

금형재료용 주철의 레이저 표면경화처리시 재료에 따른 열처리 특성[§]

김종도*† · 송무근** · 황현태***

* 한국해양대학교 기관공학부, ** 한국해양대학교 대학원, *** 자동차부품혁신센터

Characteristics of Heat Treatment on Different Materials during Laser Surface Hardening of Cast Iron for Die

Jong Do Kim*†, Moo Keun Song** and Hyun Tae Hwang***

* Division of Marine Engineering, Korea Maritime Univ.,

** Graduate School, Korea Maritime Univ.,

*** Automotive Parts Innovation Center

(Received July 4, 2011 ; Revised August 26, 2011 ; Accepted September 2, 2011)

Key Words: Surface Hardening Treatment(표면경화처리), Wear Resistance(내마모성), Spheroidal and Flake Graphite Cast Iron(구상 및 편상흑연 주철), Hardness(경도)

초록: 자동차 차체를 제작하는 프레스 금형의 가공공정 중 제품의 형태를 완성하는 드로잉 공정 및 불필요한 부분을 절단하는 트리밍 공정은 그 공정의 특성상 금형의 마모가 심하기 때문에 금형의 내마모성을 향상시키기 위한 표면경화처리가 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 프레스 금형에 레이저 표면처리기술을 적용하기 위한 실험을 실시하였다. 드로잉 공정 및 트리밍 공정에 적합한 표면경화처리를 위해 다이오드 레이저를 이용하여 시험편의 평면부 및 모서리부를 열처리하였으며, 각각의 적정 열처리 조건을 도출하였다. 또한 시험편의 재료에 따른 열처리 특성을 비교하기 위해 구상흑연 및 편상흑연 주철을 사용하여 실험을 진행하였다. 실험 결과, 재료에 따른 열처리 특성에 차이가 있다는 것을 확인하였으며, 적정 열처리된 조건에서의 경화부는 모재에 비하여 약 3배 정도의 경도상승을 나타내었다.

Abstract: Surface hardening treatment is required to improve the wear-resistance of press die because severe abrasion of die occurs during the drawing process in which the forming of the automotive body is completed and during the trimming process in which the unnecessary parts are cut. In this study, experiments on the laser surface treatment of press die are performed. Specimens are heat-treated separately at certain plate and edge position by using a diode laser to carry out suitable surface hardening treatment to reduce the wear during the drawing and the trimming processes, and the proper conditions for heat treatment are found. Spheroidal and flake graphite cast iron specimens are used, and the heat treatment characteristics of the two materials are compared. From the results of the study, it is confirmed that the heat treatment characteristics differed depending on the materials.

1. 서론

프레스 금형을 사용하여 자동차 차체를 성형하는 가공공정은 박판소재를 원하는 형상으로 제작하는 공정으로써, 보통 드로잉, 트리밍, 플랜징 및 캠/플랜징 공정을 거쳐 제품을 생산한다. 금형공정이 이와 같이 여러 공정으로 구분되어 있기

때문에 사용되는 금형의 형상이 다양하고 형상 또한 복잡하다. 따라서 프레스 금형을 제작하는데 있어서 구조성 및 절삭성이 좋은 주철이 금형재료로 현재 많이 사용되고 있다. 또한 자동차 차체를 제작하는 과정에서 제품의 생산성 및 품질 향상을 위해 금형의 우수한 기계적 성질이 요구되고 있으며, 이를 위해 금형의 표면 열처리가 행해지고 있다.

일반적으로 금형재료용 주철의 열처리는 탄소강과 같은 열처리가 가능하지만, 기지내에서 탄

§ 이 논문은 2011년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계 학술대회(2011. 6.30.-7.1., 라마다프라자제주호텔) 발표논문임

† Corresponding Author, jdkim@hhu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

화물로 존재하는 탄소 외에 편상 또는 구상으로 존재하는 흑연이 가열·냉각시에 조직에 변화를 미치게 된다. 또한 흑연의 함유량 및 분포 상태에 따라서 열처리 특성에 차이가 생기게 된다⁽¹⁻⁴⁾.

본 연구에서는 프레스 금형의 내마모성을 향상시켜 금형의 수명을 연장시키기 위해 주철을 열처리하는데 있어서 레이저 표면경화처리 기술을 사용하였다. 레이저를 이용한 표면경화처리는 고밀도 에너지 열원에 의해 레이저 조사 부위만 급속 가열하여 표면층을 오스테나이트 온도 구역으로 가열하고, 조사 후 표면의 열이 내부로 전도되어 급속히 자기냉각(self-quenching) 됨으로써 표면에 마르텐사이트를 형성시키는 방법이다. 이 방법은 열변형이 거의 없고 다른 냉각공정 및 후처리 공정을 수반하지 않으며, 국부적인 가공이 가능하기 때문에⁽⁵⁻¹⁰⁾ 금형의 열처리에 적합한 방법이다. 레이저는 다른 레이저에 비하여 레이저 표면처리시 높은 효율로 인해 가장 적합한 열원이라고 할 수 있는 고출력 다이오드 레이저⁽⁷⁻¹⁰⁾를 이용하였다. 프레스 금형 공정은 앞서 서술한 바와 같이 여러 공정으로 나뉘어 있기 때문에 공정에 따른 금형의 재료 및 형상이 다르다. 특히 드로잉 공정은 전체적인 평면부의 열처리가, 트리밍 공정은 제품을 절단하기 위한 모서리부의 열처리가 중요시되기 때문에 각 공정에 적합한 표면경화처리를 실시하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험재료

본 실험에서 사용한 시험편은 총 4종류의 주철이며, 이들 소재의 화학적 조성을 **Table 1**에 나타내었다. FCD550 소재는 구상화된 흑연 주위에 페라이트가 감싸고 있고 기지조직이 펄라이트인 페라이트형 구상흑연 주철이며, HCl350은 흑연이 편상으로 분포되어 있는 편상흑연 주철로, 평면부 열처리 실험에 두 소재를 사용하였다. 시험편의 모서리부 실험에는 HD700 소재와 FC300 소재

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
HCl350	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
HD700	3.3 ~3.7	1.6 ~2.5	~0.6	-0.04	~0.02	Mg min0.03, Cu 0.6~1.1, Mo 0.2~0.8, Ni 0.6~1.0
FC300	2.8 ~3.3	1.5 ~2.1	0.6 ~1.1	-0.15	~0.15	

를 사용하였으며, HD700은 기지조직이 펄라이트인 펄라이트형 구상흑연 주철이고, FC300은 편상의 흑연이 존재하는 회주철이다. **Fig. 1**은 실험에 사용한 시험편 모재의 미세조직을 보여주고 있다.

시험편의 크기는 평면부 실험에는 120×90×25 mm³를 사용하였으며, 모서리부 실험에서는 90×40×25 mm³ 크기의 시험편을 사용하였다.

2.2 실험방법

실험에 사용된 레이저는 최대출력 4.0 kW의 다이오드 레이저로, 900~1,030 nm의 파장대를 가진다. 열처리용 사각빔 광학계를 6축 외팔보 로봇에 장착하여 열처리를 실시하였으며, 집광헤드 안쪽의 광학계 부근에는 340~1,300 ℃의 측정범위를 갖는 적외선 온도센서(two color pyrometer)를 부착하여 열처리시 시험편의 표면온도를 광학계와 동일 선상에서 조사된 레이저빔의 정중앙을 실시간으로 측정하고 그 온도변화를 모니터링 할

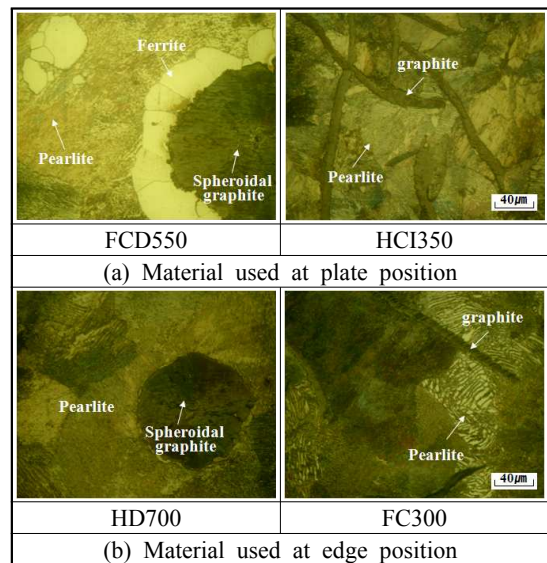


Fig. 1 Microstructures of base metal

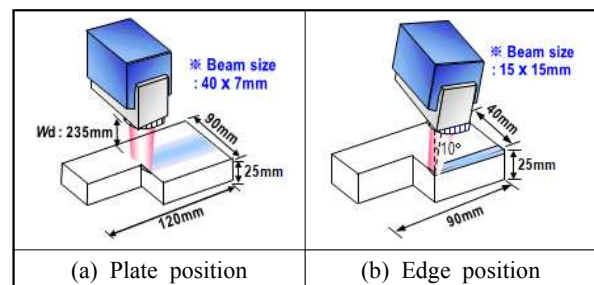


Fig. 2 Experimental method of surface hardening treatment

수 있도록 구성되어 있다.

실험은 Fig. 2와 같이 평면부와 모서리부로 나누어 열처리를 실시하였다. 평면부는 40×7 mm의 빔사이즈를 가진 광학계를 사용하였으며, 모서리부는 빔사이즈 15×15 mm의 광학계를 시험편의 수직방향으로 10° 기울인 상태에서 열처리를 진행하였다. 두 실험 모두 시험편에서 광학헤드까지의 거리는 235 mm였다. 열처리시 시험편 표면의 산화를 방지하기 위해 열처리 진행방향의 후면 20 mm 떨어진 위치에서 아르곤(Ar) 가스 20 l/min를 40° 각도로 분사하였다.

본 연구에서는 금형 재료의 차이에 따른 경화 특성을 파악하기 위해 평면부 및 모서리부에 대하여 흑연의 분포상태가 다른 두 가지 재료를 각각 열처리한 후 경화특성을 비교해 보았다. 열처리 부위에 따라서 각 재료의 적정 열처리 조건을 도출하고, 열처리시 측정된 표면온도를 통하여 재료의 열전도성에 따른 온도변화 차이를 살펴보았다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 평면부의 열처리시 재료에 따른 특성 비교

구상흑연 주철 FCD550 및 편상흑연 주철 HCl350 소재에 대하여 빔의 이송속도 및 레이저 출력에 따른 평면부의 열처리를 실시하였다. 그 결과, 이송속도가 감소할수록, 그리고 레이저 출력이 증가할수록 경화 폭 및 깊이는 모두 증가하는 경향을 나타내었지만, FCD550의 적정 열처리 조건이 빔의 이송속도 3 mm/sec에서 레이저 출력 3.5 kW인 반면, HCl350의 적정 조건은 같은 이송

속도에서 레이저 출력이 3.7 kW로 다소 높게 나타났다. 각각의 적정 열처리 조건에서의 경화폭은 약 26 mm, 경화깊이는 약 0.9 mm로 두 소재가 다른 열처리 조건임에도 거의 같은 경화특성을 보였다. 하지만 HCl350 소재의 열처리 조건이 다소 높은 레이저 출력을 나타내는 이유는 각 재료별 열전도성의 차이에 의한 것으로 생각된다. 열전도성이 좋은 흑연이 구상으로 존재하는 FCD550 소재보다 편상으로 존재하는 HCl350 소재가 열이 잘 전달되기 때문에 더 높은 입열이 요구되어 열처리 출력이 다소 높게 나타나는 것이다.

이와 같은 재료의 열전도성에 따른 열처리 특성 차이는 Fig. 3을 통하여 확연하게 비교할 수 있다. Fig. 3은 빔의 이송속도 3 mm/sec에서 평면 열처리시 각 재료별 레이저 출력에 따른 표면온도 변화를 나타낸 것이다. 두 그래프를 비교해보면 열처리시 레이저가 조사되는 동안에는 전반적으로 표면온도가 큰 변화없이 거의 일정한 온도 분포를 나타내고 있다. 하지만 레이저가 조사된 직후를 살펴보면 구상흑연 주철인 FCD550 소재의 온도변화는 등온구간까지 급격하게 온도가 상승하는 반면, 편상흑연 주철 HCl350은 온도가 완만하게 상승하고 있다. 이러한 온도상승의 차이는 역시 재료의 열전도성에 기인한 것으로, FCD550에 비해 HCl350이 레이저 조사 후 열원이 표면에서 재료내로 빠르게 전달되기 때문에 표면온도가 서서히 상승하는 것이다. 또한 적정 열처리 조건에서 FCD550 소재가 3.5 kW로 더 낮은 출력임에도 불구하고 HCl350 소재보다 높은 표면온도를 나타내고 있으며, 두 소재가 같은 출력

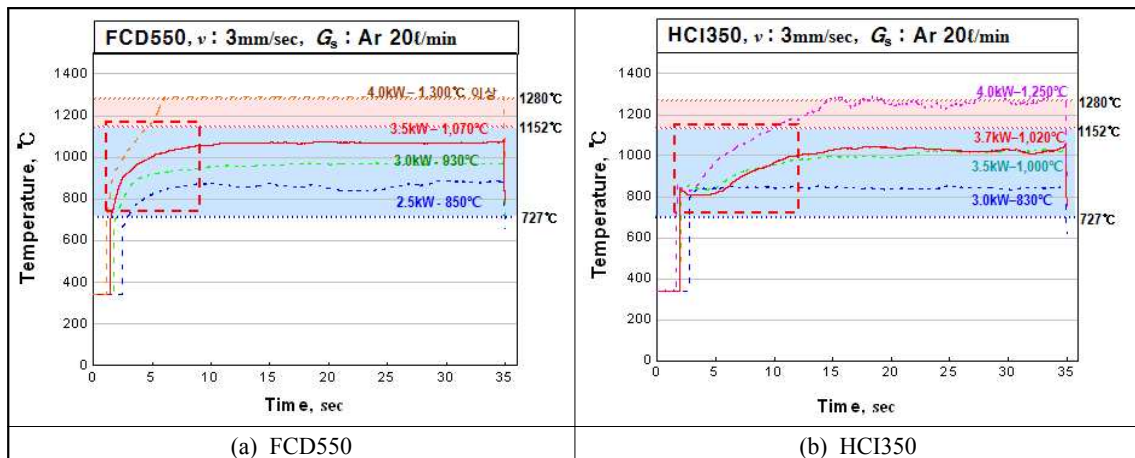


Fig. 3 Variation of surface temperature with laser power at plate position

에서도 FCD550의 열처리시 측정된 표면온도가 대체적으로 높은 경향을 나타내는 것도 같은 이유로 생각할 수 있다.

3.2 모서리부 열처리시 재료에 따른 특성 비교
 시험편의 모서리부에 대하여 구상흑연 주철 HD700소재와 회주철 FC300소재를 사용하여 열처리를 진행하였다. 평면부의 열처리시와 마찬가지로의 공정변수로 실험을 실시한 결과, 이송속도 10 mm/sec에서 HD700은 레이저 출력 3.0 kW, FC300은 3.5 kW의 적정 열처리 조건을 도출하였다. 평면부의 열처리 특성과 비교하여 적정 조건이 10 mm/sec로 빨라진 것을 제외하고는 거의 같은 경향을 나타내었다. 모서리부의 열처리 이송속도가 평면부에 비해 상대적으로 증가한 것은 레이저가 조사되었을 때 평면부에 비해 모서리부가 재료 내로의 열전달에 대한 방향이 제한되기 때문에 입열이 집중되어 빔의 이송속도가 증가한 것이다. 모서리부의 적정 열처리 조건에서의 경화 길이 및 깊이는 두 조건 모두 약 6.5 mm 및 0.8 mm를 나타내었다. 하지만 두 소재의 적정 조건에서

의 레이저 출력이 다른 이유는 역시 앞서 설명하였듯이 재료내에 흑연의 분포형상이 다른 것에서 기인한 소재의 열전도성 때문이다.

Fig. 4는 모서리부의 열처리시 측정된 두 소재의 레이저 출력별 표면온도 변화이다. 온도변화는 두 조건 모두 레이저 조사 후 2초 이내에 표면의 등온구간까지 급격하게 상승하였는데, 이는 열처리시 모서리부 형상의 제한적인 열전달 방향 때문이다. 반면, FC300의 열처리시 HD700에 비해 적정 조건이 0.5 kW가량 높아진 조건임에도 표면온도는 약 1,020 °C 정도로 거의 같은 온도를 나타내고 있다. 즉 구상흑연 주철 HD700 소재보다 흑연이 편상인 회주철 FC300 소재의 열처리 조건은 더 많은 입열이 요구되지만 측정된 표면온도는 빠른 열전달로 인해 거의 같은 경향을 보이고 있는 것으로 모서리부 열처리시에도 재료에 의한 열처리 특성의 차이가 있다는 것을 확인할 수 있다. 그래프 중 등온구간에서의 온도편차가 나타나는 것은 시험편 모서리 끝단에 잔류하는 버(bur)의 영향이며, 약 10초 이후의 급격한 온도 상승은 시험편의 열처리 종료 후 여분의 레이저 빔 에너지를 흡수시키기 위해 덧대어 놓은 사용 부재의 온도변화를 나타낸다.

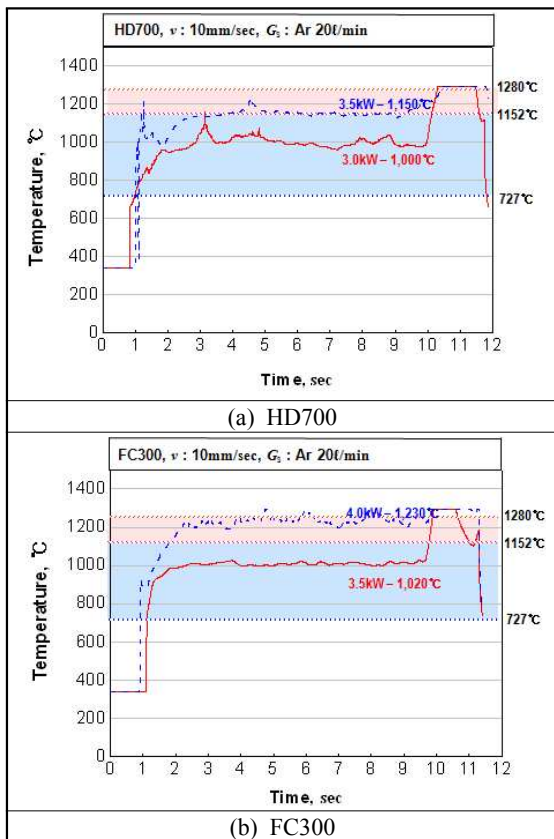


Fig. 4 Variation of surface temperature with laser power at edge position

3.3 경화부의 경도분포 및 미세조직

경화부의 경도 측정은 마이크로 비커스 경도기를 사용하여 평면 열처리의 경우 폭방향과 깊이 방향, 모서리부 열처리의 경우에는 길이 방향과 깊이 방향으로 나누어 측정하였다. Fig. 5는 열처리된 시험편의 단면을 나타낸 것이다. 경도의 측정위치는 표면에서 120 um 아래 부분에서 폭 방향으로는 1 mm, 모서리부 열처리 시험편의 길이 방향으로는 0.5 mm 간격을 두어 측정하였으며, 깊이 방향으로는 모든 조건에서 150 um 간격으로 측정하였다.

평면 및 모서리부의 적정 열처리 조건에서 열처리된 경화부의 경도분포 및 부위별 미세조직 사진을 Fig. 6 및 Fig. 7에 각각 나타내었다. 본

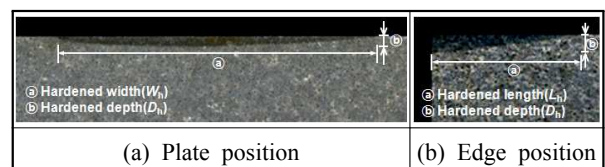


Fig. 5 Cross section of hardened specimen

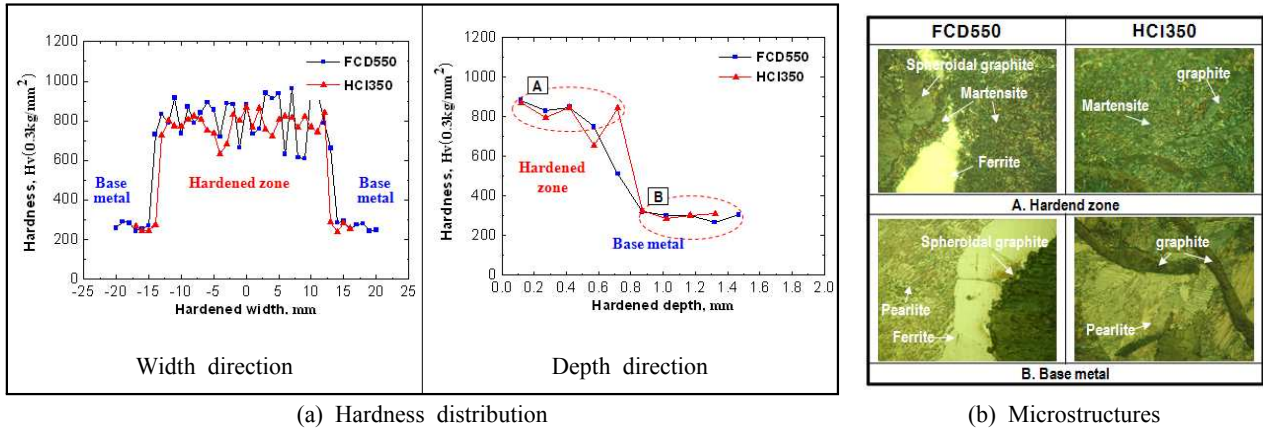


Fig. 6 Hardness distribution and microstructures for heat-treated specimens to plate position

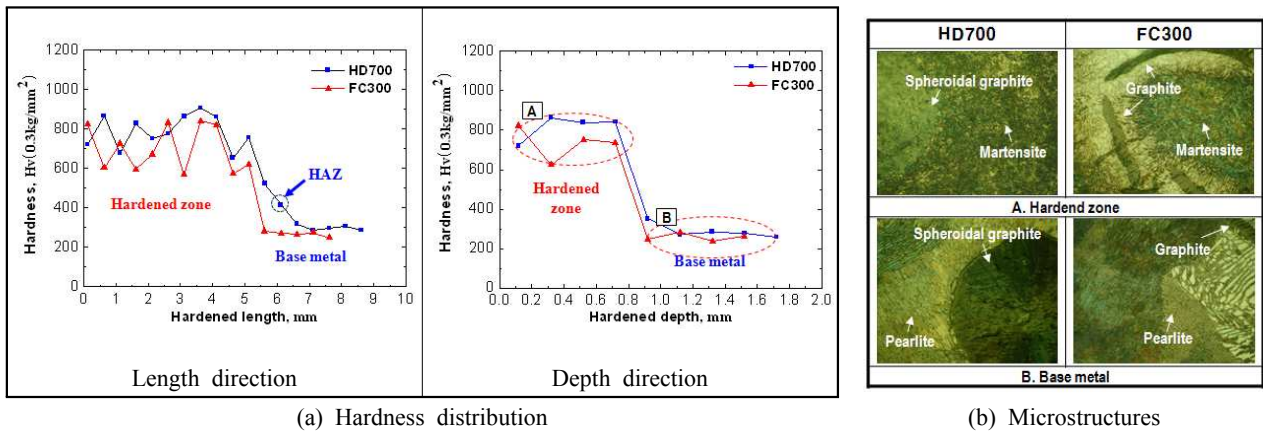


Fig. 7 Hardness distribution and microstructures for heat-treated specimens to edge position

연구에서는 한국산업규격(KS D 0027)에서 탄소 함유량 0.53% 이상의 강의 화염 및 고주파 경화시 유효 경화층의 한계 경도를 500 Hv로 정의한 것을 기준으로 경화부와 모재를 구분하였다.

Fig. 6의 평면 경화부 경도분포를 살펴보면 HCl350이 FCD550 소재에 비하여 모재 및 경화부의 경도가 전반적으로 약간 낮은 경향을 나타낼 뿐 거의 비슷한 경도분포를 보이고 있다. FCD550의 경우에는 모재 경도가 230~280 Hv 정도이며, 경화부는 폭방향으로 최고 930 Hv, 평균 820 Hv의 경도값을 나타내고, HCl350은 모재가 220~270 Hv, 경화부의 최고 경도는 870 Hv, 평균 경도는 780 Hv로 두 소재 모두 모재에 비해 경화부의 경도가 약 3배 정도 상승하는 우수한 경화 특성을 나타내었다.

각 부위별로 경화부 그리고 모재의 미세조직을 살펴보면, 두 소재 모두 경화부는 기지조직이 전형적인 침상 마르텐사이트 조직을 나타내었지만, FCD550 소재의 경우 흑연 주위로 페라이트가,

그리고 그 사이에 마르텐사이트가 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 조직분포는 열처리 전의 페라이트 영역이 광범위하고, 레이저 공정의 특성상 탄소의 확산시간이 충분치 않기 때문에 흑연 주위에 변태되지 않은 페라이트가 남게 된 것이라고 판단된다. 모재 조직은 앞서 확인한바와 같이 FCD550은 구상화된 흑연 주위로 페라이트가 감싸고 있고, HCl350은 편상의 흑연을 확인할 수 있으며 그 주변에 펄라이트가 분포되어 있다. 사진에는 나타나있지 않지만 경화부와 모재 사이의 경계부위 조직은 상부에 마르텐사이트와 하부에는 미세한 펄라이트가 혼재되어 있었다.

Fig. 7의 모서리부 열처리시 경도분포는 HD700의 경우 모재가 240~280 Hv, 경화부의 길이방향으로 최고 900 Hv, 평균 800 Hv의 경도값을 보이고 있으며, FC300 소재의 경우에는 모재 경도가 220~270 Hv, 경화부의 최고 경도는 870 Hv, 평균 경도는 780 Hv로 평면부와 마찬가지로 모재에 비하여 경화부의 경도가 평균 2.5~3배정도 상승하

여 표면경화처리가 잘 이루어졌음을 확인할 수 있었다. 하지만 HD700 소재의 경우 경화부와 모재의 중간 경도값을 가지는 열영향부(HAZ)가 형성되었는데, 이는 모서리부의 열처리시 기울어진 레이저빔의 영향으로인해 모서리에서부터 거리가 멀어질수록 레이저의 비초점거리가 증가되기 때문이다. 즉, 비초점거리가 멀어질수록 레이저의 파워밀도가 떨어지기 때문에 어느 구간에서는 완전 경화되지 못하고 경도가 다수 감소하는 구간이 형성되는 것이다.

모서리 열처리부의 미세조직을 살펴보면 HD700 소재와 FC300 소재 모두 경화부의 기지조직은 펄라이트에서 마르텐사이트 조직으로 변태되었으며 모재조직은 흑연 주위에 펄라이트가 분포되어 있는 것을 자세히 확인할 수 있다.

4. 결 론

프레스 금형재료용 4가지 주철의 각 부위별 열처리 특성에 미치는 재료의 종류에 따른 경화특성을 비교한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 평면 열처리를 실시한 결과, 빔의 이송속도 3mm/sec에서 편상흑연 주철인 HCl350이 레이저 출력 3.7kW로 구상흑연 주철 FCD550의 3.5kW보다 더 높은 열처리 조건을 나타내었다.

(2) 모서리부의 열처리시 열처리 조건은 이송속도 10mm/sec에서 FC300 소재가 HD700 소재보다 레이저 출력 0.5kW 높은 3.5kW를 나타내어, 편상흑연 주철이 구상흑연 주철보다 더 높은 열처리 조건을 나타낸다는 것을 확인하였다.

(3) 소재에 따라서 열처리 조건에 차이가 생기는 이유는 재료의 열전도성에 기인한 것으로, 흑연이 구상으로 존재하는 것보다 편상으로 존재하는 소재가 더 많은 입열이 요구된다는 것을 열처리시 표면온도 변화를 통하여 확인할 수 있었다.

(4) 레이저 열처리시 경화부에 대한 경도를 측정 한 결과, 모든 소재에 대하여 모재에 비해 평균적으로 약 3배 정도 상승하는 우수한 경화특성을 나타내었다.

(5) 경화부의 미세조직은 레이저 열처리에 의해 기지조직이 대부분 마르텐사이트로 변태되었으나, FCD550 소재는 흑연 주위에 일부 페라이트가 존재하였다. 경계부위의 조직은 모두 상부는 마르텐사이트, 하부에는 미세한 펄라이트가 분포

되어 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) Gagne, M., 2004, *The Sorelmetal Book of Ductile Iron*, Rio Tinto Iron & Titanium Inc.
- (2) Kang, M.S. and Park, H.S., "A Study on the Mechanical Properties of Austempered Low-Alloy Ductile Cast Iron," *Trans. of the KSME*, Vol. 12, No. 6, pp. 1296~1302
- (3) Smith, W.F., 1993, *Structure and Properties of Engineering Alloys*, McGraw-Hill, Inc.
- (4) Holmgren, D., Dioszegi, A. and Svensson, I.L., 2007, "Effects of Nodularity on Thermal Conductivity of Cast Iron," *International Journal of Cast metals Research*, Vol. 20, No. 1
- (5) Sandven, O. A., "Laser Surface Hardening," *ASM Handbook*, Vol. 4, pp. 286~295
- (6) Chen, T.L., Guan, Y.H., Wang, H.G. and Zhang, J.T., 1997, "A Study on Austenite Transformation during Laser Heating," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 63, pp. 546~549
- (7) Li, L., 2000, "The Advances and Characteristics of High Power Diode Laser Materials Processing," *Optics and Laser in Engineering* Vol.34, pp. 231~253
- (8) Pashby, I.R., Barnes, S. and Bryden, B.G., 2003, "Surface Hardening of Steel Using a High Power Diode Laser," *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 139, pp. 585~588
- (9) Kennedy, E., Byrne, G. and Collins, D.N., 2004, "A Review of the Use of High Power Diode Lasers in Surface Hardening," *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 1855~1860
- (10) Ehlers, B., Herfurth, H. and Heinemann, S., 1998, "Surface Hardening with High Power Diode Laser," *ICALEO-Section G*, pp. 75~84.