

CO₂레이저 表面硬化 처리된 灰鑄鐵의 疲勞特性에 관한 研究

박 근 웅, 한 유 희*, 이 상 윤

동아대학교 금속공학과

*한국기계연구원 레이저가공기술연구회

Study on the Fatigue Resistance of Gray
 Cast Iron in CO₂ 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 some effects of the power density and traverse speed of laser beam on the optical microstructure, hardness and fatigue resistance of gray cast iron treated by laser surface hardening technique.

Optical micrograph has shown that the dissolution of graphite flakes and the coarsening of lath martensite tend to increase with a small amount of retained austenite as the power density increases under the condition of a given traverse speed. Hardness measurements have revealed that as the power density increases, hardness values of outermost surface layer increases from Hv=620 to Hv=647 in case of traverse speed of 2.0m/min at gray cast iron. Fatigue test has exhibited that the fatigue strength of laser surface hardened specimen is superior compared to that of untreated specimen, showing that values for the fatigue strength at $N_f=10^7$ of gray cast iron laser-surface-hardened at a low power density of 4076w/cm² and a high power density of 8153w/cm² under the condition of a given traverse speed of 2.0m/min are 15kg/mm² and 20kg/mm², respectively, whereas the fatigue strength of untreated specimen is 11kg/mm². Under high stress-low cycle condition a normal brittleness fracture appears, whereas a ductile fracture with beach mark is observed in the specimen tested under low stress-high cycle condition.

1. 서론

현대산업이 급속도로 발전함에 따라 내충격성, 내마모성, 내피로성 및 고강도를 유지할 수 있는 선진산업의 주요 생산품인 자동차, 전동차, 선박, 항공기 등의 반복 하중과 국부응력을 많이 받는 기계부품 등에 행해지는 레이저 표면경화 열처리는 부품의 효율성을 극대화시키며 수명을 연장시킨다^{1)~5)}. 레이저 표면경화 처리는 질화(nitriding), 침탄(carburizing), 고주파 표면경화(induction surface hardening) 등의 종래의 표면경화 처리보다 부품의 국부적 위치에 선택적 경화처리를 가장 적합하게 적용시킬 수 있고 요구하는 기계적 성질을 충족시킬 수 있으며 또한 처리시간이 짧고 처리공정이 간단한 자동화 시스템으로 구성되어 처리에 따른 부품의 품질과 경제성을 향상시킬 수 있다.⁶⁾

레이저 표면경화 처리시 주요 경화인자로는 레이저 비임 모드(beam mode), 비임 직경(beam diameter), 출력밀도(power density), 조사속도(traverse speed)^{7)~9)} 등이 있다. 고열원의 레이저 비임에 의해 부품표면의 경화구역에는 아주 복잡한 공학적 성분의 경화 효과가 나타나며 이로 인해 부품의 표면거칠기(surface roughness)도 레이저 경화인자의 변화에 따라 달리 나타나므로 이러한 표면 거칠기에 따라 피로거점이 미시적으로 발생하여 피로강도에 악영향을 끼치기도 하여 부품 표면 상태의 충분한 검토가 필요하기도 하다.

레이저 표면경화 처리된 주철은 표면으로부터 일정한 깊이 범위에서는 경도치가 대단히 높게 나타나고 재료내부는 상대적으로 연성의 성질을 나타낸다. 이러한 구조적 특성 때문에 피로특성은 표면경화 조건 즉, 경화깊이(hardening depth), 미세조직(microstructures), 표면경도(surface hardness), 압축 잔류응력(compressive

residual stress), 표면으로부터 심부의 경도분포도 등에 의해 영향을 받는다고 보고^{9)~11)}되고 있다. 일반적으로 회주철재 부품의 레이저 표면경화 처리속도는 일반 강제보다 빠르며 레이저 비임의 흡수력이 강제보다 우수하여 표면의 극히 미소한 깊이에서 빠른 비임의 열적확산과 우수한 자기퀵칭(self-quenching)으로 경화처리된다.^{5)~10)~13)}

본 연구에서는 회주철을 시료로 사용하여 레이저 비임 모드와 비입직경을 일정하게 하고 조사속도와 출력밀도를 각각 달리 변화시켜 레이저 표면경화 처리 후 현미경 조직 및 경도분포 특성을 고찰하고 레이저 표면경화 인자에 따른 피로특성을 규명하고자 하였다.

II. 실험방법

1. 시험편 준비

1.1 시료

본 연구에 사용된 시료는 일반적으로 상용되는 회주철이며 시료의 화학조성은 Table. 1과 같다.

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

Specimen	C	Si	Mn	P	S
Gray cast iron	3.45	2.10	0.45	0.10	0.09
Specimen	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
Gray cast iron	0.06	0.08	0.05	0.10	0.01

1.2 피로시험편

본 연구에 사용된 피로시험편은 여러 피로시험편 중 시험편 형상에 대한 레이저 표면경화의 효율성을 위해 오노형 회전굽힘 피로시험편(Ono-type rotary bending fatigue test specimen)을 사용하였으며 피로시험편의 형상과 치수는 Fig. 1에 나타낸 바와 같다.

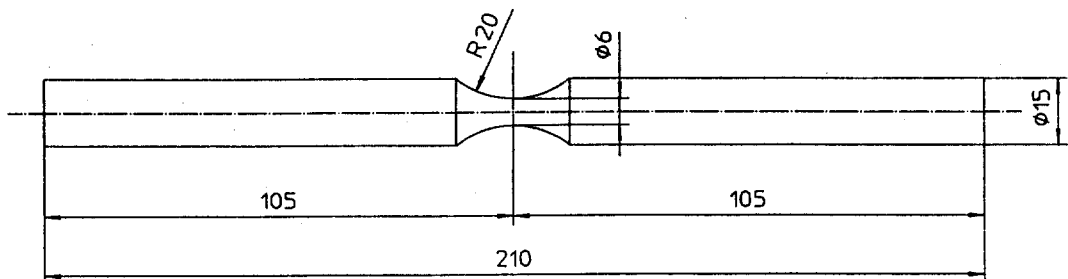


Fig. 1 Configuration and dimensions of rotating bending fatigue test specimen.

2. 잔류응력제거 처리

시험편의 레이저 표면경화 처리하기에 앞서 시험편의 가공중에 형성된 잔류응력을 제거하기 위하여 전기로 (L&L special furnace, 750mm×900mm, 20kW, Model XL244-H422-3-B)에서 650℃에서 1시간 동안 유지한 다음 공랭처리하였다.

3. 표면코팅

시험편 표면의 레이저 비입에 대한 흡수율을 증가시키기 위해 공업적으로 많이 사용된 흑색페인트(black paint)를 사용하였다. 코팅하기 전의 전처리로서는 시험편 표면의 산화막과 불순물을 제거하기 위해 20분간 아세톤 용액에서 충분히 초음파 세척을 행하였다. 흑색 페인트의 코팅 사용방법은 현재 산업분야에서 재료표면의 코팅처리에 많이 사용되는 분무식(spray)으로 2회 반복하여 시험편 표면에 균일하게 코팅하였다.

4. 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 Rofin-Sinar(RS) 840의 연속출력파(continus wavelength, CW) 및 정격출력 4kW의 횡류방식(traverse flow type) CO₂ 레이저 장치이며 발진기(resonator)에서 출력되어 나온 파장 10.6 μ m의 CO₂레이저 비입이 시험편 표면에 도달하기까지의 비입의 통과와 초점거리 등을 나타낸 밀러 시스템(mirror system)은 Fig. 2에 나타낸 바와 같고 측정된 시험편 표면으로부터의 초점높이는 15mm이었다. 레이저 표면경화 처리용 시험편은 Fig. 3과 같이 회전 테이블에 고정하여 필요한 조사속도에 일치하도록 회전속도를 측정하여 실시하였으며 시험편 표면의 산화방지와 플라즈마의 제거를 위해 사용되는 차폐가스(shielding gas)로는 아르곤(Ar)가스 또는 질소(N₂)가스를 사용하였다.

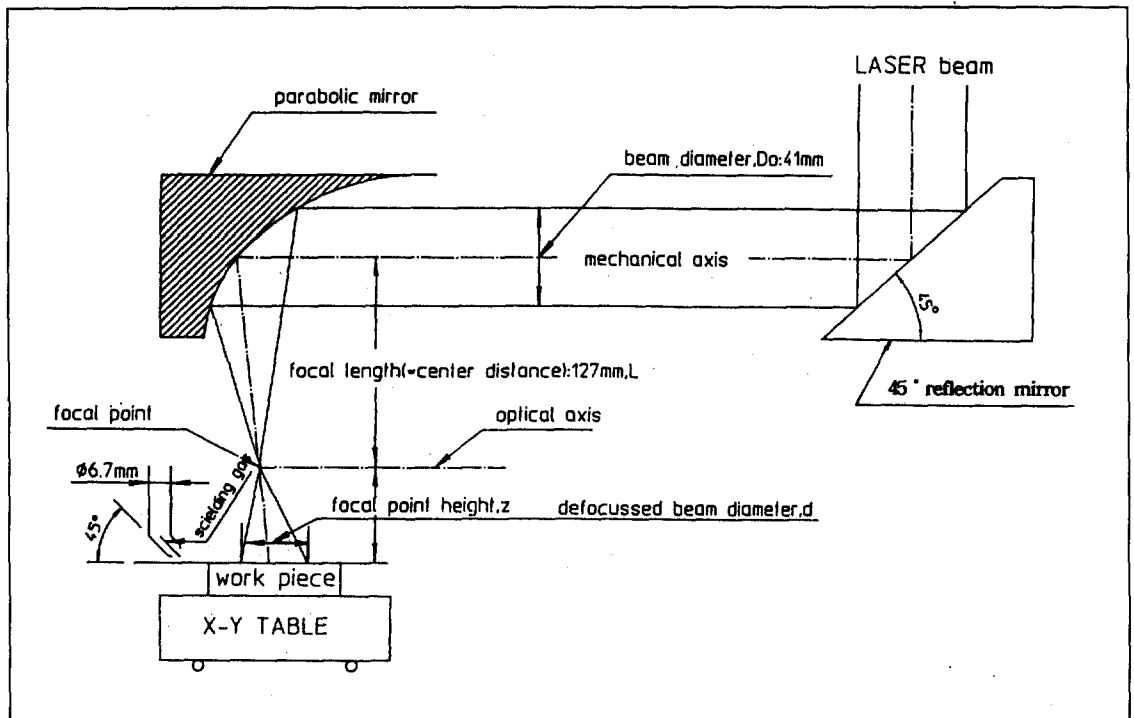


Fig. 2 Experimental set op using parabolic mirror.

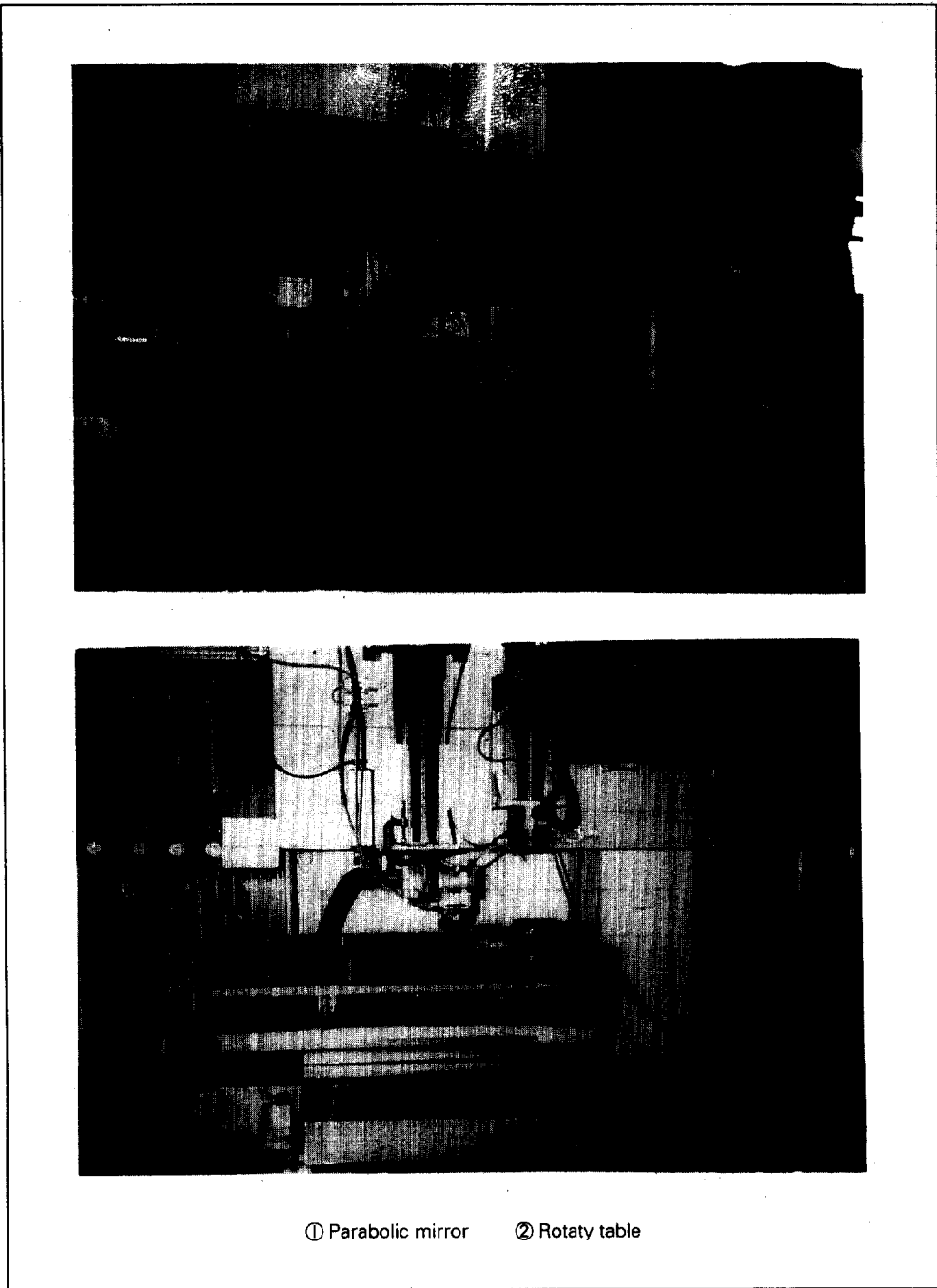


Fig. 3 Output window and specimen holding parts of the laser surface hardening equipment.

5. 레이저 표면경화 처리

레이저 표면경화 처리조건은 Table. 3과 같으며 사각형 비임 모우드를 사용하여 아래의 조건으로 실험을 행하였다.

Table. 3 Experimental condition for laser surface hardening treatment

specimen	power density (w/cm ²)	traverse speed, (m/min)	defocussed beam diameter, (mm)
gray cast iron	4076, 6114, 8153	2.0, 2.5	5.0

6. 현미경 조직 관찰

레이저 비임으로 조사된 시험편 표면 경화부의 미세조직을 관찰하기 위해 2% nital로 부식시킨 후 광학현미경(optical microscope, Nikon NEC-5)을 사용하였다. 피로시험 후 시험편의 피로파괴 조직과 피로파괴 양상을 고찰하기 위해 주사전자현미경(scanning electron microscope, JEOL, JSM-35CF)을 사용하였다.

7. 단면경도 시험

레이저 비임으로 조사된 시험편의 단면경도 측정을 위해 시료표면을 0.3 μ m 알루미나 분말(Al₂O₃ powder)로 정마한 후 미소 비커스 경도시험기(micro Vickers hardness tester, Matsuzawa KVKE)를 사용하여 하중 300g에서 경화부 최외표면으로부터 중심부에 이르기까지 0.05mm 간격으로 측정하였다. 경도측정 후 표면경화부의 경도치가 최외표면으로부터 Hv=450의 경도치를 나타내는 깊이까지를 유효경화깊이(effective case depth)로 설정하였다.

8. 피로시험

레이저 표면경화 처리 후 시험편의 피로시험은 Fig. 4에 나타낸 바와 같으며 오노형 피로시험기(Ono-type fatigue testing machine, Japan, Model C-4201)를 사용하여 실시하였다. 피로시험 전 시험편을 에머리 페이퍼 #1500으로 시험편의 표면조도를 Rm=0.1 μ m로 균일하게 정밀 연마한 후 즉시 3분간 초음파세척을 행하였다. 시험편의 중심에서 좌우 각각 50mm 되는 지점에 고정시킨 후 3450 r.p.m의 균일한 회전속도하에서 하중 0.5kg~10kg 범위로 응력변화를 실시하였다.

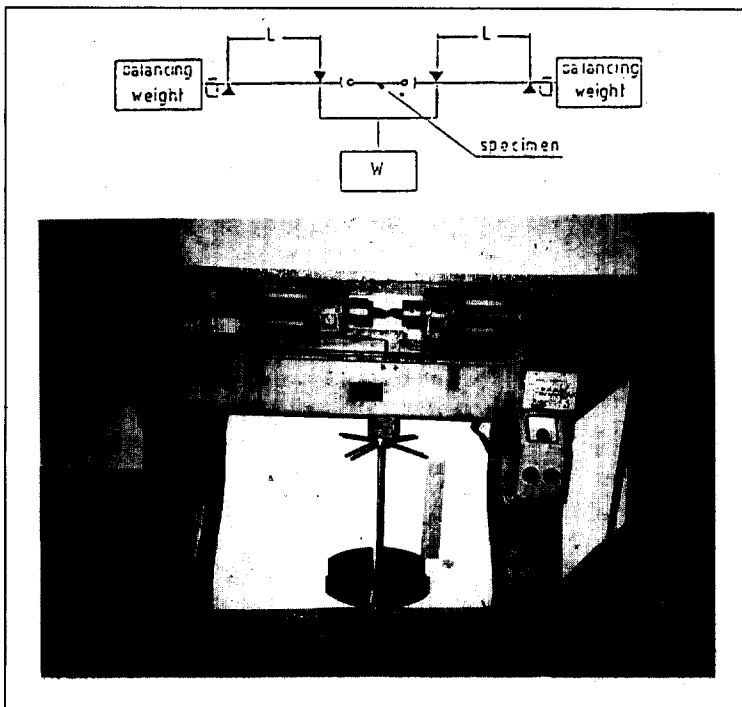


Fig. 4 Mechanism of ono-type rotary bending fatigue machine.

III. 실험결과 및 고찰

1. 현미경 조직

레이저 표면경화 특성을 고찰하기 위하여 2.0m/min의 주어진 동일한 조사속도에서 출력밀도의 변화에 따른 회주철의 레이저 표면경화 처리후 광학현미경 조직을 Fig. 5의 a, b 및 c에 각각 나타내었다. 출력밀도가 4076W/cm²에서 8153W/cm²으로 증가됨에 따라 나타나는 레이저 표면경화 처리된 시험편의 경화깊이는 현저히

증가함을 알 수 있고 8153W/cm²의 고출력밀도하에서는 단위 면적당 시험편 표면에 도달되는 레이저 비입의 입열량이 극도로 증가됨과 동시에 비입강도가 증가하므로 이에 6114W/cm²보다 경화깊이가 큰 폭으로 증가됨을 알 수 있다. 또한 비입 강도의 세기에 의한 편상흑연의 분해가 일어나 일부는 기지조직에 고용되며 나머지는 미세한 편상흑연의 형상으로 잔존함을 알 수 있다. Fig. 6은 출력밀도 조건을 Fig. 5와 동일하게 한 후 조사속도를 2.5m/min으로 증가시켜 레이저 표면경화 처리후에 나

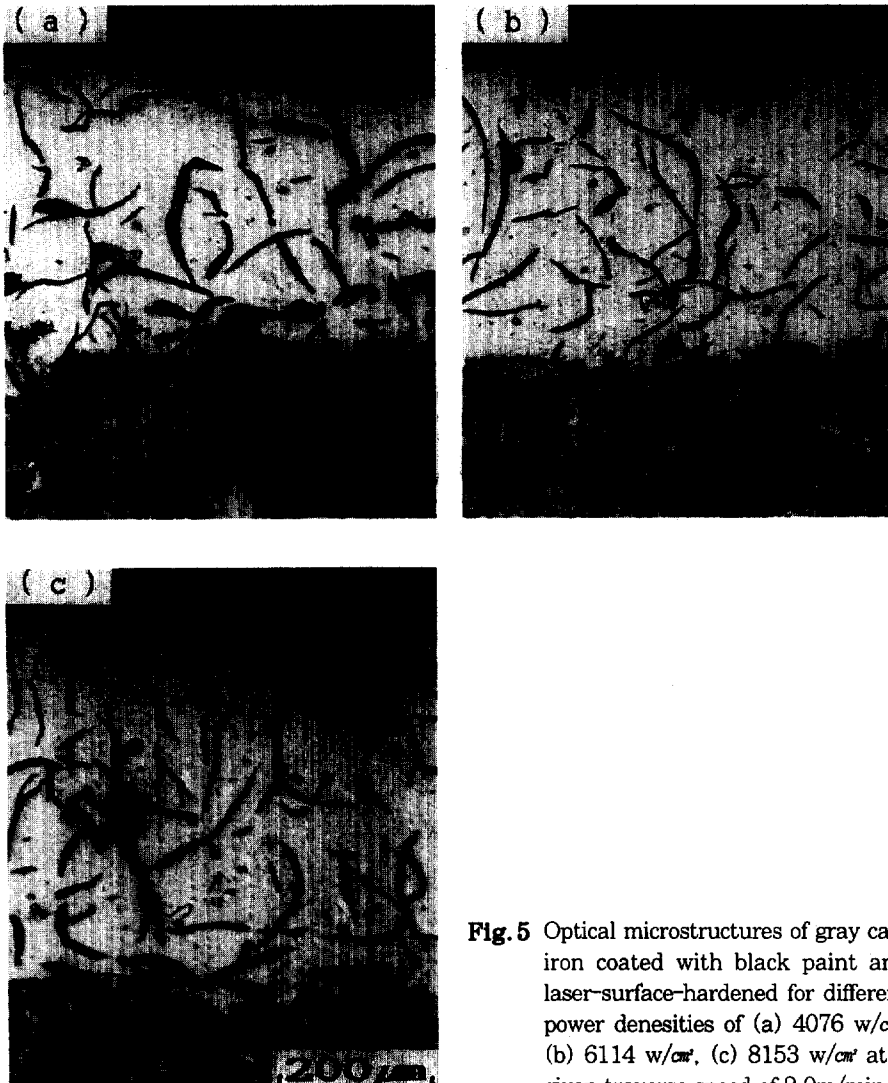


Fig. 5 Optical microstructures of gray cast iron coated with black paint and laser-surface-hardened for different power densities of (a) 4076 w/cm², (b) 6114 w/cm², (c) 8153 w/cm² at a given traverse speed of 2.0m/min.

타나는 현미경 조직을 나타낸 것으로서 Fig. 5보다는 경화깊이가 다소 감소됨을 알 수 있으며 비임의 재료 표면에 조사되는 상호접촉시간(interaction time)이 조사속도의 증가에 따라 상대적으로 비임강도의 저하가 발생하여 경화깊이가 감소하는 것이라 생각되며 (a) 및 (b)와 같이 표면에 분포하는 편상흑연의 형상도 일정한 방향으로 규칙적으로 분포하고 있으며 (c)에서는 열영향부(heat affected zone)와 기조직과의 경계부에서 미분해된 편상흑연의 불규칙한 형상이 나타남을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 5와 동일한 레이저 경화 조건하에서 레이저 표면경화 처리한 이후 고배율 광학현미경으로 관찰한 조직을 나타낸 것으로서 출력밀도가 낮은 $4076\text{W}/\text{cm}^2$ 일 때의 마르텐사이트 조직형상은 미세한 라스 마르텐사이트(lath martensite)로 나타난다. 이러한 현상은 출력밀도가 낮아서 단위 면적당 시료표면에 흡수되는 레이저 비임의 입열량과 비임 강도(beam intensity)가 감소함에 따라 최표면층에 변태경화를 위한 오스테나이트 온도 구간까지 충분히 가열되지 못했으며 이로 인해 기지로부터

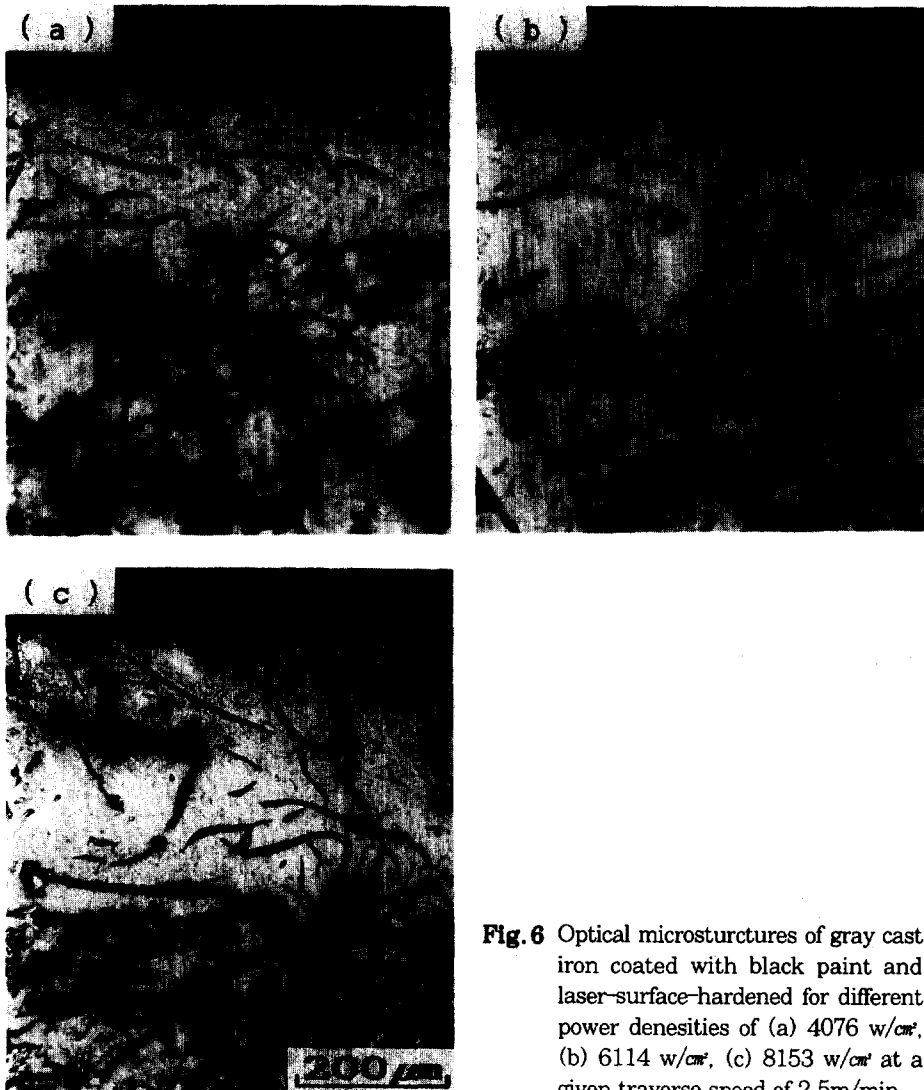


Fig. 6 Optical microstructures of gray cast iron coated with black paint and laser-surface-hardened for different power densities of (a) $4076\text{ w}/\text{cm}^2$, (b) $6114\text{ w}/\text{cm}^2$, (c) $8153\text{ w}/\text{cm}^2$ at a given traverse speed of $2.5\text{m}/\text{min}$.

터의 냉각속도가 감소하고 탄화물을 오스테나이트로 충분히 고용할 수가 없어 표면층의 조직은 미세한 라스 마르텐사이트로 구성되는 것이라 생각된다. 출력밀도가 8153W/cm²으로 증가함에 따라 라스 마르텐사이트의 형상은 조대해지고 편상흑연은 불규칙적으로 분해되어 분포함을 알 수 있다. 또한 출력밀도가 증가함에 따라 기지에 분포되는 마르텐사이트의 형상은 다소 조대해지며 비입강도의 증가에 따른 시료표면의 비입 입열량의 증가로 인해 최표면층은 용점 가까운 고온상태로 가열되어 냉각

됨에 따라 최표면층에는 잔류 오스테나이트가 미량 잔존함을 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 6과 동일한 조건하에서 레이저 표면경화 처리한 이후 고배율 광학현미경으로 고찰한 조직으로서 동일한 출력밀도하에서 조사속도를 증가시켜 시료표면에 도달되는 단위 면적당 비입의 강도를 감소시킴으로써 규칙적인 라스 마르텐사이트를 나타내는 것이라 생각되며 편상흑연의 형상도 규칙적으로 분포하고 있음을 알 수 있다.

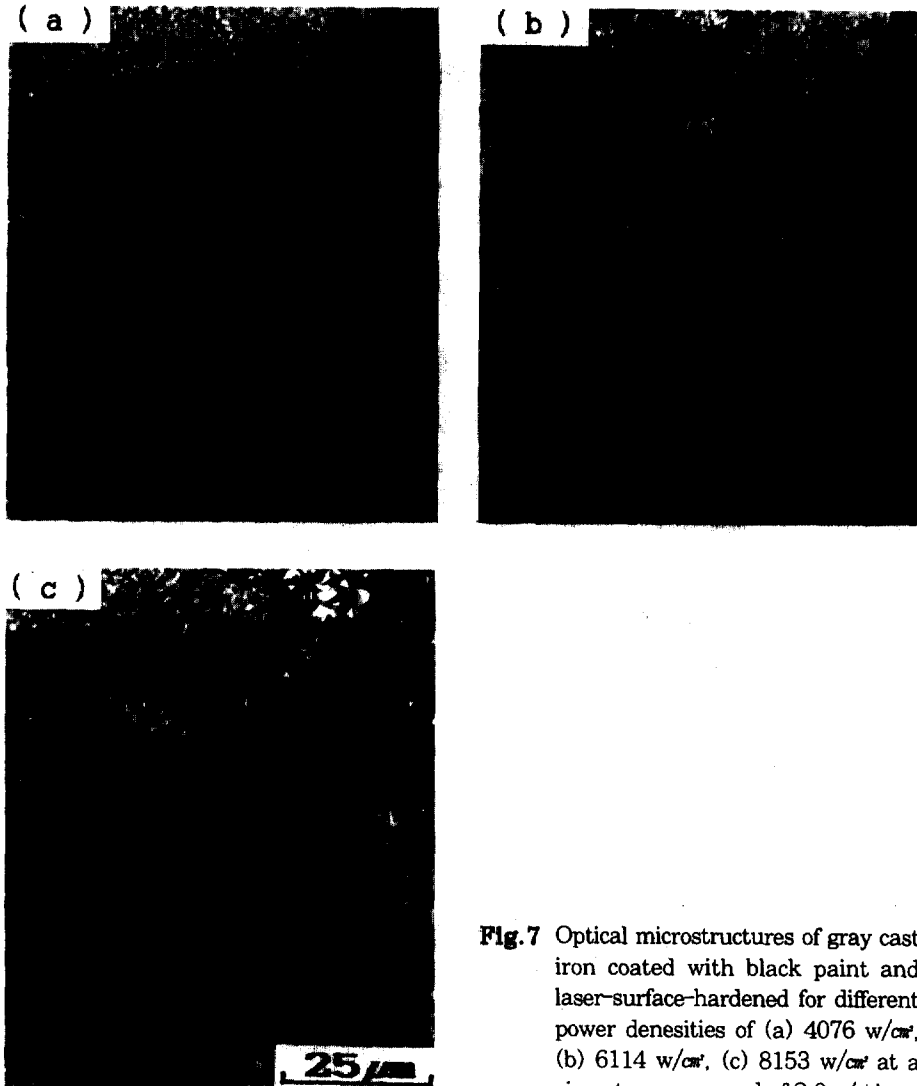


Fig. 7 Optical microstructures of gray cast iron coated with black paint and laser-surface-hardened for different power densities of (a) 4076 w/cm², (b) 6114 w/cm², (c) 8153 w/cm² at a given traverse speed of 2.0m/min.

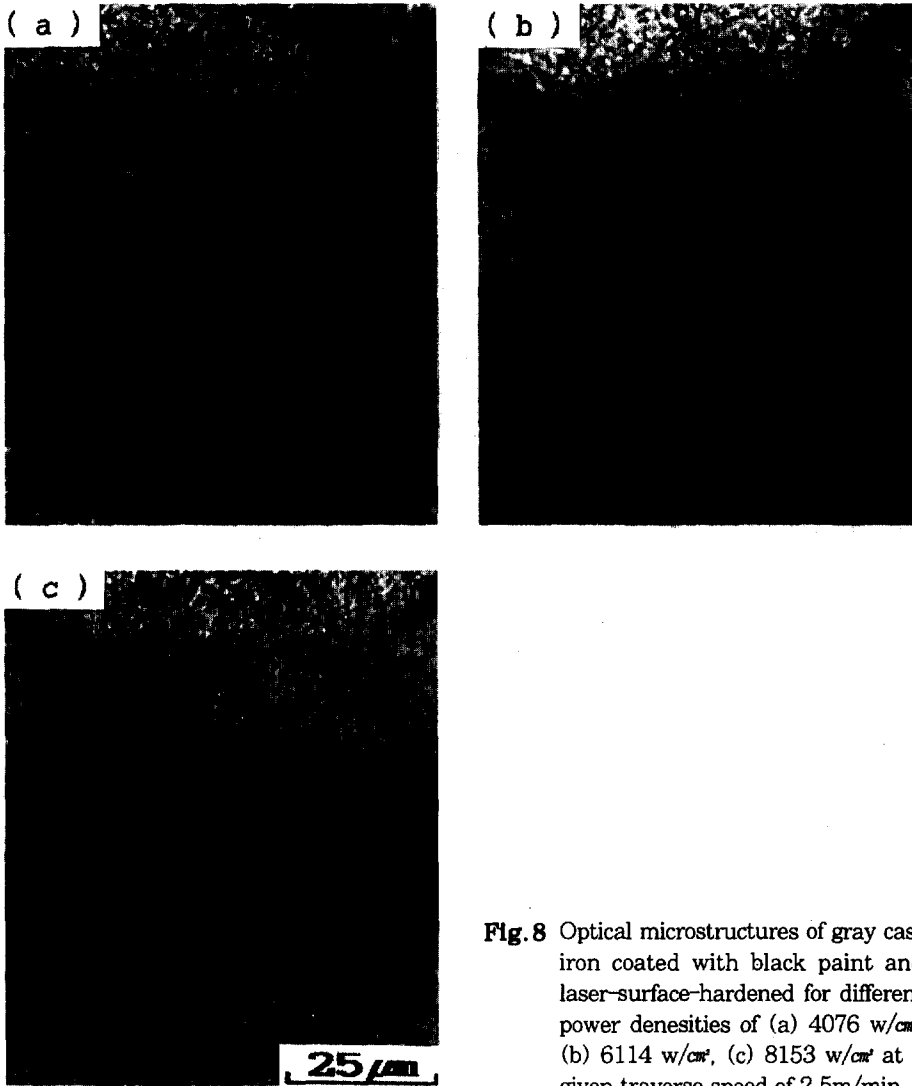


Fig. 8 Optical microstructures of gray cast iron coated with black paint and laser-surface-hardened for different power densities of (a) 4076 w/cm², (b) 6114 w/cm², (c) 8153 w/cm² at a given traverse speed of 2.5m/min.

2. 總 括

2.0m/min의 동일한 조사속도하에서 출력밀도를 달리 변화시키면서 레이저 표면경화 처리된 회주철의 단면 경도 변화곡선을 Fig. 9에 나타내었다. 출력밀도가 4076W/cm²에서 8153W/cm²으로 증가함에 따라 심부까지의 경화깊이는 일정하게 현저히 증가됨을 알 수 있으며 최표면경도는 4076W/cm²의 저출력밀도하에서 Hv=620인 반면 8153W/cm²의 고출력밀도하에서는 Hv=647로 나타남을 알 수 있다. 이러한 현상들은 시료

의 최표면부에 단위면적당 입열되는 고열원의 레이저 비임의 입열량이 동일한 조사속도하에서 출력밀도가 증가하고 비임강도가 증가함에 따라 시료 최표면층의 변태 경화능이 고출력 밀도하에서 우수하게 나타나 경도치가 증가된다고 보고된다^{9), 11)}. 일반적으로 Fig. 9와 같이 경도분포 곡선이 심부에서 급격히 감소하는데 이러한 현상은 레이저 표면경화 처리의 잇점인 최단시간내의 시료표면을 고열원의 레이저 비임으로 경화하는 특성으로 인해 고강도의 레이저 비임이 시료표면부만 급속히 변태경화하기 때문이다.

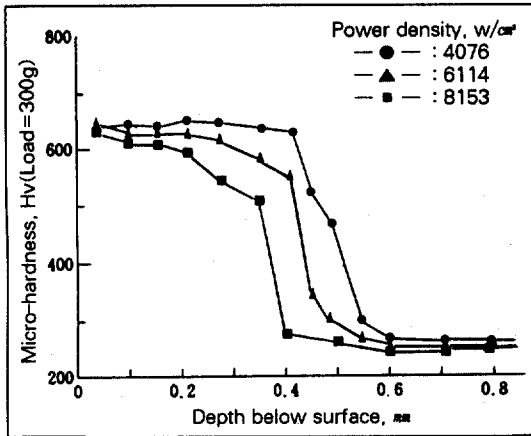


Fig. 9 Relation between hardness and depth below surface of gray cast iron coated with black paint and laser-surface-hardened for different power densities with a traverse speed of 2.0m/min.

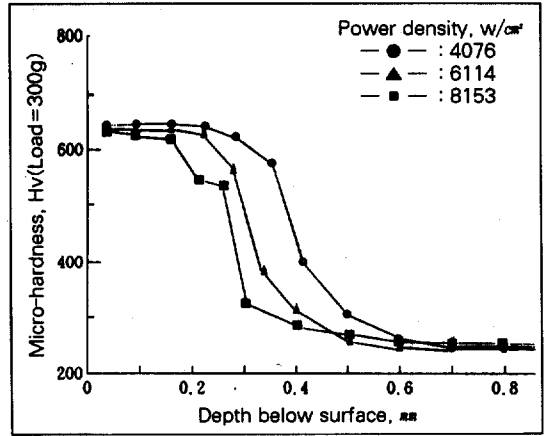


Fig. 10 Relation between hardness and depth below surface of gray cast iron coated with black paint and laser-surface-hardened for different power densities with a traverse speed of 2.5m/min.

레이저 표면경화 처리가 되지 않는 시료내부의 경도분포는 Hv=250 정도로서 레이저 표면경화 처리된 표면부의 경도분포가 현저히 우수하게 나타남을 알 수 있다. Fig. 10은 2.5m/min의 동일한 조사속도하에서 출력밀도의 변화에 따른 레이저 표면경화 처리조건하에서 레이저 표면경화 처리된 회주철의 단면경도 분포곡선을 나타낸 것으로서 4076W/cm²~8153W/cm²의 출력밀도의 증가에 따라 최표면경도는 Hv=620에서 Hv=640으로 증가됨을 알 수 있으며 경도분포 폭은 출력밀도의 증가에 따라 일정하게 현저히 증가됨을 알 수 있다. Fig. 9보다는 조사속도의 증가에 따라 경도분포 곡선이 최표면층에 가깝게 형성되며 0.3~0.4mm에서 경도치의 급격한 감소가 일어남을 알 수 있다. 이러한 현상은 2.5m/min의 동일한 조사속도하에서 출력밀도의 감소에 따라 시료 최표면층의 경도분포는 레이저 열원에 의한 가열시간이 현저히 감소함에 따라 고온으로의 급속 가열깊이가 감소하고 내부의 급냉에 의한 변태경화 깊이가 감소하게 나타나는 것이라 생각된다. 레이저 표면경화 처리는 고열원의 레이저 비입과 재료와의 적정한 상호작용 시간이 필요하다. 주어진 출력밀도와 조사속도를 재료특성과의 상호조화로써 출력밀도의 변화에 따른 최대경화층을 얻을 수 있다.

3. 피로특성

Fig. 11은 2.0m/min의 동일한 조사속도하에서 출력밀도를 4076W/cm²에서 8153W/cm²로 증가시킨 레이저 표면경화 처리 조건하에서 레이저 표면경화 처리 후 피로사이클-사용응력에 따른 회주철의 피로강도 변화를 나타낸 것이다. 일반적으로 레이저 표면경화 처리한 시편과 레이저 표면경화 처리하지 않은 시편과의 피로강도는 피로한도($N_f \geq 10^7$)에서 20kg/mm²과 11kg/mm²로 나타나 큰 차이를 알 수 있으며 저주기 피로사이클에서 고주기 피로사이클로 진행될수록 응력의 변화폭은 완만하게 일정한 감소현상을 나타내고 있다. 레이저 표면경화 처리한 시편의 피로한도($N_f \geq 10^7$)에서의 피로강도치는 큰 폭이 없음을 알 수 있는데 이를 통하여 표면응용의 범위에 포함되지 않는 표면경화 조건에서 살펴보면 동일한 조사속도하에서 출력밀도의 변화폭이 피로강도의 변화 조건이 아니라는 현상을 알 수 있다. 레이저 표면경화 처리하지 않은 시료와의 피로강도는 현저한 차이를 나타내며 따라서 레이저 표면경화 처리의 우수성을 Fig. 11에서 확인할 수 있다. 회주철의 경우 최표면에 분포하고 편상후연 때문에 응력집중은 최표면층에 분해되지 않고 잔류하는 미세 편상후연이 노치역할로 될 수 있으며 이에

따라 일정한 하중을 가하면서 반복응력을 받을시 편상속 연 주위에서 피로기점(fatigue initiation point)이 형성되어 급격하게 파괴인성이 떨어져 피로강도가 감소하여 피로파괴가 일어나기도 한다. Fig. 11 및 12와 같이 회주철의 피로강도는 출력밀도의 증가에 따른 유효경화깊이의 증가와 최표면경도의 증가로 인해 동일한 조사속도하에서 고출력밀도로 증가할수록 현저히 증가됨을 알 수 있다. 회주철의 레이저 표면경화 처리시 표면부의 편상속 연을 완전하게 분해시켜 기지에 고용시킬 수는 없지만 고열원의 레이저 비입에 의한 용접적하의 고온으로 급속 가열시 최표면부에 분포하는 편상속 연을 분해하여 기지에 고용시키고 표면부에 압축잔류응력을 형성시켜 피로강도를 향상시킬 수 있다. 레이저 표면경화 처리시 표면에 형성되는 압축잔류 응력은 대략 200MPa정도로 형성된다. 압축잔류응력의 분포는 재료의 피로강도를 향상시키는 주요소로서 재료표면에서 레이저 비입의 재료내부에 미치는 열영향부(heat affected zone)에 형성되는 응력을 측정하여 레이저 표면경화 처리시 재료표면에 형성되는 잔류응력을 피로강도에 미치는 영향에 대해 보고^{6), 9)}되고 있다.

8153W/cm²의 출력밀도와 2.0m/min의 조사속도의 조건하에서 회주철의 레이저 표면경화 처리 후 고응력범위와 저응력범위에서의 피로파단면을 Fig. 13과 Fig. 14

에 각각 나타낸 바와 같이 응력의 변화에 따른 피로파단면의 큰 차이가 없음을 알 수 있다. Fig. 13의 고응력-저주기 피로 싸이클에서는 표면에 분포하는 편상속 연에 응력집중이 일어나 피로기점으로 시작되어 극히 짧은 피로영역을 거쳐 내부로 급속파단이 일어났음을 알 수 있으며 원상의 시험편 전부분에 피로특성을 나타내고 있다. 시험편 내부는 급격한 파단에 따라 편상속 연의 이탈현상이 나타나며 최표면부는 평활하지 않고 불규칙한 취성과 파괴의 피로파괴 특성을 나타내고 있다. 전반적으로 피로영역이 다소 좁은 것은 표면부에 분포하는 편상속 연 때문에 레이저 표면경화 처리시 레이저 비입의 차단에 의한 레이저 비입의 열영향부의 감소에 따른 경화깊이의 감소현상과 압축잔류응력 분포치의 저하 때문이며 편상속 연의 일정한 비율로 인하여 피로가 진행될 피로기점이 고응력 저주기 싸이클인 경우 시험편 "origin"부에서 시작되어 피로파단이 급속하게 시험편 전체로 일정하게 작용하는 것으로 사료된다. 본 연구와 같이 회전굽힘 피로 시험시 완전역전 굽힘피로시험에 따른 응력비($R=0 \text{ max}/\sigma_{\text{min}}$)는 일반적으로 $R=-1$ 로 정해진다. 응력비, $R=-1$ 인 경우 최대응력(인장)과 최소응력(압축)의 절대값이 같기 때문에 일정한 하중에 따른 반복회전 굽힘 피로 시험시 특히 고응력 범위에서 응력분포가 시험편 전반에 형성되는데 Fig. 13과 같이 피로파단면이 인장-

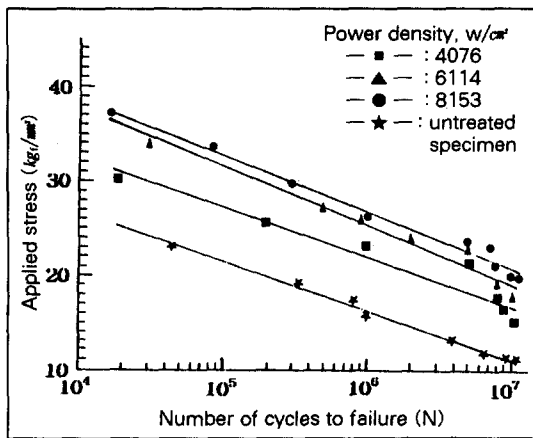


Fig.11 Relation between applied stress and the number of cycle to failure of gray cast iron coated with black paint and laser-surface-hardened for different power densities with a traverse speed of

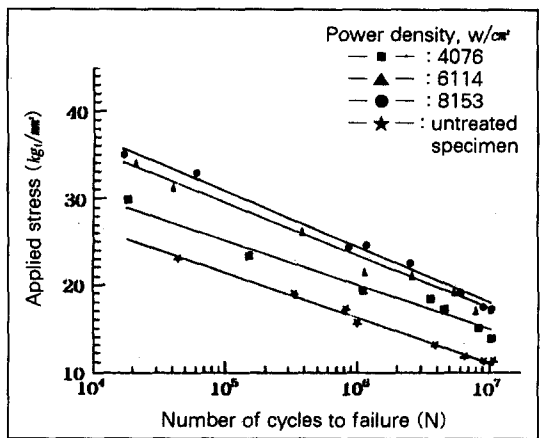


Fig.12 Relation between applied stress and the number of cycle to failure of gray cast iron coated with black paint and laser-surface-hardened for different power densities with a traverse speed of 2.5m/min.

압축의 균일한 힘을 받아 전반적으로 균일하게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 14는 저응력-고주기 피로사이클에서의 회주철의 피로파단면을 나타낸 것으로서 피로파괴 기점은 레이저 표면경화 처리시 표면의 계재물에서 시작하여 해변모양의 피로파단면을 형성하면서 내부로 파단이 일어났음을 알 수 있다. 전체적인 피로파단면은 주응력 방향에 수직을 나타내고 있으며 피로기점이 "origin"부에서 발생하여 피로균열이 단면을 따라 전파할 때 상호 마찰 작용에 의해 생긴 평활한 영역과 나중에 단면이 하중을 더이상 견디지 못할 때 연성파괴의 거친 영역이 시험편 중심부에 형성되어 있음을 알 수 있다. 또한 파단시 파단면의 상호 마찰로 인해 파단면에 열이 발생하여 미량의 산화물도 분포하고 있음을 알 수 있다. 그리고 레이저 표면경화 처리시 표면부의 분해된 편상흑연 주위에 미량으로 형성되는 잔류오스테나이트는 피로파단을 더욱 가속화시킨다고 생각된다. Fig. 14의 내부에는 급속한 파단에 따라 편상흑연의 이탈현상으로 공극이 형성됨을 볼 수

있으며 주위에 형성되는 저응력에 따라 전반적으로 파단면이 규칙하게 나타남을 알 수 있다. 또한 피로기점 부위에 해변자국(beach mark)을 형성시켜 피로파단의 성장 방향을 뚜렷하게 나타내는 전형적인 피로파괴 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

IV. 결 론

CO₂ 레이저 비입의 출력밀도와 조사속도를 변화시키면서 회주철을 레이저 표면경화 처리하여 피로특성을 규명하기 위한 실험결과는 다음과 같다.

1. 주어진 조사속도에서 출력밀도의 증가에 따라 회주철의 현미경조직 특성은 편상흑연의 분해와 라스 마르텐사이트의 조대화 현상이 증가하면서 소량의 잔류오스테나이트와 함께 구성되고 있다.
2. 회주철의 최대표면경도는 출력밀도의 증가에 따라 Hv=620에서 Hv=647으로 증가되고 경도분포는

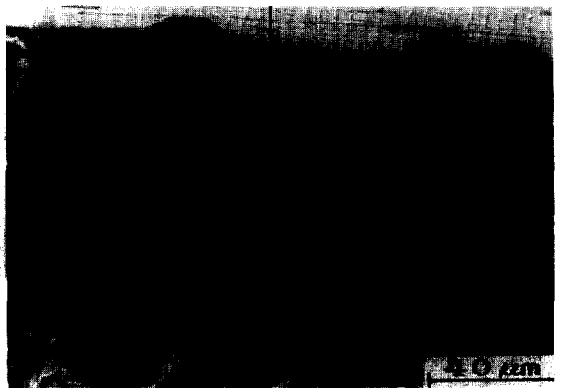
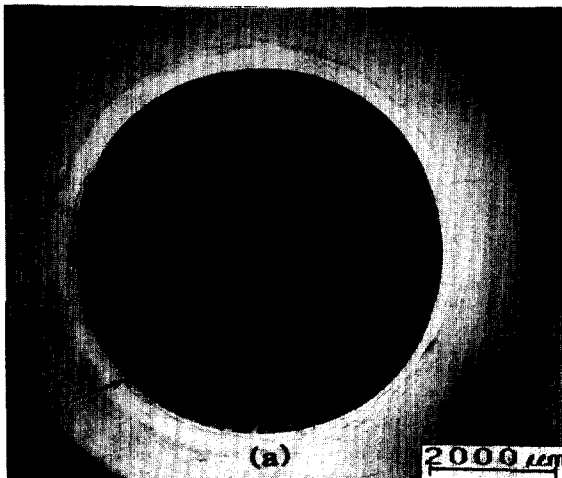


Fig. 13 Scanning electron micrographs showing the fatigue fracture surface obtained at high stress level of 37.5 kg/mm^2 in gray cast iron laser-surface-hardened for the power density of 8153 w/cm^2 at a given traverse speed of 2.0 m/min . (a) Overall view of fractured surface, (b) Surface area with the origin indicated, (c) Core area of fractured surface

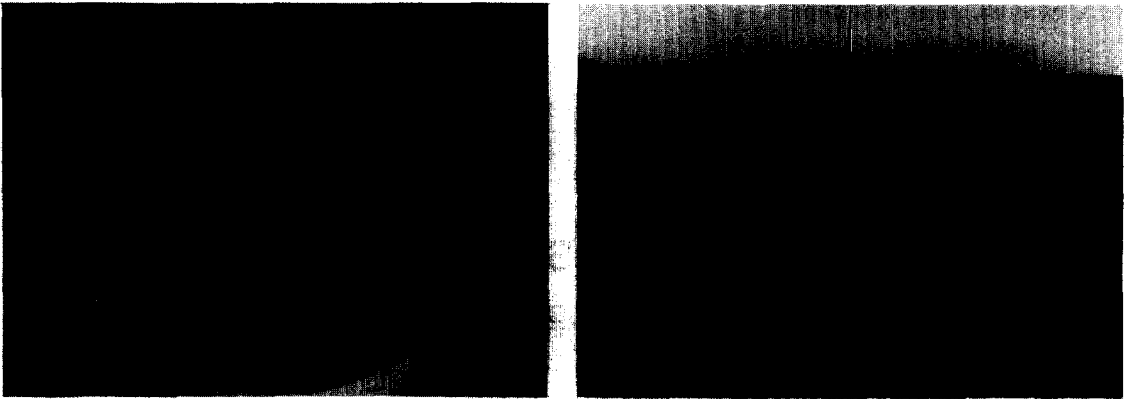


Fig. 14 Scanning electron micrographs showing the fatigue fracture surface obtained at low stress level of $21.0\text{kg}/\text{mm}^2$ in gray cast iron laser-surface-hardened for the power density of $8153\text{W}/\text{cm}^2$ at a given traverse speed of $2.0\text{m}/\text{min}$. (a) Overall view of fractured surface, (b) Surface area with the origin indicated

레이저 표면경화 경계부에서 급격히 감소된다.

3. $2.0\text{m}/\text{min}$ 의 동일한 조사속도에서 $4076\text{W}/\text{cm}^2$ 의 저출력밀도와 $8153\text{W}/\text{cm}^2$ 의 고출력밀도로 레이저 표면경화 처리된 시료 및 경화처리되지 않은 시료와의 피로강도는 피로한도($N_f \geq 10^7$)에서 각각 $15\text{kg}/\text{mm}^2$, $20\text{kg}/\text{mm}^2$ 및 $11\text{kg}/\text{mm}^2$ 로서 레이저 표면경화 처리한 시료의 피로강도가 현저히 우수함을 나타낸다.
4. 회주철의 피로파단면의 특성은 고응력-저주기 조건하에서 전형적인 취성과파괴를 나타내고 저응력-고주기 조건하에서 해변자국을 형성하는 연성파괴를 나타낸다.

참고문헌

1. Charless A. Stickels and Larry E. Byrnes, Metals Handbook(9th ed), vol. 4, p. 133(1981)
2. Ole samdven, Metals Handbook(9th ed), vol. 4, p. 507(1981)
3. H. Bande, G. L. Esperance, M. U. Islam and A. K. Koul, Materials Science and Technology, vol. 7, p. 452(1981)
4. C. Banas and R. Nuss, ECLAT '90, p. 103(1990)
5. M. A. Majid and L. B. Hussain, ECLAT '90, p. 291(1990)
6. H. W. Bergmann and E. Geissler, ECLAT '90, p. 321(1990)
7. P. Merrien, H. P. Lieurade and F. Leroy, Surface Engineering, vol. 8, no. 1, p. 61(1992)
8. E. J. Mittemeijer, J. Heat Treating, vol. 3, no. 2, p. 114(1983)
9. L. J. Vandewalle, Residual Stress for Designers and Metallurgists, American Society for Metals, Metals Park, Ohio. (1981)
10. Maurice A. H. Howes, Heat Treatment, vo. 12, no. 6, p. 42(1989)
11. Subrata Bhattacharya and F. D. Seaman, Laser Processing of materials AIME, p. 211(1984)
12. M. F. Ashby, K. E. Easterling and W-B Li, Laser processing of materials AIME, p. 225(1984)
13. James I. Luxon and David E. Parker, Industrials and their applications, p. 222(1985)