

금형재료용 주철의 다이오드 레이저 표면경화처리에 관한 연구(Ⅱ) - 표면경화의 적용 부위에 따른 열처리 특성의 차이 -

김종도[†] · 송무근¹ · 황현태²

(원고접수일 : 2011년 7월 4일, 원고수정일 : 2011년 9월 5일, 심사완료일 : 2011년 11월 8일)

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

요 약 : 레이저 표면경화처리는 고밀도 에너지 열원에 의해 레이저 조사부위만 급속 가열한 후 표면의 열이 내부로 전도되어 급속히 자기냉각 됨으로써 표면을 경화시키는 방법이다. 이 표면처리 방법은 열처리에 의한 열변형이 거의 없고, 표면경화처리 이후 다른 공정을 수반하지 않는다. 또한 국부적인 가공이 가능하기 때문에 복잡한 형상을 가지는 금형에는 적합한 표면처리 방법이다.

본 연구에서는 열처리에 적합한 빔 프로파일을 가진 고출력 다이오드 레이저를 이용하여 금형재료용 주철의 표면처리를 실시하였다. 프레스 금형 공정에 따른 금형의 형상이 다르기 때문에 적용부위에 따라 시험편을 평면과 모서리부로 나누어 열처리를 실시하였다. 이때 모서리부의 열처리는 광학헤드를 10° 기울인 상태에서 진행하였다. 그 결과, 모서리부의 열처리는 평면부와 비교하여 형상에 따른 열전달 루트가 제한되므로, 입열이 집중되기 쉬워 평면 열처리보다 빠른 이송속도에서 경화가 이루어졌다.

주제어 : 레이저 표면경화, 고밀도 에너지, 자기냉각, 고출력 다이오드 레이저

Abstract: Laser surface hardening process is the method of hardening surface by inducing rapid self quenching of laser injected area through transfer of surface heat to inside after rapid heating of laser injected area only by high density energy heat source. This surface treatment method does not involve virtually any thermal deformation by heat treatment nor accompanies any other process after surface hardening treatment. In addition, allowing local machining, this method is a surface treatment method suitable for die with complicated shape.

In this study, die material cast iron was surface-treated by using high power diode laser with beam profile suitable for heat treatment. Since the shapes of die differ by press die process, specimens were heat-treated separately on plane and corner depending on the applied parts. At this time, corner heat treatment was done with optic head inclined at 10°. As a result, corner heat treatment easily involves concentration of heat input due to limitation of heat transfer route by the shapes compared with plane part, so the treatment accomplished hardening at faster conveying speed than plane heat treatment.

Key words: Laser surface hardening, High density energy, Self quenching, High power diode laser

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

1 한국해양대학교 대학원

2 (재)울산테크노파크(자동차기술지원단)

1. 서 론

금형은 현재 다양한 제품의 기본 형태 및 최종 형태를 성형하는 역할을 담당하기 때문에 제품의 형상 및 품질에 중추적인 역할을 하고 있다. 금형의 종류로는 직선 왕복운동을 하는 프레스 기계에 금형을 설치하여 제품을 성형하는 프레스금형, 고분자 재료를 사용하여 성형품을 만드는 사출금형, 공작물에 충격을 가하여 원하는 형상으로 가공하는 단조금형, 그 외에 주조금형, 요업금형 등이 있기 때문에 금형 기술은 다양한 분야에서 사용되고 있다. 하지만 금형공정 중 발생하는 금형의 마모나 마멸에 의해 제품의 품질을 저하시킬 우려가 있기 때문에 금형의 내마모성이 요구되고 있으며, 그로 인해 금형의 내마모성 및 수명을 향상시키기 위한 금형의 표면처리가 행해지고 있다.

본 연구에서는 금형의 모서리부에 표면경화처리를 적용하기 위하여 시험편의 모서리부를 국부적 가공이 가능한 고출력 다이오드 레이저를 이용하여 표면 열처리를 실시하였다[1-4]. 금형 공정은 전단가공, 굽힘가공, 드로잉가공, 성형가공, 압축가공 등과 같이 여러 가공공정으로 구분되어 있기 때문에 각각의 공정에 사용되는 금형의 재료 및 형상이 다르고, 그에 따라 각 공정에 적합한 열처리 특성을 고려할 필요가 있다. 특히 전단가공 공정은 재료의 파단강도 이상의 압력을 가하여 제품을 잘라내는 공정이기 때문에, 그 특성상 제품을 성형하는 도중에 금형의 모서리 부분의 마모가 가장 심하여 모서리부의 내마모성 향상을 위한 표면경화처리가 요구되고 있다[5,6].

앞선 제1보의 논문[7]에서는 금형 재료를 달리하여 열처리를 실시하여 그 경화특성을 비교하였다면, 이번 연구에서는 금형 공정에 따른 열처리 부위에 차이를 두기 위해 시험편의 모서리부 열처리를 실시하였으며, 그 경화특성을 제시하고자 하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험재료

본 실험에는 펄라이트형 구상흑연 주철인 HD700 소재를 사용하였으며, 그 화학조성을 Table 1에 나타낸다. 금형은 형상이 복잡하고 다양하기 때문에 주조성 및 절삭성이 좋은 주철이 금형소재로 사용

Table 1 Chemical composition of specimen

Element(wt%) Material	C	Si	Mn	P	S	Alloy element
HD700	3.3 ~3.7	1.6 ~2.5	~0.6	~0.04	~0.02	Mg min 0.3, Cu 0.6~1.1, Mo 0.35~0.45, Ni 0.6~1.0

되고 있다. 특히 구상흑연 주철은 Mg를 첨가함으로써 구상의 흑연이 정출되어 편상흑연주철에 비해 강도가 우수하다. 보통의 주철은 편상의 흑연조직을 가지기 때문에 응력을 받을 때 흑연을 따라 균열이 발생하기 쉽고 취성이 있으며 강도가 작은 결점이 있지만, 구상흑연주철은 재료내의 흑연이 구상으로 존재하므로 흑연에서의 균열 생성이 어려워 강도가 우수하고 연성도 갖게 되기 때문에 저강도와 취성을 동시에 극복한 우수한 주철재료로 다양한 용도를 갖고 있다[8-10].

2.2 실험방법

실험에 사용한 레이저는 최대출력 4.0 kW의 다이오드 레이저이며, 열처리용 광학계를 로봇에 장착하여 열처리를 실시하였다. 또한 광학계 부근에는 적외선 온도센서가 부착되어 열처리시 시험편 표면의 온도를 측정하도록 하였다. 시험편의 크기는 90×40×25 mm³이며, 실험은 Figure 1과 같이 시험편의 모서리부 열처리를 위해 빔 사이즈가 15×15 mm인 광학헤드를 시험편의 수직방향에서 기울인 상태로 열처리를 진행하였고, 이때 광학헤드에서 모서리부까지의 거리는 235 mm였다. 레이저 조사시 실드가스는 아르곤 가스(20 ℓ/min)로써, 진행방향의 후면 20 mm 지점에서 40°각도로 분사하여 시험편 표면을 실드하였다.

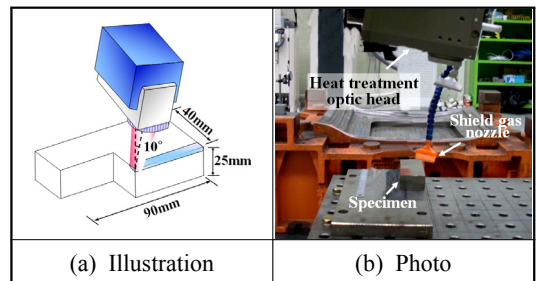


Figure 1: Experimental method for edge position heat treatment

실험은 시험편의 모서리부에 대하여 기본 공정 변수인 레이저 출력 및 빔의 이송속도에 따른 열처리 특성을 파악하였으며, 또한 레이저빔의 조사각도를 달리하여 적정 조건을 도출하였다. 본 연구에서는 모서리부 열처리를 통해 얻은 HD700 소재의 경화특성을 제 1보의 논문에서 이미 파악된 FCD550 소재의 평면 열처리 특성과 비교하여 레이저 열처리 적용부위에 따른 경화특성의 차이를 조사하고자 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 공정변수에 따른 모서리부의 경화특성

레이저 출력을 2~4 kW까지 0.5 kW단위로 변화시키고, 레이저 빔의 이송속도를 6~14 mm/sec까지 2 mm/sec 간격으로 설정하면서 HD700 소재의 모서리부 표면 열처리를 실시하였다. 이때의 레이저 조사각도는 열처리용 광학헤드를 시험편의 수직방향에서 10°기울인 상태이다. Figure 2에 각 출력 및 속도에 따른 경화 길이(L_h) 및 깊이(D_h)의 변화를 나타낸다.

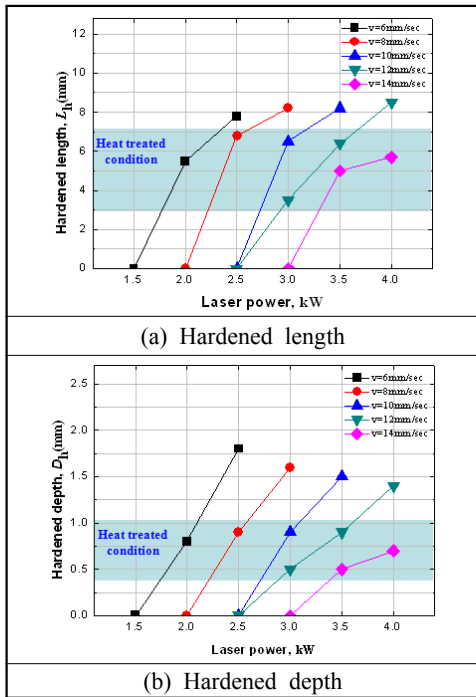


Figure 2: Variation of hardened zone with laser power

레이저 출력이 증가할수록, 그리고 빔의 이송속도가 감소할수록 표면경화정도는 증가하는 경향을 나타내고 있다. 하지만 모서리 열처리 역시 평면부 열처리와 마찬가지로 적정 열처리 조건 미만의 출력에서는 표면에 발색만을 나타내었으며, 초과한 출력에서는 표면에 용융이 발생하는 제한적인 열처리 범위를 가졌다. 실험 결과, 모서리부 열처리 시 최적 조건은 실제 금형의 적용을 고려하여 빔의 이송속도가 어느 정도 빠르고 레이저 출력이 안정적으로 발진되는 조건인 빔의 이송속도 10 mm/sec 일때, 레이저 출력 3.0 kW로 선정하였으며, 이때의 경화길이는 약 6.5 mm, 경화깊이는 약 0.8 mm이었다. Figure 3에 HD700 소재의 열처리시 이송속도 10 mm/sec 조건에서의 표면 및 단면사진을 나타내었다.

모서리부의 최적 열처리 조건은 FCD550의 평면부 열처리 조건[7]인 3.5 kW, 3 mm/sec에 비해 레이저 출력이 3.0 kW로 감소함에도 불구하고 현저하게 빠른 이송속도에서 열처리가 이루어졌다. 이는 평면의 경우에는 표면에 열이 가해지면 열이 재료 내의 모든 방향으로 전달되지만, 모서리의 경우에는 평면에 비하여 상대적으로 대기와 맞닿는 부분

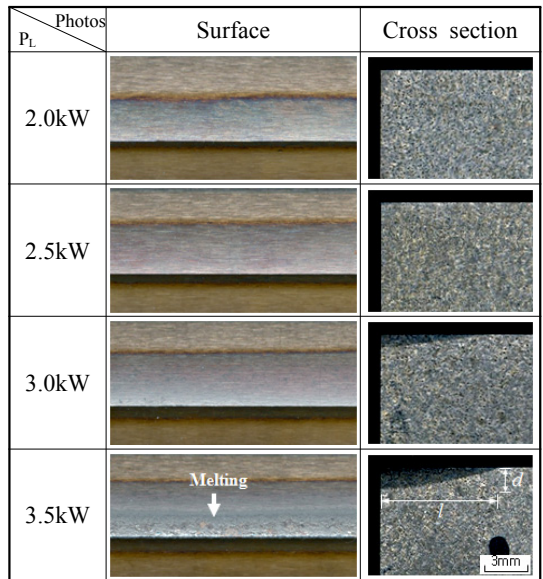


Figure 3: Surface and cross section of hardened specimen at v=10 mm/sec

의 면적이 좁을 뿐만 아니라 열이 한쪽 면의 방향으로만 전달되어 입열이 집중되기 때문이다. 따라서 표면경화에 필요한 입열을 적게 제어하기 위해 빔의 이송속도가 증가한 것이다.

3.2 레이저 조사각도에 따른 경화특성

모서리부 열처리에 있어서 레이저 조사각도는 경화길이 및 경화깊이를 결정하는데 큰 영향을 미친다. HD700 소재의 최적 조건을 선정 후 금형 공정에 적합한 열처리 조건을 선정하기 위해 모서리부의 레이저 조사 각도를 달리하여 열처리를 실시하였다. 레이저 조사 각도를 5~30°까지 5°단위로 각도를 변화시키면서 열처리를 실시한 결과를 Figure 4에 나타낸다.

경화길이의 변화를 살펴보면 헤드 각도가 증가할수록 경화길이는 선형적으로 감소하고 있는데, 이는 조사각도가 커질수록 빔의 기울기가 커져 시험편에 닿는 빔의 면적은 커지지만 모서리부에서

멀어질수록 비조점거리가 증가하여 레이저 파워밀도가 감소함으로써 열처리를 하기 위한 영역에 도달하지 못하기 때문이다. 반면에 깊이방향에 대해서 각도가 증가할수록 경화깊이가 증가하는 이유는, 기울기가 커짐에 따라서 옆면에 닿는 빔의 면적이 커지는 이유도 있지만, 시험편의 모서리부에 레이저의 파워밀도가 집중되어 입열이 증가하면서 경화 깊이가 깊어지기 때문이다.

한편 조사각도가 25°이상에서는 모서리부 표면에 약간의 용융이 발생하였는데, 이러한 원인은 각도가 증가하면서 모서리부에 파워밀도가 집중되고, 또한 시험편 내부로 열이 전달되는 방향이 점차 국한되어 모서리부에 입열이 집중되기 때문이다.

따라서 상기의 조건들과 전단가공 공정을 고려하여 경화 길이 및 깊이를 생각해보았을 때, 레이저 조사각도가 10°~15°사이의 조건이 적합하다고 판단되며, 본 연구에서는 모서리 열처리시 레이저 조사각도를 10°인 상태가 가장 최적 조건이라고 판단하였다.

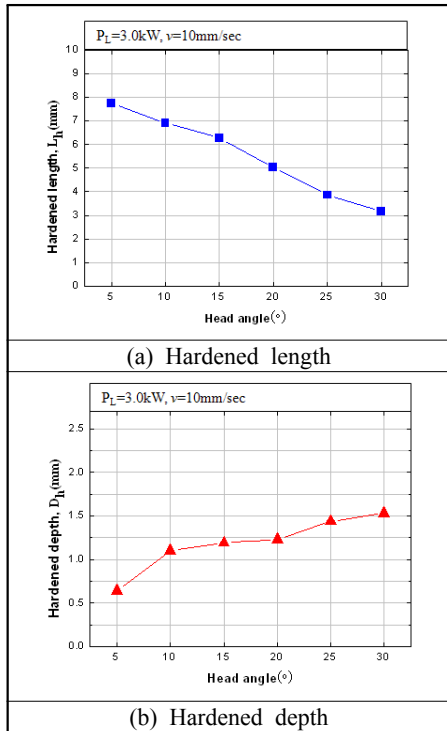


Figure 4: Variation of hardened zone with laser injection angle on edge position

3.3 열처리부의 표면온도 변화

모서리부에 대한 열처리를 실시하는 동안 적외선 온도센서를 이용하여 시험편의 표면온도를 측정하였으며, HD700 소재에 대하여 모서리부 최적 열처리 조건인 3.0 kW, 10 mm/sec에서의 표면온도 변화를 Figure 5에 나타낸다. 그리고 평면부의 열처리시 온도변화와 비교하기 위하여 제1보에서 측정된 FCD550 소재의 최적 열처리 조건에서의 온도

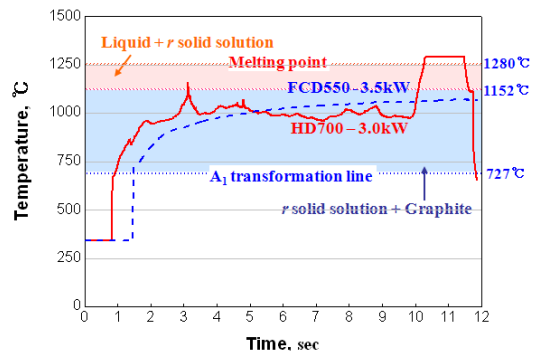


Figure 5: Variation of surface temperature

변화를 점선으로 나타내었다.

HD700 소재는 레이저 조사 후 2초 이내에 표면 온도가 등온구간까지 급격히 상승하였는데, 이러한 온도 상승은 평면의 경우와 비교하여 매우 빠른 변화로, 앞서 설명한 바와 같이 모서리부에서는 입열이 집중되기 때문이다. 또한 평면 열처리시의 온도 변화에 비해 등온구간에서의 온도편차가 약간 크게 나타나는데, 이는 시험편의 모서리 끝단에 잔존하는 버(bur)의 영향으로, 표면 열처리시 경화특성에는 큰 영향이 없지만 시험 전 버를 제거하여 온도편차를 줄이는데 주의를 기울일 필요가 있다.

표면온도를 살펴보면, 등온구간의 온도가 약 1,000 °C 정도로, 평면 열처리시 측정된 표면온도 1,070 °C에 비하여 낮은 온도에서 열처리가 이루어짐을 알 수 있다. 이러한 이유는 모서리부 열처리 조건이 평면에 비하여 매우 빠른 이송속도인 점을 미루어볼 때 역시 모서리부의 형상에 따른 열전달의 영향에 의한 것으로 생각된다.

3.4 경화부의 경도분포

HD700 소재의 모서리부 열처리시 경화부의 경도는 Figure 6와 같이 모서리에서 길이방향과 깊이 방향으로 나누어 측정하였으며, 최적 열처리 조건에서의 경도분포를 Figure 7에 나타낸다. 길이방향으로 최대 경도는 900 Hv, 평균 경도 800 Hv로 모재 경도 240~280 Hv에 비해 약 3배 정도 상승하

였으며, 깊이방향으로 0.8 mm까지 경화되면서 표면경화처리가 잘 이루어졌음을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 한국산업규격 ‘강의 화염 경화 및 고주파 경화 경화층 깊이 측정방법’(KS D 0027)에서 정의하는 유효 경화층의 한계 경도를 토대로 500 Hv 이상의 영역을 경화부로 정의하였으며, 이를 기준으로 경화부와 모재를 구분하였는데, 경도 측정의 길이방향으로 약 5.5 mm 정도에서부터 경도가 완만하게 감소하는 분포를 이루면서 경화부와 모재의 중간 경도값을 나타내는 열영향부(HAZ, heat affected zone)가 형성되었다. 이러한 열영향부의 형성은 모서리부의 레이저 조사시에 기울어진 빔의 영향으로, 모서리에서부터 멀어질수록 비초점 거리가 증가하기 때문이다. 즉, 빔이 기울어진 상태로 조사되면 모서리부를 제외한 부분은 비초점거리로 작용하여 파워밀도가 떨어지기 때문에 모서리에서 멀어질수록 레이저 빔의 조사 영역

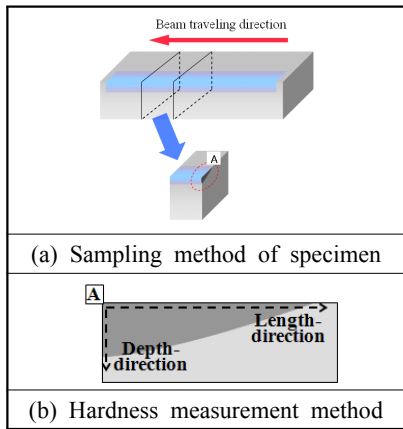


Figure 6: Hardness measurement method of edge position

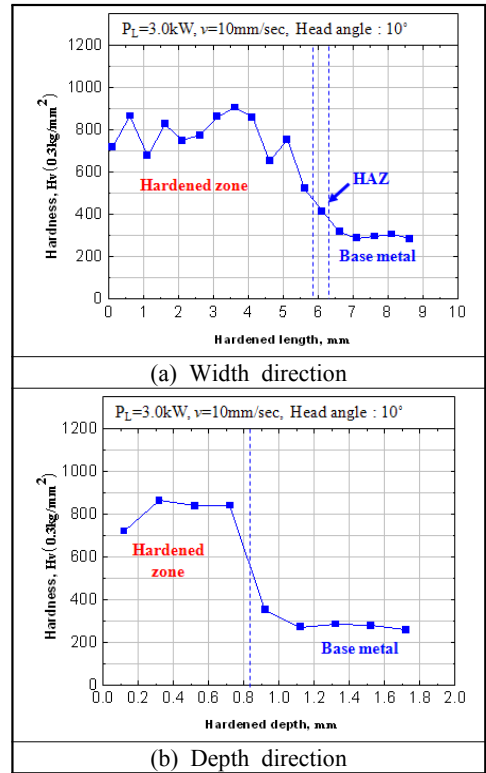


Figure 7: Hardness distribution of HD700 at optimum condition

에 들어온다고 하더라도 완전 경화되지 못하고 경도가 다소 감소한 열영향부 구간이 나타나는 것이다. 이 구간이 모서리에서부터 5.5~6.5 mm 정도 떨어진 구간이며, 그 이후의 구간에서는 표면에 발색만을 일으키며 열처리가 이루어지지 않았다.

하지만 깊이방향으로는 열영향부가 형성되지 않았는데, 이는 광학헤드의 기울기가 10° 기울어져 시험편의 윗면보다는 옆면에서 모서리부와외의 비조점 거리의 차이가 크게 나타나게 되고, 이 때문에 옆면에서의 직접적인 레이저 조사에 의한 입열보다는 윗면에서 전달된 열에 의해 경화가 이루어져 비조점에 의한 열영향부의 형성이 발견되지 않았다고 생각된다.

4. 결 론

고출력 다이오드 레이저를 이용하여 광학헤드를 10° 기울인 상태에서 HD700 소재의 모서리부 열처리를 실시한 후, FCD550의 평면부 열처리와 그 경화특성을 비교한 결과, 다음과 같은 결론은 얻을 수 있었다.

(1) 공정변수에 따른 열처리 실험을 실시한 결과, HD700 소재의 모서리부 최적 열처리 조건은 레이저 출력 3.0 kW, 빔의 이송속도 10 mm/sec이며, 이 조건은 평면 열처리와 비교하여 출력이 낮음에도 불구하고 현저하게 빠른 속도이다.

(2) HD700과 FCD550의 최적 조건에서의 열처리시 측정된 표면온도는 각각 1,000 °C와 1,070 °C로, 평면 열처리 온도보다 모서리부의 열처리 온도가 저하하였다. 이러한 이유는 모서리부 열처리시 한정적인 열전달로 인하여 평면부 열처리보다 적은 입열이 필요하기 때문이다.

(3) 경화부의 경도분포는 모서리에서 길이방향과 깊이방향으로 나누어 측정하였으며, 길이방향으로 최고 경도 900 Hv, 평균경도 800 Hv로 모재에 비해 3배정도 경도가 상승하였다. 하지만 길이방향의 경도분포에서 경화부와 모재사이에 중간 경도값을 가지는 열영향부가 발견되었다.

후 기

본 연구는 지식경제부 및 정보통신진흥원의 대

학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행 (NIPA-2011- C1090-1121-0015)되었으며, 또한 국토해양부의 지원으로 수행한 해양에너지 전문인력 양성사업의 연구결과입니다.

참고문헌

- [1] 丸尾 大, 宮本 勇, 石出 孝, 荒田吉明, “レーザ焼入れの研究”, 容接學會誌 第50卷, 第2号, 82-88, 1981.
- [2] 柴田公博, “レーザ焼入れの實際”, 容接學會誌 第64卷, 第3号, pp. 10-13, 1995.
- [3] Ole A. sandven, “Laser surface hardening”, ASM Handbook, vol. 4, pp. 286-295, 1991.
- [4] T. L. Chen, Y. H. Guan, H. G. Wang and J. T. Zhang, “A study on austenite transformation during laser heating”, Journal of Material Processing Technology vol. 63, pp. 546-549, 1997.
- [5] 김종덕, “유럽 선진 금형기술의 개발과 동향”, 기술정보 기계기술, vol. 30, 통권 349호, pp. 178-181, 2003.
- [6] 홍영환, 금형열처리, 기전연구소, 2007.
- [7] J. D. Kim, M. K. Song and H. T. Hwang, “A study on the diode laser surface hardening treatment of cast iron for die material(I)”, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol.35, no. 8, pp. 1041-1047, 2011.
- [8] 김수영, 홍종휘, 강춘식, 라영용 공저, 주철공학, 보성문화사, 1992.
- [9] M. Gagne, The Sorelmetal Book of Ductile Iron, Rio Tinto Iron & Titanium Inc., 2004.
- [10] Jacques Lacaze, Aline Boudot, Valerie Gerval, Djar Oquab and Henrique Santos, “The role of manganese and copper in the eutectoid trasformation of spheroidal graphite cast iron”, Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 28A, pp. 2015-2025, 1997.

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 표면처리, 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