J. of the Korean Society for Heat Treatment
Vol. 9, No. 4, December, pp.271~280.

《論 文》

레이저 표면경화처리된 회주철의 내마모특성에 관한 연구

박근웅 • 한유희* • 이상윤
동아대학교 금속공학과
*한국기계연구원 레이저가공기술연구회

Study on the Wear Resistance of Gray Cast Iron in Laser Surface Hardening

K. W. Park, Y. H. Han*, S. Y. Lee
Department of Metallurgical Engineering, Dong-A University
*Study Circle for Laser Material Processing, KIMM

ABSTRACT

This study has been performed to investigate into some effects of power density and traverse speed of laser beam on optical microstructure, hardness and wear characteristics of gray cast iron treated by laser surface hardening technique.

Optical micrograph has shown that large martensite and a small amount of retained austenite appear in outermost surface layer with fine martensite in inside hardened zone. Hardness measurements have revealed that the range of maximun hardness value is Hv=650±15 and as the power density increases and the traverse speed decreses, the depth of hardened zone increases due to as increase in input power density. Wear test has exhibited that wear rasistance of laser surface hardened specimen is superier compared to that of untreated specimen under the condition of same load at a given sliding distance, showing that absorption results of an wxidized substance due to a heavy abrasion appear in untreated specimen. The amount of weight loss of laser surface hardened specimen with respect to sliding distance at a given load decreses with increasing traverse speed at a given power density and with increasing power density at a given traverse speed.

1. 서 론

자동차 산업과 항공기 산업 등의 수송산업이 급속도로 발전하고 장기 운행에 따른 기기부품의 내마모성, 내피로강도, 내식성 등의 내구성을 높이는 요구에 부응하고 산업전반에 걸쳐 사용되는 기기 부품들의 수명연장을 위해 최근 표면경화 처리가 용이하고 처리시간이 빠르며 고부가 가치가 뒤따르는 레이저 표면경화 처리는 이미 선진국에서는 산업전반에 실용화가 확산되어 활발히 진척되고 있다. 최근 대기오염과 환경파괴에 대한 문제점으로 인해 대기중에서 환경오염을 전혀 일으키지 않는 국부적인 표면경화 처리가 가능한 레이저 표면경화 처리는 실린더 라이너, 밸브시트, 캠 샤프트, 크랭크 샤프트, 피스톤 링, 기

어 등의 내마모성 및 내피로성이 요구되는 기기부품에 적용이 이뤄지고 있다.[1~10]

레이저 표면경화 처리는 고열원의 레이저 비임을 이용하여 형상이 복잡하고 정밀제품 등에 기존의 표면경화 처리시 품질이 불균일하고 제품의 치수변형 등의 문제점이 없이 시료의 선택적 경화처리에 효과적이며 자동화 시스템에 의한 대량 생산이 가능하다. 또한 처리공정이 간단하고 요구하는 기계적 성질을 얻기 위해 레이저 표면경화 인자인 레이저 비임 모우드, 비임 직경, 출력밀도, 조사속도 등의 정밀 제어가 가능하다[11~17]. 레이저 표면경화 처리시 표면층에 형성되는 마르텐사이트 조직은 체적팽창으로 인한 압축잔류 응력을 형성시켜 내모성과 내피로성을 향상시키며 자기켄칭으로 인해 표면경화부의 경도치는 높게 나타나 내마모성을 더욱 향상시킨다.

본 연구에서는 미끄럼 마찰에 대한 내마모성이 우수하고 내연기관의 실린더라이너 및 피스톤 링 그리고 기계공구의 슬라이딩 공구에 널리 사용되는 회주철을 시료로 이용하여 레이저 비임 모우드와 비임 직경을 일정하게 하고 출력밀도와 조사속도를 각각 달리 변화시켜 레이저 표면경화 처리를 행한 후 현미경조직 및 레이저 표면경화부의 경도분포 특성을 고찰하고 레이저 표면경화 인자에 따르는 내마모특성을 규명하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 시료준비

본 연구에 사용된 시료는 회주철이며 화학조성은 Table 1과 같다. 마모시험편은 마모시험의 정확성을

Table 1. Chemical composition of specimen. (wt.%)

specimen	C	Si	Mn	P	S
gray cast iron	3.45	2.10	0.40	0.10	0.09
specimen	Cr	Ni	Mo	Cu	
gray cast iron	0.06	0.08	0.05	0.10	

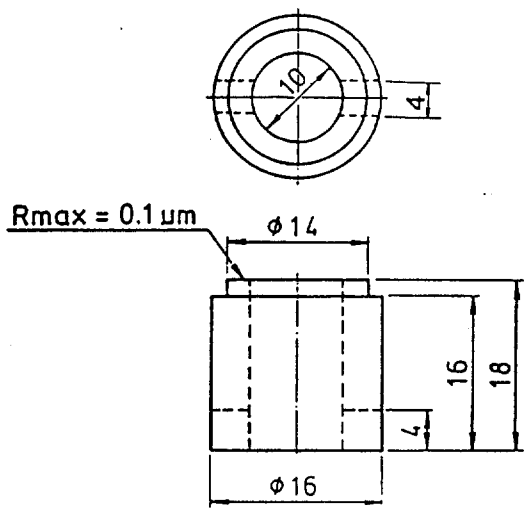

Fig. 1 Wear test specimen

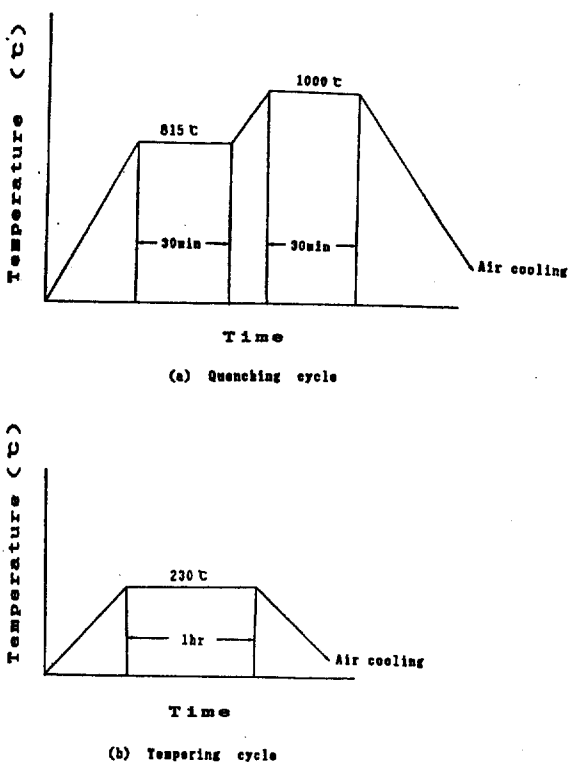

Fig. 2 Quenching and tempering cycles for the standard wear test specimen made of clod work tool steel(JIS SKD11).

얻기 위하여 1쌍의 시험편 중 상대마모 시험편인 하부는 표준 시험편으로써 JIS SKD 11을 사용하였고 상부 시험편은 2㎜의 분산광 비임(defocussed beam) 직경으로 출력밀도와 조사속도의 변화조건에서 균일하게 레이저 표면경화 처리된 시험편을 사용하였으며 마모시험편의 형상과 치수는 Fig. 1과 같다. 레이저 표면경화처리전 시료의 기계가공 중에 형성된 잔류응력을 제거하기 위하여 전기로(L&L special furnace, SL244-H422-3-B)에서 A_1점 직하의 600℃로 가열하여 1시간 동안 유지한 다음 공냉하였다. 상대마모 시험편인 표준 마모시험편의 표면경도를 일정하게 하기 위하여 광휘분위기열처리로에서 Fig. 2와 같은 열처리 싸이클에 의해서 퀜칭 및 템퍼링 처리를 하였으며 측정된 표면경도의 평균 값은 Hv-720으로 확인되었다. 시료의 레이저 비임의 흡수율을 높이기 위하여 공업적으로 많이 적용되는 흑색페인트를 시료표면에 2회 반복하여 균일하게 코팅하였다.

2.2 실험장치

본 연구에 사용된 레이저 표면경화 실험장치는 Rofin-Sinar(Rs) 840의 연속출력파 (continus wavelength, CW) 및 정격출력 4kw의 횡류방식 (traverse flow type) CO_2 레이저 장치이며 발진기 (resonator)에서 출력되어 나온 파장 10.6㎛의 CO_2 레이저 비임이 시료표면에 도달하기까지의 비임의 통과와 초점거리 등을 나타낸 밀러 시스템은 Fig. 3에 나타낸 바와 같고 발진기의 특성은 Table 2와 같으며 측정된 시료의 표면으로부터 촛점높이는 15㎜이었다.

Table 2. Characteristics of 4㎾ resonator.

발진 방식	GAS FLOW 방식		3축 직교 횡류형
	방 전 방 식		DC 방전
	GAS	조 성	He:N_2/O_2:CO_2=53.9:28.3:2.8
		소비량	85 l /hour
출력 특성	정 격 출 력		4000 watt
	출 력 파		CW
	안 정 도		± 2%
비임 특성	모 드		multi mode
	비 임 직 경		41 ㎜
	발 산 각		3 mrad

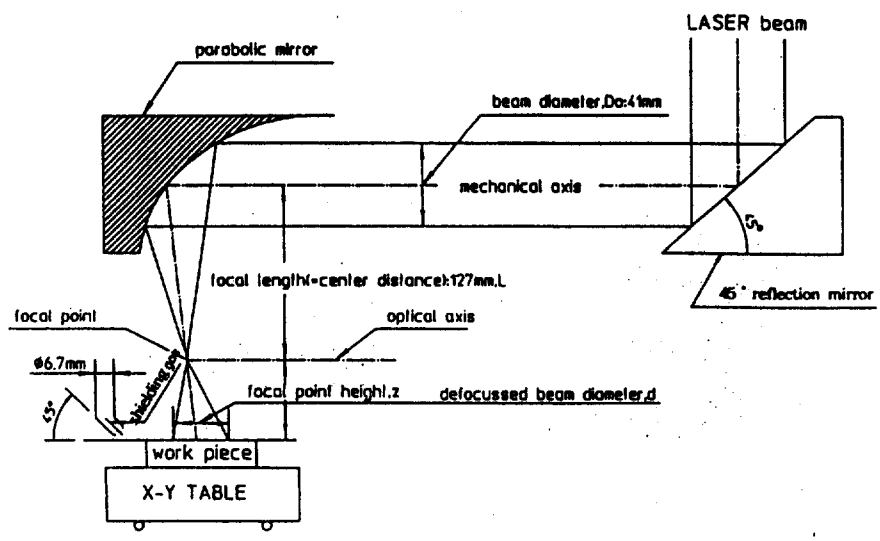

Fig. 3 Experimental set up using parabolic mirror.

레이저 표면경화 처리용 시편은 X-Y테이블에 고정하여 조사속도를 달리하면서 실시하였으며 시편 표면의 산화방지와 플라즈마 제거를 위해 사용되는 차폐가스(shielding gas)로는 아르곤 가스를 사용하였다.

2.3 레이저 표면경화 처리조건

레이저 표면경화 처리조건은 표면경화처리가 가능한 조건인 용융이 일어나지 않는 범위내의 비임조건으로 한 것이며, Table 3에 나타낸 바와 같이 비임직경은 일정하게 하고 출력밀도 변화와 조사속도의 변화를 유도하여 실험을 행하였으며 레이저 비임 모우드는 사각형 비임 모우드(rectangular beam mode)를 적용하였다.

Table 1. Chemical composition of specimen. (wt.%)

specimen	power density (w/cm^2)	traverse speed (m/min)	defocussed beam diameter(mm)
gray cast iron	1911, 2548, 3185, 3822	1.5, 2.0, 2.5, 3.0	2.0

2.4 현미경 조직 관찰

레이저 비임으로 조사된 시편 표면경화부의 미세조직을 관찰하기 위해 2% nital로 부식시킨 후 광학현미경(optical microscope, Nicon NEC-5)을 사용하여 관찰하였으며 압축잔류응력의 세기에 영향을 미치는 표면경화부의 마르텐사이트의 미세조직을 고찰하기 위해 주사전자현미경(scanning electron microscope, HITACHI, S2400)을 사용하였다.

2.5 단면경도 시험

레이저 비임으로 조사된 시편의 단면경도 측정을 위해 시료표면을 0.3μm 알루미나 분말로 정마(polishing)한 후 미소 비커스 경도시험기(micro Vickers hardness tester, Matsuzawa KVKE)를 사용하여 하중 300g으로 고정하고 경화부 최외표면으로부터 중심부에 이르기까지 0.05mm 간격으로 측정하였다. 경도 측정 후 표면경화부의 경도치가 시편의 최외표면으로부터 Hv-450의 경도치를 나타내는 깊이까지를 유효경화깊이(effective case depth)로 설정하였다.

2.6 마모시험

마모시험은 Fig. 4에 나타낸 바와 같은 스즈키형 마모시험기(Suzuki-type wear testing machine, TOYO BALDWIN, Model EFM-Ⅲ-E)를 사용하여 실시하였다. 마모시험전 시험편을 에머리 페이퍼(emery paper) #1200으로 마찰면 조도를 Rm=0.1 μm로 균일하게 정밀연마한 후 즉시 3분간 초음파 세척을 한 후 건조시켜 화학 천칭(chemical blance, Metter, Model H-8)을 사용하여 마모시험전의 시험

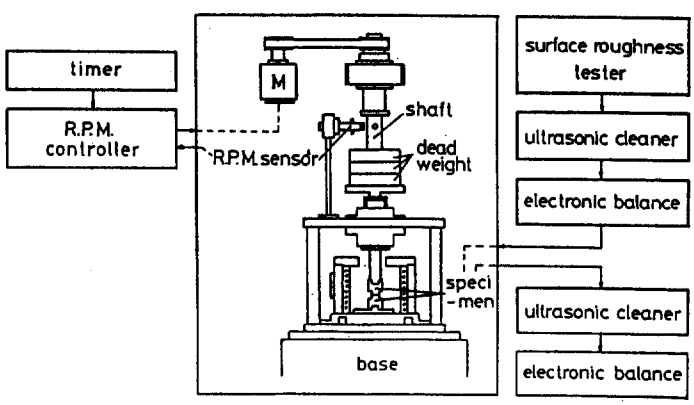

Fig. 4 Block diagram of wear testing machine.

편의 무게를 각각 측정후 표준 시험편을 하부에, 레이저 표면경화 처리된 시험편을 상부에 고정하여 대기중에서 하중(load)을 2.75*kgf* 및 미끄럼 속도(sliding speed)를 0.54m/sec로 일정하게 하여 미끄럼 거리(sliding distance)를 변화시켜 시험한 다음 마찰면에 부착된 마멸분 및 산화물을 제거하기 위해 다시 3분간 초음파 세척을 한 후 건조시켜 화학천칭을 사용하여 마모시험 후의 무게 감량을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 현미경 조직

파장이 10.6μm의 긴파장과 4kW의 고출력을 가지는 CO_2레이저를 이용하여 레이저 빔 직경을 2mm으로 일정하게 하고, 2.0m/min의 조사속도와 3185w/cm^2의 출력밀도의 조건에서 레이저 표면경화 처리된 회주철의 현미경 조직을 Fig. 5에 나타내었다. 현미경 조직 관찰은 그림에서 나타낸 바와 같이 표면경화부의 최표면(a), 내부(b) 및 기지조직(c)으로 하였으며 최표면부에서는 단위 면적당 입열되는 고열원의 레이저 빔과 시료와의 상호작용에 의해 오스테나이트 온도구간으로 가열되어 냉각된 내부에 의해 자기켄칭되어 마르텐사이트 조직을 나타내고 있다. 최표면에서는 편상흑연이 레이저 빔에 의해 일부는 분해되어 기지에 고용되었기 때문에 기지의 Ms점이 강하하여 마르텐사이트 변태가 완료되지 못한 미량의 잔류오스테나이트도 나타남을 알 수 있다. (b)에서는 미세한 마르텐사이트 조직을 나타내고 있는데 이는 레이저 비임

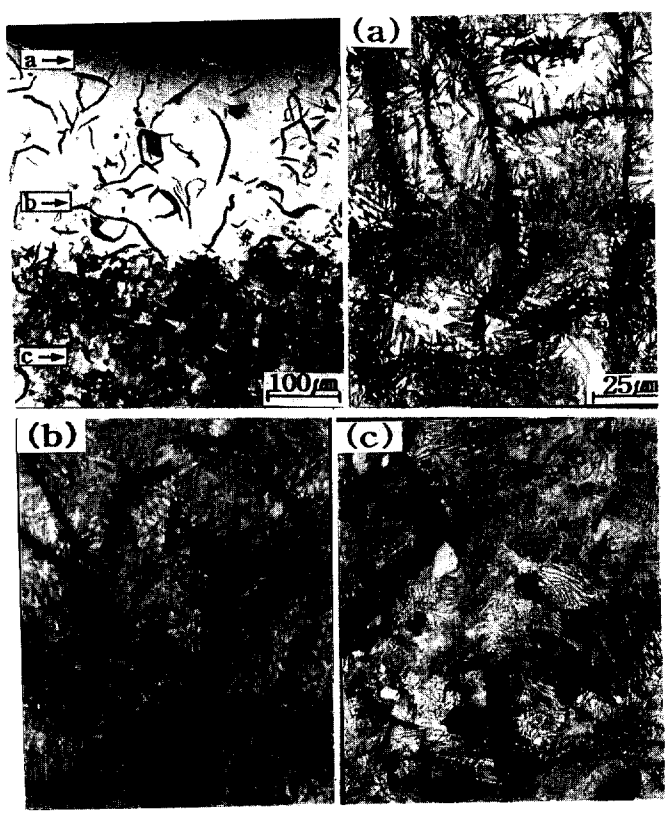

Fig. 5 Optical microstructures of gray cast iron coated with black paint and laser surface hardened for power denesity of 3185w/cm^2 and traverse speed of 2.0m/min.
(a) outside hardened zone, (b) inside hardened zone, (c) substrate

강도가 최표면부보다 약하여 열영향력이 감소됨에 따른 현상으로 나타난다. 또한 마르텐사이트 형상도 최표면부보다는 비교적 균일하게 전면에 걸쳐 미세하게 분포하고 있음을 알 수 있다. 레이저 빔에 대한 열영향이 미치지 못하는 기지(substrate)에는 미세한 펄라이트와 미량의 페라이트 및 편상흑연으로 구성되고 있음을 알 수 있다.

3.2 경도 특성

동일한 출력밀도하에서 조사속도를 1.5m/min에서 3.0m/min으로 증가시켜 레이저 표면경화 처리한 후 표면경화부에 분포하는 경도특성을 Fig.6과 Fig.7에 각각 나타내었다. Fig.6은 1911w/㎠의 출력밀도에서 조사속도의 변화에 따른 경도분포 곡선을 나타낸 것으로서 조사속도가 증가할수록 표면층의 경도분포는 최표면경도 범위가 Hv=650±15로 나타나며 내부로 갈수록 경도치는 현저히 감소하게 나타나며 표면에서 0.2㎜ 부위에서 급격한 경도하락곡선을 나타내는데 이는 고열원의 레이저 비임과 시료표면과의 상호작용 시간이 0.1sec~1sec의 극히 짧기 때문에 시료의 내부로까지 충분한 비임열원의 전달이 안되어 급속가열 경화깊이가 감소하기 때문에 나타나는 전형적인 레이저 표면경화 처리후의 경도분포 곡선[18,19]과 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 8과 Fig. 9는 1911w/㎠에서 3822w/㎠의 출력밀도를 변화시키고 조사속도를 일정하게 하여 레이저 표면경화 처리한 후의 표면경화층에 분포된 경도곡선을 나타낸 것으로서 조사속도가 빠를수록 경도분포는 현저히 감소하게 나타남

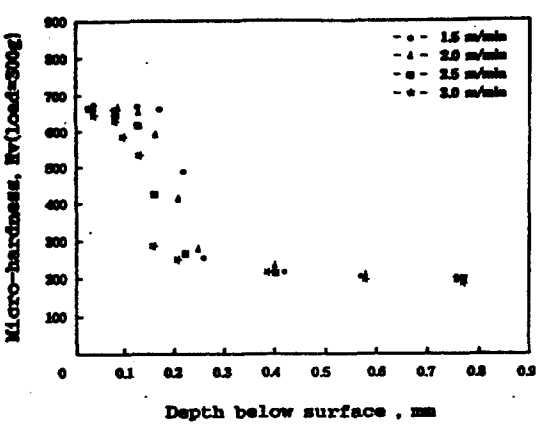

Fig. 6 Relation between hardness and depth below surface of gray cast iron coated with black paint and laser surface hardened for different traverse speeds with a power density of 1911w/㎠.

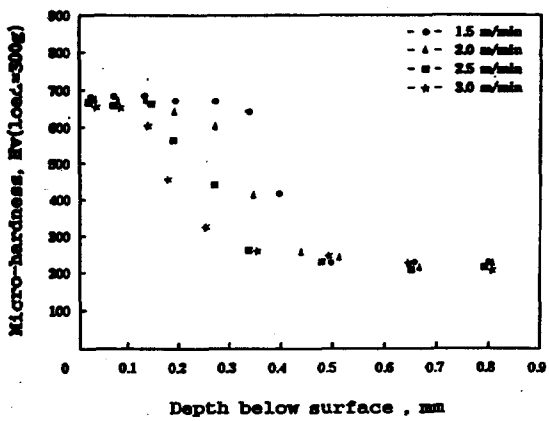

Fig. 7 Relation between hardness and depth below surface of gray cast iron coated with black paint and laser surface hardened for different traverse speeds with a power density of 3185w/㎠.

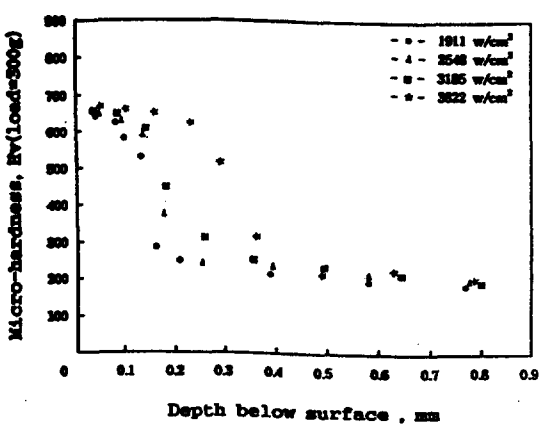

Fig. 8 Relation between hardness and depth below surface of gray cast iron coated with black paint and laser surface hardened for different power densities with a traverse speed of 2.0m/min

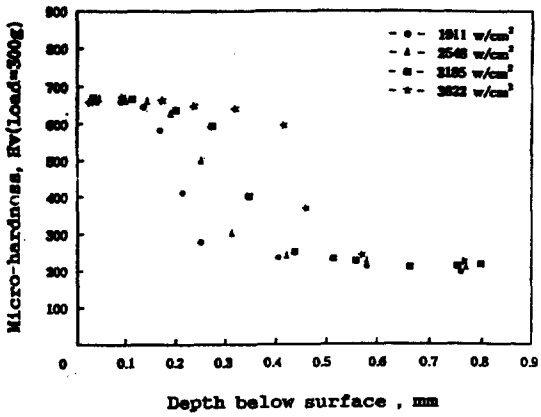

Fig. 9 Relation between hardness and depth below surface of gray cast iron coated with black paint and laser surface hardened for different power densities with a traverse speed of 3.0m/min

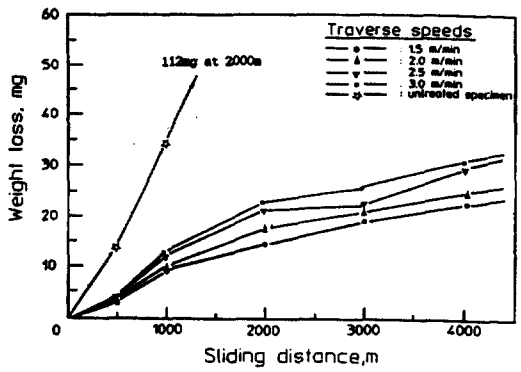

Fig. 10 Relation between weight loss and sliding distance of gray cast iron coated with black paint and laser surface hardened for different traverse speeds with a power density of 1911w/㎠.

을 알 수 있다. 시료 내부의 기지에서의 경도치는 Hv=240 정도로 나타나 레이저 표면경화 처리한 시료의 표면경도치가 현저히 높게 나타남을 알 수 있다. Fig. 8과 같이 20m/min의 동일한 조사속도에서 출력밀도의 증가에 따른 경도분포는 시료 내부로까지 급격히 증가하는데 이는 출력밀도의 변화조건이 Fig. 8과 같이 2.0m/min의 동일한 조사속도에서 출력밀도의 증가에 따른 경도분포는 시료 내부로까지 급격히 증가하는데 이는 출력밀도의 변화조건이 Fig. 6과 같은 조사속도의 변화조건보다 레이저 표면경화처리시 효과적으로 제어할 수 있는 것으로 사료된다.

3.3 마모특성

레이저 표면경화 처리된 시료의 마모특성을 규명하기 위하여 행해지는 마모기구는 미끄럼 마모(sliding wear), 연삭 마모(abrasive wear), 부식 마모(erosive wear), 절단기구 마모(cutting wear) 등이 있다[16]. 기계공업이 발달하여 공작기계, 내연기관 등이 개발됨에 따라 마모특성 규명은 필수적이며 레이저 표면경화 처리가 실용화되고 있는 실린더 라이너, 피스톤 링 등은 기기부품의 왕복운동에 따른 상호 접촉으로 인해 미끄럼 마모가 마모의 주요소로 작용된다.

Fig. 10은 레이저 표면경화 처리되지 않은 시료와 1911w/㎠의 동일한 출력밀도에서 조사속도를 증가시켜 레이저 표면경화 처리한 시료의 마모시험 후 마모량을 나타낸 것으로서 처리되지 않은 시료는 미끄럼 거리가 2000m에서 112㎎으로 나타나고 레이저 경화처리한 시료는 동일한 미끄럼 거리에서 마모량이 13㎎에서 22㎎으로 나타나 레이저 표면경화 처리된 시료의 마모특성이 우수함을 알 수 있다. 미끄럼 마모에서 작용하는 마모인자로는 미끄럼 거리, 하중, 경화깊이에 관련된다고 보고되어진다[19]. 따라서 조사속도가 증가할수록 미끄럼 거리에 따른 마모량이 증가하는데 이는 Fig. 6에 나타난 경도분포 곡선에서 경화깊이가 감소하게 나타나 경화깊이에 따르는 마모량의 차이를 나타내는 것이다. Fig. 11은 출력밀도를 3185w/㎠으로 증가시켰을 때의 미끄럼 거리에 따르는 마모량의 변화를 나타낸 것으로서 미끄럼 거리가 3000m에서 마모량의 증가속도가 2000m에서보다 감소하는 현상은 미끄럼 마모가 진행되면서 편상흑연이 윤활제 역할을 하여 시료 상호간의 마찰력을 떨어뜨리는 데에 기인한다고 사료된다.

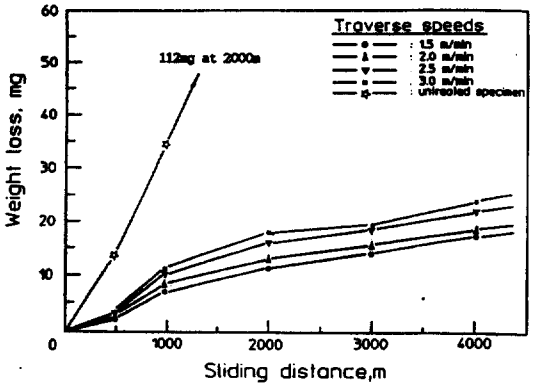

Fig. 11 Relation between weight loss and sliding distance of gray cast iron coated with black paint and laser surface hardened for different traverse speeds with a power density of 3185w/㎠.

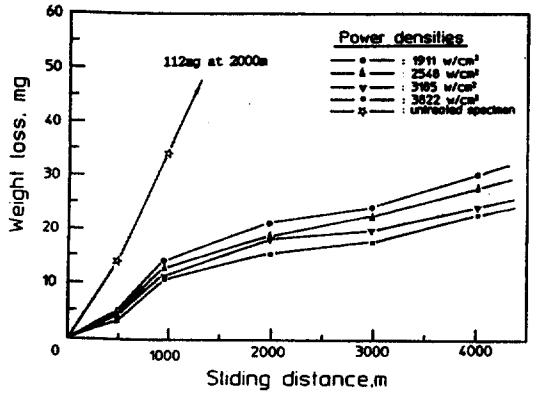

Fig. 13 Relation between weight loss and sliding distance of gray cast iron coated with black paint and laser surface hardened for different power densities with a traverse speed of 3.0min.

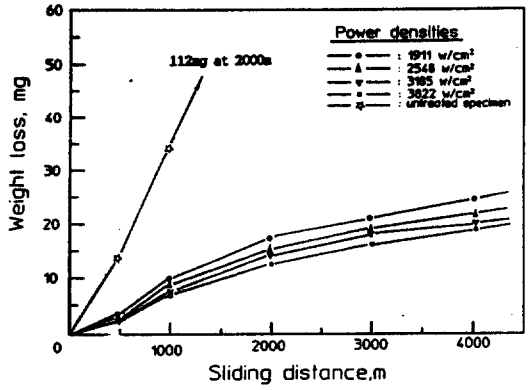

Fig. 12 Relation between weight loss and sliding distance of gray cast iron coated with black paint and laser surface hardened for different power densities with a traverse speed of 2.0m/min.

Fig. 12는 2.0m/min의 동일한 조사속도하에서 출력밀도의 변화에 따르는 미그럼 거리에 따르는 마모량의 변화를 나타낸 것으로서 2000m 이후로 마모량이 감소하고 4000m 이후에서는 미세한 미량의 마모량의 변화가 나타남을 알 수 있는데 이는 시료의 두 면의 접촉을 방해하여 응착마모를 감소시키는 경마모(mild wear)가 일어나 마모량의 증가속도가 감소하는 것이라 여겨진다.

Fig. 13은 조사속도를 3.0m/min으로 증가시켰을 때의 미끄럼 거리에 따른 마모량의 변화를 나타낸 것으로서 동일한 출력밀도에서 조사속도가 증가할수록 경도분포 곡선에서 내부로 경도분포가 감소하게 나타나 Fig. 12보다 마모량이 증가되는데 이는 단위 면적당 레이저 빔의 입열량이 조사속도의 증가에 따라 감소되어 표면경도치 낮아 미끄럼 거리에 따른 마모량이 증가하는 것임을 알 수 있다. Fig. 14는 2000m의 미끄럼 거리에서 레이저 표면경화 처리한 시료와 처리되지 않은 시료의 마모시험 후 표면을 광학현미경으로 고찰한 것으로서 경화처리하지 않은 시료는 극심한 마모에 따라 표면에 산화물이 덩어리 형태로 잔존함을 알 수 있으며 조사속도가 증가할수록 산화물의 잔존량은 증가되는데 이는 표면경도의 감소에 따른 마모량의 증가로 인하여 산화물의 양도 증가되어 덩어리 형태로 잔존함을 나타낸다고 사료된다.

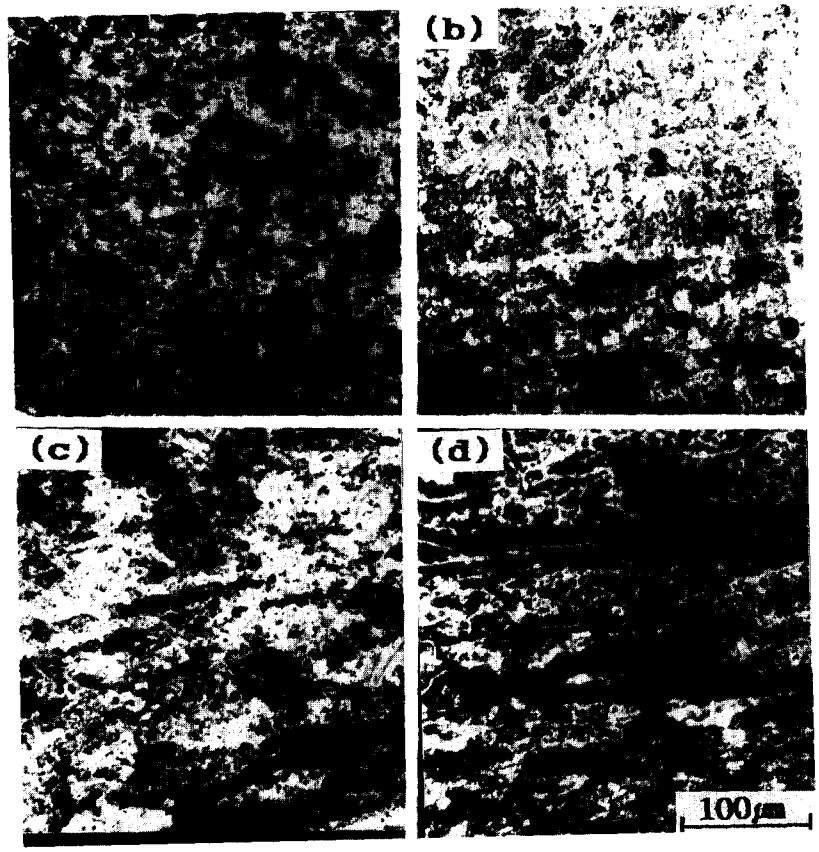

Fig. 14 Optical microstructures showing wear surface at 2000㎜ of sliding distance for the following different traverse speeds at a given power density of 3185w/㎠ to compare with an untreated specimen. (a) untreated specimen, (b) 1.5m/min, (c) 20.m/min, (d) 3.0m/min

4. 결 론

레이저 비임 모우드와 직경을 일정하게 유지하고 출력밀도와 조사속도를 변화시키면서 레이저 표면경화 처리된 회주철의 현미경조직, 경도특성 및 내마모특성에 관한 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 주어진 조사속도와 출력밀도에서 회주철의 현미경조직 특성은 최표면경화부에서 조대한 마르텐사이트와 미량의 잔류오스테나이트로 구성되며 경화부 내부에서 미세한 마르텐사이트로 나타난다.
2. 회주철의 최대표면경도 범위는 Hv=650±15이며 출력밀도가 증가하고 조사속도가 감소할수록 경도분포는 단위 면적당 입열량의 증가로 인해 경화층 깊이가 증가함을 나타낸다.
3. 미끄럼 거리에 따라 동일한 하중하에서 레이저 표면경화 처리된 시료의 표면상태는 내마모성이 우수한 상태로 나타나며 레이저 표면경화 처리되지 않은 시료의 마모상태는 심한 마모로 인한 산화물의 흡착현상이 나타난다.
4. 동일한 하중하에서 미끄럼 거리에 따른 레이저 표면경화 처리된 시료의 마모량은 출력밀도가 높고 조사속도가 느릴수록 현저히 감소한다.

참고문헌

1. R. Lin and T. Ericsson: Heat Treatment and Surface Engineering, vol.22, no.5, 1991, p.409.
2. Charles A. Stickels, Larry E. Byrnes: Metal Hand Book(10th ed), vol 4, 1981, p.133.
3. W. Koning, F. Treppe: Industrial Laser Annual Hand Book, Tulsa. Oklahma USA (1989) 118.
4. H. Bande, G.L. Esperance, M.U. Islam, and A.K. Koul: Materials Science and Technology, vol.7(1991) 452.
5. H.W. Bergmann and E. Geissler, Erlangen: ECLAT '88,(1988) 109.
6. R. Dekumbis and A. Frenk, Lausanne: ECLAT '88, (1988) 134.
7. C. Banas, R. Nuss: ECLAY '90, (1990) 103.
8. M.F. Ashby, K.E. Easterling and W-B Li: Laser Processing of Materials AIME, (1984) 225.
9. James I. Luxon, David E. Parker: Industrials and their Applications, (1985) 222.
10. S. Mandziej, M.C. Seegers, J. Godijk: Materials Science and Technology, vol 6 (1990) 350.
11. Victor, G. Gregson: Laser Processing, vol. 668 (1986) 1.
12. G.L. Olson and J.A. Roth: Laser Processing, Laser Inst of America. Toledo, vol 668 (1986) 82.
13. Rosenthal L. Engel: Source Book on Applications of the Laser in Metalworking, ASM, Metals Park (1976) 149.
14. R. Padmanabhan: Laser Materials Processing ICALEO '86 (1986) 185.
15. D.S. Gnanamuthu: Source Book On Application of the Laser in Metalworking, AEM. Metals Park, (1976) 324.
16. P.A. Molian: Surface Modification Technologies, AIME (1988) 237.
17. H.E. Cline and T.R. Anthony: J. of Applied Physics, vol 48, no. 9 (1977) 3895.
18. C. Dawes and D.F. Tranter: Heat Tratment of Metals, vol 4 (1974) 121.
19. P.W. Leech: Wear, vol 86 (1986) 315.