경도는 두 소재 모두 모재에 비하여 약 3배정도 상승하는 우수한 경화정도를 나타내었다.

(4) 열처리시 온도센서를 통해 시험편 표면의 온도를 측정하고, 적정 열처리 온도를 추정하였다. 추정된 열처리 온도를 기준으로 온도제어 열처리를 실시하여, FCD550은 1,100 °C, HCl350은 1,050 °C의 최적 열처리 온도를 도출하였다. 이때의 경화부 경도 및 레이저 출력을 측정된 결과, 출력제어 열처리시의 적정 열처리 조건과 거의 같은 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부 및 정보통신진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행(NIPA-2011- C1090-1121-0015)되었으며, 또한 국토해양부의 지원으로 수행한 해양에너지 전문인력 양성사업의 연구결과입니다.

참고문헌

- [1] P. Gopalakrishnan. and P. Shankar “Laser Surface Modification of Low Carbon Borided Steels”, Scripta-mater., vol. 44, 2001.
- [2] Kim, T. H., “Surface Modification and Processing of Metals by Laser Beam”, Bull of the Korea Inst. of Met & Mater, vol. 5-4, pp. 361-373, 1992.
- [3] B. Ehlers, H. Herfurth and S. Heinemann “Surface Hardening with High Power Diode Laser”, ICALEO-Section G, pp. 75-84, 1998.
- [4] J.D Kim and W.J Kang, “Study on Characteristics of Laser Surface Transformation Hardening for Rod-shaped Carbon Steel(II)”, Journal of the Korean Welding and Joining Society vol. 25, pp. 85-91, 2007.
- [5] I.R. Pashby, S. Barnes and B.G. Bryden “Surface Hardening of Steel Using a High Power Diode Laser”, Journal of Materials Processing Technology vol. 139, pp. 585-588, 2003.
- [6] Lin Li “The Advances and Characteristics of High Power Diode Laser Materials Processing”, Optics and Laser in Engineering vol. 34, pp. 231-253, 2000.
- [7] E. Kennedy, G. Byrne and D.N. Collins “A review of the use of high power diode lasers in surface hardening”, Journal of Materials Processing Technology 155-156, pp. 1855-1860, 2004.
- [8] M. Gagne, The Sorelmetal Book of Ductile Iron, Rio Tinto Iron & Titanium Inc., 2004.
- [9] W. F. Smith, Structure and Properties of Engineering Alloys, McGraw-Hill Inc., pp. 353, 1993.

- [10] D. Holmgren, A. Dioszegi, I.L. Svensson “Effects of Nodularity on Thermal Conductivity of Cast Iron”, International Journal of Cast metals Research, vol. 20, no. 1, 2007.

저 자 소 개



김종도(金鍾道)

1985년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1993~1997년 일본오사카대학 생산 가공공학과 응용고온공학코스(공학석사 및 공학박사), 2009년~현재 대한기계학회 총무이사, 2011년 대한용접·접합학회 총무이사, 한국레이저가공학회 학술이사, 1998년~현재, 한국해양대학교 기관공학부 교수, 당학회 연구이사, 관심분야 : 레이저용접 결합의 규명과 억제법, 레이저 하이브리드 가공법, 가공현상 규명과 실시간 모니터링



송무근(宋武根)

2007년 단국대학교 전자공학과 졸업, 2010년 한국해양대학교 기관시스템공학과(공학석사), 2011년~현재 한국해양대학교 기관시스템공학과 박사과정, 관심분야 : 레이저 열처리, 레이저-아크 하이브리드 용접



황현태(黃鉉泰)

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