

사출금형용 고탄소강(HP4MA)의 레이저열처리 특성에 관한 연구

황헌태⁺, 최홍원⁺, 김종도^{*}

(논문접수일 2011. 06. 10, 수정일 2011. 07. 12, 심사완료일 2011. 07. 13)

A Study on Laser Surface Treatment Characteristics of High Carbon Steel(HP4MA) for Injection Mold

Hyun-Tae Hwang⁺, Hung-Won Choi⁺, Jong-Do Kim^{*}

Abstract

Recently, lots of automobile part manufacturers try to increase glass fiber content of their plastic parts to improve strength and impact-resistance. For this reason, injection mold requires high hardness and wear-resistant. Laser surface treatment is used to improve characteristics of wear and to enhance the fatigue resistance for injection mold. In this paper, high carbon steel (HP4MA) for injection mold material was heat-treated to harden surface by using high power diode laser (HPDL). To find the process parameters for laser surface treatment of HP4MA, many experiments are carried out as changing the parameters of surface temperature and travel speed of laser.

From the results of the experiments, it has been shown that the maximum average hardness is approximately 711 ~ 739 Hv when the temperature and the travel of laser are 1,050°C and 2 mm/sec.

Key Words : Laser surface treatment(레이저 열처리), High carbon steel[HP4MA](고탄소강[HP4MA]), High power diode laser(고출력 다이오드 레이저), Injection mold(사출금형)

1. 서론

오늘날 자동차부품 제조업체에서는 차량배출가스 저감을 위해서 플라스틱 소재를 이용한 차체 부품의 경량화를 시도하고 있다⁽¹⁾. 플라스틱 소재는 경량화뿐만 아니라 충격흡수를 통한 운전자 및 보행자의 보호, 제품 디자인의 자율성 향상, 소재 재활용에 따른 부품 가격 저가화와 같은 우수한 장점 들을 가지고 있다. 하지만 플라스틱부품들이 기존의 스틸 제품들과 동등한 강도와 내충격성을 가지기 위해서는 충분한 물성확보가 필요

하며, 이를 위해서 유리섬유가 다량 함유된 복합소재 적용 부품이 개발되고 있다.

플라스틱 부품들은 사출성형을 통하여 제작되어지는데 플라스틱이 고강도화 되어감에 따라 제품 성형을 위한 사출 금형을 손상시키는 사례가 빈번하게 발생하고 있다. 또한, 소재의 유동성 저하에 따른 사출 불량률이 증가하고 있어 우수한 내마모성, 고경도와 함께 고풍택을 유지하는 사출 금형의 개발이 시급한 실정이다.

금형의 내마모성 향상을 위한 표면처리방법으로는 질화나침

⁺ (재)울산테크노파크

^{*} 교신저자, 한국해양대학교 기관공학부 (jdkim@hhu.ac.kr)

주소: 606-791 부산광역시 영도구 태종로 727

탄처리, 화염표면처리, 고주파표면처리 등이 적용되어 왔다. 하지만 화염표면처리나 고주파 표면처리는 공정 중 발생하는 열 변형 및 형상제한 등의 문제점을 수반하고 있다. 이러한 이유로 레이저를 이용한 표면경화 기술이 검토 및 적용되고 있다. 레이저 열처리는 미세한 영역에 높은 에너지를 집중시켜 열처리를 수행하기 때문에 초미세 국부 표면처리가 가능하고 정밀한 경화층 두께를 제어할 수 있다. 뿐만 아니라 매우 작은 열영향부를 가지기 때문에 열처리에 의한 치수변형이 거의 없는 것으로 알려져 있다⁽²⁻³⁾.

금속표면에 레이저를 조사하면 고열원의 레이저 빔에 의해 A₃ 이상의 고온으로 가열되고 금형표면조직은 오스테나이트화된다. 레이저 조사후 열원을 제거하면 재료의 열전도에 의한 급격한 온도하강이 발생되고, 이로 인하여 내부의 기지에 의한 순간 급랭효과로 자기퀵칭(self-quenching)이 이루어진다. 이와 동시에 열처리 표면부는 체적팽창을 일으키는 마르텐사이트 변태를 수반하게 된다. 마르텐사이트 변태와 레이저 열원이 조사로 인하여 금형표면부에서는 잔류응력이 형성되기 때문에 표면부는 고경도와 강인성을 가지게 된다.

이와 같이 레이저열처리 기술은 최근 독일, 미국 및 일본 등에서 활발히 연구되고 있으며 국내에서는 CO₂와 Nd:YAG 레이저를 이용한 표면처리기술이 일부 보고되고 있다. 하지만 CO₂나 Nd:YAG 레이저는 빔 중앙부의 파워 밀도가 높고 중앙부에서 멀어질수록 파워밀도가 낮아지기 때문에 불균일 경화를 초래할 수 있다⁽⁴⁻⁷⁾. 하지만 다이오드레이저는 슬로우 축방향으로 탭햇분포를 가지고 패스트 축방향으로 가우시안 분포를 가지기 때문에 표면의 균일한 가열이 가능한 것으로 알려져 있다⁽⁸⁻⁹⁾.

본 연구에서는 고탄소강인 HP4MA를 대상으로 고출력 다이오드 레이저를 이용한 레이저열처리실험을 수행하였다. 시험편 표면에서 측정된 열처리 온도 및 레이저 빔의 이송속도를 각각 달리 변화시켜가면서 레이저열처리를 실시한 후 경도분포특성과 현미경 조직관찰을 수행하였다. 이를 기반으로 레이저열처리 인자에 따른 시료의 마찰 특성 및 표면조건 변화를 규명하고자 하였다.

또한, 분석결과를 기반으로 자동차 도어인너(door inner) 부품의 사출금형에 레이저 국부 열처리 기술을 적용함으로써 레이저열처리 효과에 대해 입증하였다.

2. 레이저열처리 시험편 재료 및 실험방법

2.1 레이저열처리 시험편 재료

일반적으로 금형재료는 높은 인성과 내마모성이 요구되며 기계 가공성이 양호하고 열처리가 용이해야 한다. 또한 고내식성을 가지면서 가격이 저렴하고 쉽게 구입이 가능하여야 한다.

Table 1 Chemical composition of specimen

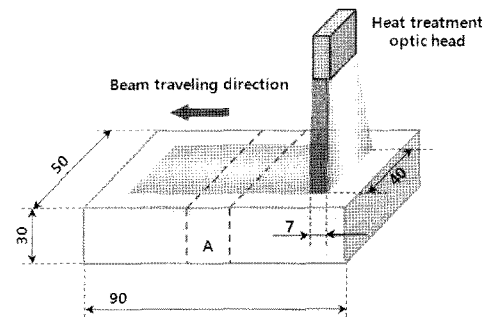
Element(wt%) Material	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
HP4MA	0.33 ~	0.15	0.80	0.40	1.65	0.40
	0.37	~ 0.35	~ 1.00	~ 0.50	~ 1.75	0.50

이러한 요구조건들을 고려할 때 금형재료로서 가장 많이 사용되고 있는 것이 철강재이다. 그 중에서 고탄소강의 하나인 HP4MA는 우수한 기계 가공성, 높은 경도, 우수한 내마모성, 균일한 단면경도를 때문에 사출금형 소재로 많이 사용되고 있다. 또한, 본 실험에 사용된 HP4MA 시험편은 진공 탈가스 처리한 강괴를 단조하여 생산하였기 때문에 청정도가 높고 기공이 없을 뿐만 아니라 성분의 편석 및 기타 유해한 결함이 적은 것으로 알려져 있다.

본 연구에 사용된 시험편 재료의 화학적 조성을 Table 1에 나타내었다.

2.2 시험편의 제작

레이저열처리를 위한 공정변수들을 선정하기 위해서 시험편 실험을 수행하였다(Fig. 1). 시험편은 레이저열처리 후 자기냉각 효과를 충분히 고려하여 50(w)mm×90(l)mm×30(t) mm로 제작하였다. 단면관찰용 시험편은 재현성을 확보하기 위해 경화부가 안정적으로 얻어졌다고 생각되는 부분인 시험편 45mm 중간 부위를 채취하였다. 채취된 시험편의 전체적인 경화부 단면 형상을 우선적으로 파악하고, 연마 및 에칭(2% 질산수용액 + 피크리산 0.5g)단계를 거쳐 분석 시험편을 준비하였다.



(a) Sampling method of specimen



(a) Hardened width (b) Hardened depth
(b) Cross section

Fig. 1 Configuration of test specimen and analysis area

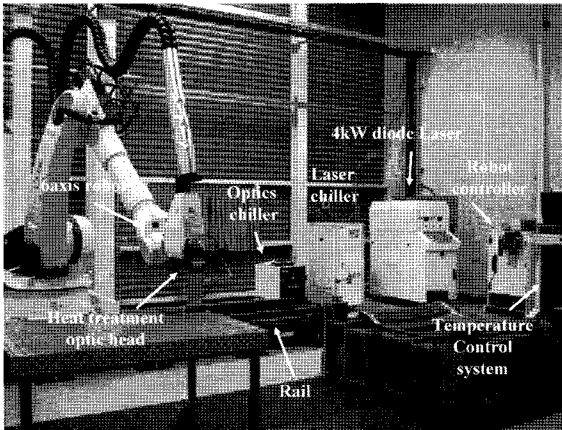


Fig. 2 Laser heat treatment system for test

2.3 레이저열처리 실험을 위한 장치 구성

본 연구에 사용된 레이저열처리 장비는 최대출력 4.0kW, 레이저 빔 직경이 400 μ m인 고출력 다이오드 레이저장비로 구성되어 있다. 레이저 빔은 파이버를 통해 6축 로봇에 부착된 열처리 광학렌즈(size; 40 \times 7mm)로 전송되고, 대형부품의 레이저열처리 적용을 위하여 레일을 설치함으로써 넓은 범위로 빔의 전송이 가능하도록 구성하였다. 레이저열처리 시 시험편의 온도 측정을 위해 열처리 헤드부분에 적외선 온도센서인 2색 온도계(two color pyrometer)를 부착하였다. 온도 측정지점은 빔 조사부의 중앙이며 온도 측정범위는 350~1,300 $^{\circ}$ C이다. 또한 온도 제어는 고온계를 통해 측정된 온도를 통하여 레이저출력이 자동 조절되게 구성하였다(Fig. 2).

3. 레이저열처리 실험 결과 및 고찰

3.1 공정변수 범위를 선정하기 위한 실험

시험편 표면 경화 특성은 시험편에 조사되는 레이저의 입열량에 의해서 결정되어진다. 열처리 온도가 낮을 경우에는 입열량 감소로 인하여 열처리 성능이 감소되므로 경화 폭 및 표면경도가 낮아진다. 반면에 열처리 온도가 너무 높을 경우에는 입열량 과다로 시험편의 표면이 용융하게 된다. 표면을 용융시키지 않고 열처리하기 위해서는 입열량, 즉 열처리 온도와 빔의 이동 속도 제어가 필수적이다.

본 연구에 사용된 사출금형용 HP4MA 소재에 대한 경화특성을 파악하기 위해 주된 공정변수인 레이저열처리 표면온도와 레이저 빔의 이송속도를 변화시키면서 레이저 열처리를 실시하였다.

일반적으로 레이저가공시 입열량을 크게 하기 위해서는 저속으로 레이저 빔을 이송시켜야한다. 그러므로 제공된 시스템에서 최대 입열량이 가능한 속도인 2mm/sec로 빔의 이송속도를 고정하고 탄소강 표면을 화염열처리할 때의 온도인 900~

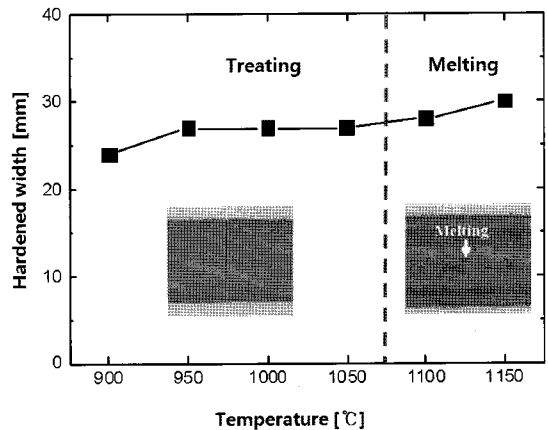
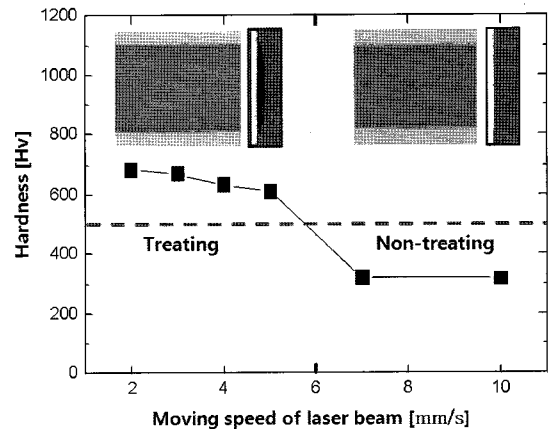


Fig. 3 Result of Hardened width according to temperature at same speed(2mm/sec)



(b) Hardness by speed control

Fig. 4 Result of hardness according to beam traveling speed at same temperature(1,050 $^{\circ}$ C)

1,150 $^{\circ}$ C사이에서 50 $^{\circ}$ C 간격으로 레이저열처리를 수행하였다. Fig. 3에서 보는 것과 같이 측정된 온도가 증가 할수록 경화폭이 상승하는 경향을 나타내다가 일정한 열처리 온도 범위가 되면 더 이상 경화폭이 증가하지 않았다. 또한 열처리 온도 1,100 $^{\circ}$ C이상의 경우 일부 표면용융이 발생하였다. 이를 통하여 경화폭이 일정하게 나타나는 900~1,050 $^{\circ}$ C구간에서 최대 경화가 일어난다고 판단하였다.

레이저열처리 효과가 나타나는 최대 온도인 1,050 $^{\circ}$ C에 온도를 고정하고 레이저 빔의 이송속도 2, 3, 4, 5, 7, 10mm/sec로 변화시키면서 열처리 실험을 수행하였다. 실험결과를 바탕으로 레이저 빔의 이송속도에 따른 표면경도를 Fig. 4에 나타내었다. 빔의 이송이 저속인 구간에서는 경도 향상이 이루어졌으나 이송속도 7mm/sec 이상에서는 표면경도가 모재와 같았다. 이를 통하여 2, 3, 4, 5mm/sec구간에서 경화가 일어난다고 판단하였다.

따라서 레이저열처리의 주된 공정변수인 열처리 온도의 경우

900~1,050℃, 레이저 빔의 이송속도의 경우 2~5mm/sec구
간에서 경화특성을 파악하고자 하였다.

3.2 공정변수에 따른 경화특성

레이저열처리 후 표면경화부의 평가는 한국산업규격 ‘강의
화염 경화 및 고주파 경화층 깊이 측정방법’(KS D 0027)에서
렌칭 템퍼링한 경화층의 표면에서 경도값 500Hv을 유효 경화
층의 한계 경도로 정의하고 있다. 따라서 본 연구에서 경도값을
토대로 500Hv 이상의 경도값을 나타내는 부분을 경화부로 정
의하였다.

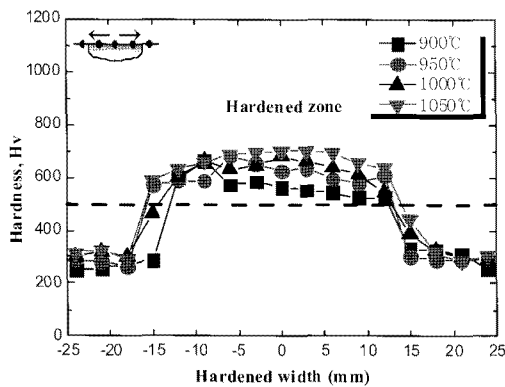
본 연구에 사용된 시험편의 모재경도는 약 280~340Hv 이
다. Fig. 5은 열처리 온도 및 레이저 빔의 이송속도에 따른 경화
특성을 나타내었다. 여기서 Fig. 5(a), (b)는 레이저 빔의 이송
속도 2mm/sec로 고정하고 열처리 온도에 따른 경화특성이며,
Fig. 5(c), (d)의 경우 열처리 온도 1,050℃로 고정하고 레이저
빔의 이송속도에 따른 경화특성을 나타내었다.

레이저열처리 후 최대 표면경도는 700Hv로 관찰되어 모재
경도에 비해 약 2배정도 상승한 것으로 관찰되었다. 또한 레이
저 빔의 이송속도가 낮을수록 열처리 온도가 증가할수록 시험
편 두께방향으로 입열량도 증가하여 오스테나이트로 변태되는

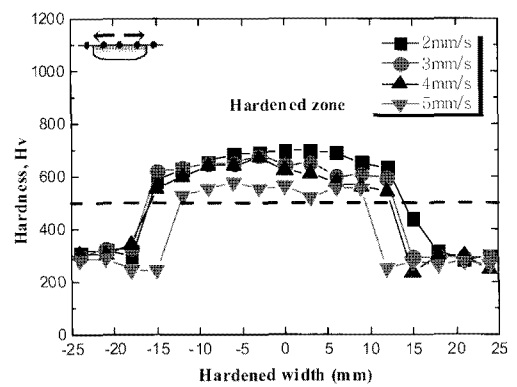
부분도 증가되며, 그 후 자기냉각효과로 인하여 마르텐사이트
를 형성하는 부분이 넓어 졌음을 알 수 있다. 따라서 Fig. 5(a),
(c)에서와 같이 레이저 빔의 이송속도가 높을수록 열처리 온도
가 낮을수록 경화폭이 감소하고 있음을 알 수 있으며, Fig.
5(b), (d)에서와 같이 레이저 빔의 이송속도가 느릴수록 열처리
온도가 높을수록 경화 깊이는 깊게 관찰되었다. 특히 레이저
빔의 이송속도 2mm/sec, 열처리 온도 1,050℃에서 최대 경화
깊이인 0.9mm가 관찰되었다.

3.3 경화부의 마모 및 조도특성

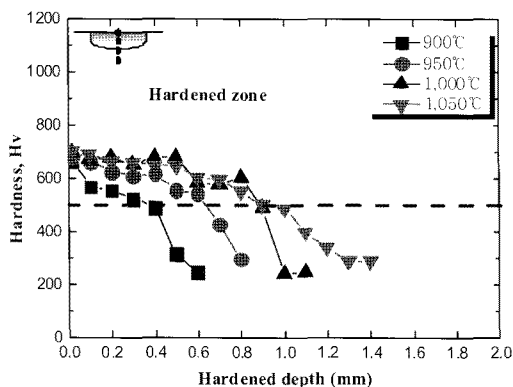
실험에 사용된 소재의 열처리부의 마모특성 및 조도특성을
Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)는 레이저열처리 전·후 시험편에
대한 마모특성으로 시험편을 왕복운동 시키고 마모량은 400~
3,600 회전수에서 400회전수 간격으로 시험편의 무게 감소량
을 측정하였다. 이를 통하여 회전수를 거리로 환산하고 무게
감소량에 거리로 나눈 값을 무게감소 속도로 하였다. 이때 레이
저열처리 전의 소재부의 최대, 최소 무게감소속도는 각각
0.47906g/km, 0.45978g/km이고, 레이저열처리후의 경화부의
최대, 최소 무게감소속도는 각각 0.39789g/km, 0.35836g/km
으로 나타났다. 이는 무게감소속도가 낮은 값이 높은 내마모성



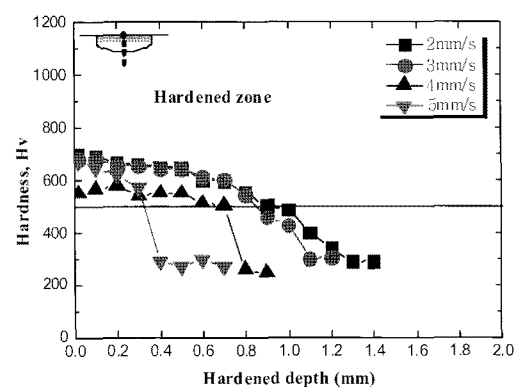
(a) Hardened width by various temperature



(c) Hardened width by various speed

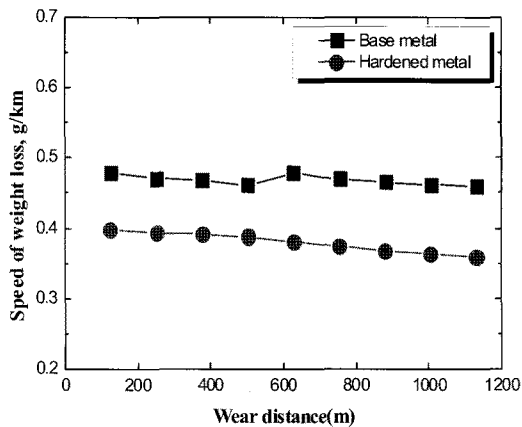


(b) Hardened depth by various temperature

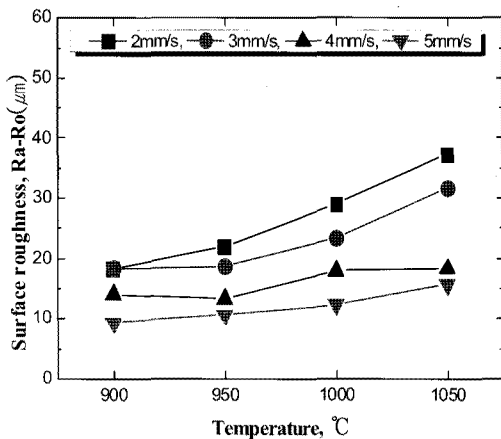


(d) Hardened depth by various speed

Fig. 5 Hardness profile of laser hardened zone



(a) Speed of weight loss by wear distance



(b) Surface roughness by temperature

Fig. 6 Characteristics of wear and surface roughness

을 의미한다. 따라서 레이저열처리에 의한 마모량이 열처리 전의 마모량에 비해 약 20% 낮게 나타나, 열처리 후 내마모성이 우수한 것으로 나타났다. 이는 레이저열처리에 의해 소재의 경화부가 충분히 경화되었음을 의미한다.

Fig. 6(b)는 레이저 빔의 이송속도별 열처리 온도에 따른 표면조도를 나타내었다. 표면조도변화량(Ra-Ro)은 열처리 후의 표면조도(Ra)에서 열처리 전의 표면조도(Ro)를 뺀 값으로 하였다. 이때 레이저열처리 온도 증가와 레이저 빔의 이송속도 감소에 따라 표면조도변화량이 증가하고 있음을 관찰하였다. 이는 열처리 온도 증가와 레이저 빔의 이송속도 감소는 입열량 증가 원인으로 입열량의 증가는 레이저열처리에서 열처리 후 표면 산화층이 증가하는 원인이 된다. 이로 인해 표면조도변화량이 증가한 것으로 추측한다.

3.4 미세조직 특성

레이저 온도 및 레이저 빔의 이송속도가 각각 1,050°C, 2mm/sec의 공정변수에서 표면열처리시 미세조직 특성을 관찰하였다. Fig. 7은 미세조직을 나타낸 것으로 경화부와 모재부

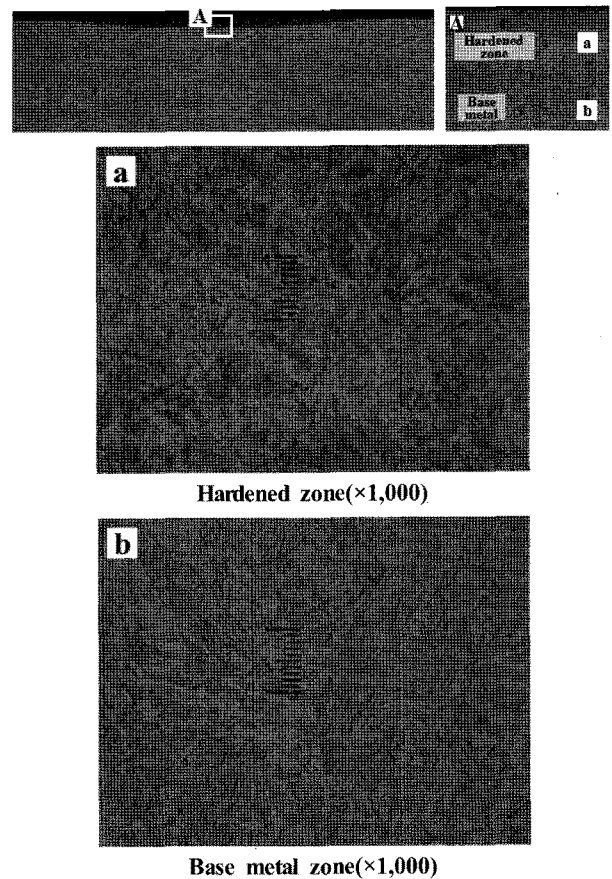
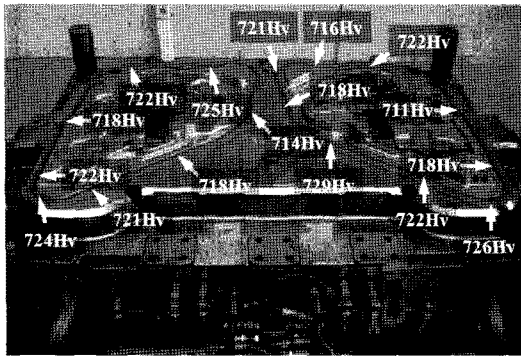


Fig. 7 Micro structure of laser surface treated zone

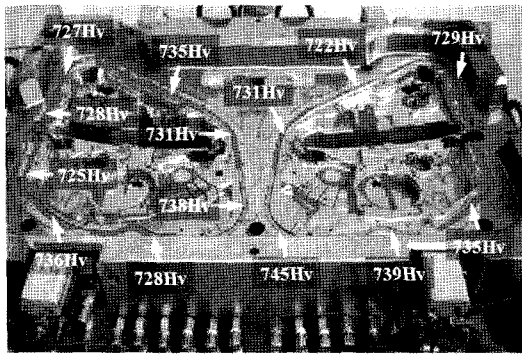
로 나누어 관찰하였다. 모재부의 기지조직은 페라이트와 시멘타이트가 혼재되어 존재하는 펄라이트 조직으로 되어 있다. 경화부는 펄라이트의 시멘타이트 탄소가 페라이트로 고용되어 마르텐사이트 조직을 형성하고 있다. 레이저열처리의 프로세스는 레이저 빔에 의한 표면 경화로 레이저 빔의 조사시 기지조직은 가열된 후 매우 빠르게 자기냉각 과정을 거쳐 조직성장이 극소화되고 마르텐사이트로 빠르게 변태된다. 이로 인하여 재료의 강도를 높이고 내마모성, 내충격 피로강도를 높이게 되어 기계적 성질도 향상된다. 시험에 사용된 소재는 고탄소강으로 열처리능이 우수한 소재로 레이저열처리에 의해 경화부의 마르텐사이트 조직이 잘 형성되어있다.

3.5 레이저열처리 후 금형 내구수명

사용하였으며, 금형의 크기는 가로×세로×높이(1.2m×1.4m×0.4m)이다. 레이저열처리후 금형내구평가는 레이저열처리 금형을 이용한 제품생산시 레이저열처리부에서 제품불량이 발생할 때까지의 제품생산량으로 평가 하였다. 금형의 레이저열처리 부위는 제품 사출시 금형의 상형과 하형이 맞는 부위를 선정하였으며, 이는 기존의 금형으로는 1만개 미만에서 금형마모로 제품 버(burr)가 발생하여 제품 불량률을 초래한 부위이다.



(a) Lower mold after laser hardening



(b) Upper mold after laser hardening

Fig. 8 Hardness of mold after laser surface treatment

따라서 Fig. 8과 같이 열처리 온도 1,050℃ 레이저 빔의 이송 속도 2mm/sec로 하여 레이저열처리를 실시하였고, 경화부는 표면 용융없이 표면경도 711~739Hv로 나타났다. 또한, 본 연구에서 발생한 표면거칠기 수준은 일반적인 후가공으로 수정이 가능한 범위에 속하는 것으로 나타났다. 레이저열처리 후 제품의 버가 발생하지 않고 18만개 이상 금형수정 없이 진행되었다. 이로 인해 사출금형에 대한 레이저열처리를 통하여 금형 내구수정에 충분한 효과가 있음을 규명하였다.

4. 결론

본 연구에서는 고탄소강 HP4MA 소재를 사용하여 레이저열처리 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 표면 경화특성을 분석한 결과 열처리 온도 1,100℃ 이상에서 표면 부분 용융이 발생하였다. 레이저 빔의 이송속도의 경우 실험조건(2, 3, 4, 5mm/sec)에서 요구하는 경화특성을 얻었다.
- (2) 레이저 열처리 전·후 경화부의 마모 특성은 모재 대비 약

20% 내마모성이 우수한 것으로 나타났다. 이는 레이저 열처리에 의한 소재의 경화부가 충분히 경화되었음을 의미하며, 금형의 내구성에도 영향이 밀칠 것으로 판단한다.

- (3) 레이저 열처리 전·후 경화부의 조도 특성은 레이저 빔의 이송속도의 감소와 열처리 온도의 증가로 열처리 후 표면조도 선형적으로 증가하는 것을 보였으며, 이는 입열량 증가로 실험편 표면의 산화가 증가하여 나타난 원인으로 분석된다.
- (4) 금형내구수명은 대형 플라스틱 금형에 대한 레이저열처리 후 사출제품 성형 시 제품에 발생하는 버(burr)를 이용하여 평가하였다. 레이저 열처리 전 버는 약1만개의 제품 생산 후 버가 발생하였으나, 레이저 열처리 적용 금형의 경우 18만개의 제품 생산에도 버가 발생하지 않았다.

참고 문헌

- (1) Chang, I. S., 2003, "Innovative Lightweight Concept in Car Bodies," *Journal of Korean Welding and Joining Society*, Vol. 21, No. 7, pp. 18~20.
- (2) Park, K. W., Lee, J. B., Han, Y. H., and Lee, S. Y., 1996, "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.
- (3) Vilar, R., Colaco, R., and Almeida, A., 1995, "Laser Surface Treatment of Tool Steels", *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 27, No. 12, pp. 1273~1289.
- (4) Heitkemper, M., Bohne, C., Pyzalla, A. and Fischer, A., 2003, "Fatigue and Fracture behaviour of a Laser Surface Heat Treated Martensitic High-nitrogen Tool Steel," *International Journal of Fatigue*, Vol. 25, No. 2, pp. 101~106.
- (5) Yoo, Y. T., Shin, H. J., and Jang, W. Y., 2004, "Surface Heat Treatment of Die Material by Means of CW Nd:YAG Laser," *Transactions of KSMTE*, Vol. 13, No. 5, pp. 67~74.
- (6) Hirogaki, T., Nakagawa, H., Hayamizu, M., Kita, Y., and Kakino, Y., 2001, "In-situ Heat Treatment System for Die Steels using YAG Laser with a Machining Center," *Precision Engineering*, Vol. 25, No. 3, pp. 212~217.
- (7) Skvarenina, S., and Shin, Y. C., 2006, "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, No. 6, pp. 2256~2269.
- (8) Hwang, H. T., Kim, J. D., Song, H. S., Song, M. K., and Kim, Y. K., 2009, "Surface Treatment in Edge Position of Spheroidal," *Korean Journal of Materials Research*, Vol. 19, No. 9, pp. 457~461.
- (9) Kim, J. D., Hwang, H. T., So, S. W., Kim, Y. K., and Kim, B. H., 2009, "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.