

# CO<sub>2</sub> 레이저 분산빔에 의한 표면경화가 구상흑연주철의 피로특성에 미치는 영향

Effects of surface hardening by using CO<sub>2</sub> laser defocussed beam on the fatigue  
resistance of ductile irons

박근웅, 한유희\*, 이상윤

K.W.Park, Y.H.Han\*, S.Y.Lee

동아대학교 금속공학과, 한국기계연구원 레이저가공그룹\*

## Abstract

This study has been performed to investigate into some effects of the output power and traverse speed of laser beam on the microstructures, hardness and fatigue resistance of the ductile iron surface-hardened by CO<sub>2</sub> laser defocussed beam.

Optical micrographs have shown that with increasing the output power and decreasing the traverse speed, the martensite was coarsened and some retained austenite were appeared in ductile iron. The microstructures of hardening zone were composed of bull's eye and some nodular graphite dissolved structures by the effect of self quenching. Fatigue fracture characteristics of ductile iron have appeared in the high stress and low stress ranges. The fracture initiated at nodular graphites in the surface hardened layer due to the stress concentration caused by a notch effect.

The interior graphite nodules were broken away or popped out during crack propagation. Fatigue test has shown that values of fatigue strength considerably increased with increasing output power at a given traverse speed.

Key Words : Laser surface hardening, traverse speed, output power, self quenching,  
fatigue resistance, defocussed beam, ductile iron

## 1. 서론

최근 수송산업이 급속도로 발전하면서 주철을 소재로 하는 엔진내부의 실린더, 피스톤 링, 크랭크축 등의 기계부품 사용량이 증가하면서 내마모성, 내피로성 등의 기계적 성질과 신뢰성의 향상이 요구되고 있다. 이러한 기계부품의 우수한 내피로

성 향상을 위하여 가공 후 요구하는 표면의 미소 깊이만을 경화처리 하여 필요로 하는 기계적 성질을 얻는 일반 표면경화 처리가 오랫동안 산업현장에서 실용화되어 오고 있다. 표면경화 처리는 처리 방법에 있어 부품을 가열한 후 냉각매체에 의해 표면을 경화하면서 요구하는 기계적 성질을 얻기 때문에 특히, 정밀한 치수와 복잡한 형상을 가지는

부품의 경우 부품 전체의 변형이 발생하기 쉬워 정량치수의 오차가 생기고 표면에 미세한 균열이 발생하는 여러 결함들로 인하여 부품의 품질저하와 표면경화 처리 다음 후 가공이 뒤따르는 경제적 폐단이 있다. 또한 이러한 정밀한 치수와 형상을 가지는 부품이 요구하는 표면의 유효경화깊이, 최대경도 등의 신뢰성 있는 제어가 어려워 부품의 요구되는 기계적 성질에 악영향을 끼치는 예가 있으며 부품의 국부에 경화처리함에 있어 부품전체를 처리하는 기존의 표면경화 처리의 적용에는 어려움이 수반되고 있다.<sup>1),2)</sup> 이러한 문제점들을 해결하고 특히, 최근에 급속히 부각되는 환경보호 차원에서 냉각매체에 의한 표면경화 처리 후 발생하는 각종 폐수, 대기 오염물질, 산업 쓰레기 등으로 인한 환경오염을 대체할 수 있는 새로운 표면경화 처리의 실용화가 시급히 요구되고 있는 현재 시점에서 공해가 거의 발생되지 않는 레이저 표면경화 처리의 실용화가 필요하게 되었다.<sup>3),4)</sup>

레이저 표면경화 처리는 우선 금속 부품의 표면경화 처리에 필요한 가열로 장치가 불필요하고 진공상태가 아닌 일반 대기 상태에서 자유자재로 경화처리 되어 물, 기름 등의 냉각매체가 필요없는 장점이 있다. 따라서 냉각매체를 사용하는 기존의 표면경화 처리시 발생하는 각종 폐수, 대기오염, 산업 쓰레기, 기타 오염물질 등을 획기적으로 없앨 수 있어 무공해 처리법으로 인정받고 있다.<sup>5)</sup> 그리고 빔과 재료와의 상호작용시간이 10-2~100 sec 범위에서 이뤄짐에 따라 기존의 표면경화 처리보다 처리속도가 대단히 빠르고 경화깊이를 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 자동적으로 제어하고 예측할 수 있어 처리설비의 무인 자동화가 가능하다. 또한 경화처리 인자의 컴퓨터 입력에 따라 장거리에서도 온라인으로 요구하는 최적의 경화특성을 얻을 수 있으며 규정된 자동처리 프로그램으로 단시간 내에 대량생산이 가능하다.<sup>6)~8)</sup> 그리고 부품 크기에 준하지 않고 형상이 복잡하고 정밀한 치수를 요구하는 부품에 대하여 수  $\mu\text{m}$  정도의 매우 작은 크기로 빔을 집속 시킬 수 있어 요구하는 최적의

경화조건으로 특정부위의 경화처리가 가능하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 최적의 경화처리 인자의 설정연구 결과로 레이저 빔 시스템의 효과적인 제어가 가능하여 선택적인 국부경화 효과를 얻을 수 있는 특징이 있다.<sup>9)~11)</sup>

레이저 표면경화 처리인자로는 빔 모드(beam mode), 빔 직경, 출력, 출력밀도, 조사 속도, 표면코팅재, 빔 특성, 재료의 물리적특성 등이 있으며 처리인자의 조건에 따라 부품에서 요구되는 기계적 성질을 얻을 수 있다.<sup>12)</sup> 빔과 재료와의 상호작용은 빔의 단위 시간당 조사되는 거리와 단위 면적당 빔의 입열량의 적절한 조절을 통하여 재료의 요구되는 물성치를 얻는 것이 가능하다. 또한 경화처리 하려는 부품에서 빔을 흡수하여 얻게 되는 레이저 열원의 특성에 직접 관계되므로 여러 가지 빔의 특성과 처리하려는 부품재료의 성질에 크게 좌우된다.

본 연구에서는 레이저 표면경화 처리에 많이 사용되는 고출력의 CO<sub>2</sub>레이저의 분산 빔을 이용하여 표면경화특성을 효과적으로 얻을 수 있는 구상흑연주철을 시료로 사용하여 빔직경을 조절하고 출력 및 조사속도를 각각 달리 변화시켜 표면경화처리한 후 현미경 조직관찰, 경도분포 측정 및 피로 특성을 고찰하여 레이저 표면경화 인자에 따른 피로특성 향상에 대한 주요기구를 규명하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험편 준비

시료는 구상흑연주철(80-55-60 등급)을 직경 30mm 봉재 크기로 사용하였으며 시료의 화학조성은 Table 1과 같다. 피로 시험편은 시험편 형상에 대한 레이저 표면경화의 효율성을 위해 오노형 회전굽힘 피로 시험편을 사용하였으며 시험편의 형상과 치수는 Fig.1에 나타내었다.

레이저 표면경화 처리하기에 앞서 사용된 시험편의 가공 후 잔류하는 가공응력을 제거하기 위하여 전기로(L&L special furnace, 750mm×900mm,

20kW, model XL244-H422-3-B)를 사용하여 650°C에서 1시간동안 유지한 다음 공랭처리 하였다.

## 2.2 레이저 표면경화 처리

레이저 표면경화 처리는 Table 2에 나타낸 바와 같이 피로시험을 행하기 위해 표면경화 처리인자인 출력과 조사속도를 각각 변화시키고 분산빔 직경은 5mm로 설정하였다. 레이저 표면경화 처리장치는 Rofin-Sinar(RS) 840의 연속출력파(continuous wavelength, CW) 및 정격출력 4kW의 횡류방식(traverse flow type) CO<sub>2</sub> 레이저 장치이며 측정된 시험편 표면으로부터의 초점높이는 15mm이었다. 레이저 표면경화 처리용 시험편은 회전테이블에 각각 고정하여 필요한 조사속도에 일치하도록 회전속도를 측정하여 시험편을 나선형으로 회전하면서 출력과 조사속도의 변화조건에 따라 표면경화 처리하였으며 시험편 표면의 산화방지와 플라즈마의 제거를 위해 사용되는 차폐가스(shielding gas)로는 아르곤가스 또는 질소가스를 사용하였다. 그리고 레이저 빔의 흡수성이 높은 흑색 페인트를 시험편 표면에 2회 반복적으로 균일하게 코팅처리 하여 표면경화 처리를 행하였다. 코팅하기 전의 전처리로서는 시험편 표면의 산화막과 불순물을 제거하기 위하여 20분간 아세톤 용액에서 초음파 세척을 하였다.

## 2.3 현미경조직 시험

레이저 표면경화 처리된 구상흑연주철의 미세조직을 관찰하기 위하여 2% nital로 부식시킨 후 광학현미경(optical microscope, Nikon NEC-5)과 주사전자현미경(scanning electron microscope, HITACHI, S2400)을 사용하였다. 피로시험 후 피로파괴 특성을 고찰하기 위하여 주사전자현미경을 사용하였다.

## 2.4 경도시험

레이저 분산빔으로 조사된 시험편의 단면경도 측정을 위해 시험편 표면을 0.3 $\mu$ m 알루미나 분말로

정마한 후 미소 비커스 경도시험기(micro Vickers hardness tester, Matsuzawa KVKE)에서 하중 300g으로 고정하고 경화부표면부터 중심부까지 0.05mm 간격으로 측정하였다. 경도 측정 후 표면경화부의 경도치가 시험편의 표면으로부터 Hv=550의 경도치를 나타내는 깊이를 유효경화깊이(effective case depth)로 설정하였다.

## 2.5 피로시험

레이저 표면경화 처리 후 피로시험을 위한 시험기는 Fig.2에 나타낸 바와 같으며 오노형 회전굽힘 피로시험기(Ono-type rotary bending fatigue testing machine, Japan, Model C-4201)를 사용하였다. 피로시험 전 에머리 페이퍼 #1500으로 시험편의 표면조도를 Rm=0.1 $\mu$ m로 균일하게 정밀 연마한 후 3분간 초음파 세척을 행하였다. 시험편의 중심에서 좌,우 각각 50mm되는 지점에 고정시킨 후 3450 r.p.m에서 하중 0.5~10kg 범위로 실시하였다. 여기에서 고응력-저주기 피로사이클은 Nf $\leq$ 105으로 설정하였고 저응력-고주기 피로사이클은 Nf $\geq$ 107으로 설정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 현미경조직 특성

구상흑연주철의 레이저 표면경화처리 후 나타나는 특성에 대해서는 여러 연구자에 의해 보고되었다.<sup>13)</sup> 구상흑연주철의 레이저 표면경화 처리시 펄라이트 기지에 분포되어 있는 구상흑연은 고온의 오스테나이트 온도구간에서 탄소의 확산과정이 일어나면서 구상흑연의 일부는 오스테나이트에 고용되고 냉각시 구상흑연 주위에 마르텐사이트가 형성되면서 황소눈(bull's eye) 조직이 된다.<sup>15)</sup> 이러한 황소눈 조직은 마르텐사이트 경화눈(martensite hard eye)이라고도 하며 이러한 조직은 경도, 강도, 피로특성, 마모특성 등이 우수하다고 알려져 있다.<sup>14),15)</sup>

Photo.1은 2.0 m/min의 일정한 조사속도에서 출

력을 800w에서 1600w로 증가시켜 표면경화 처리를 실시한 후 구상흑연주철의 표면층에 대한 광학현미경 조직을 나타낸 것이다. 출력 조건이 800w인 (a)에서 1600w인 (c)로 100% 증가할수록 경화깊이는 현저하게 증가함을 알 수 있는데 이는 재료표면의 단위 면적당 흡수되는 빔 에너지의 입열량이 증가함에 따라 열영향부(heat affected zone, HAZ)의 폭과 깊이가 상대적으로 커지면서 마르텐사이트 변태경화층이 확대되기 때문이다. 그리고 표면경화부의 조직은 (b)와 (d)에 나타낸 바와 같이 전체적으로 마르텐사이트와 미세펄라이트 및 잔류오스테나이트가 분포하는 것으로 판단된다. 또한 이를 고배율로 관찰한 Photo.2의 (a)는 마르텐사이트와 잔류오스테나이트를, (b)는 열영향부의 미세펄라이트를 각각 나타내는 것이다. 그리고 출력이 1600w로 100% 증가하면서 오스테나이트 가열온도의 정도가 향상되면서 오스테나이트 결정립의 성장이 다소 나타나 마르텐사이트의 형태 즉, 플레이트(plate)의 크기가 커지는 경향을 보여주고 있으며 Photo.1의 (b) 및 (d)에서 상기에서 밝힌 마르텐사이트 경화는 조직이 형성되었음을 확인할 수 있다.

Photo.3은 구상흑연주철의 표면경화부(a), 열영향부(b) 및 기지(c)를 각각 나타낸 것으로써, 열영향부에는 부분변태에 의한 마르텐사이트와 미세 펄라이트의 혼합조직으로 구성되고 기지는 구상흑연과 펄라이트 및 페라이트로 구성되어 있음을 알 수 있다. 이러한 구상흑연주철의 레이저 표면경화 처리 후 나타나는 표면층의 구성에 관하여 Molian(18)의 연구결과 판상 및 침상 마르텐사이트, 잔류 오스테나이트물을 제거하기 위하여 20분간 아세톤 용액에서 초음파 세척을 하였다. 이트, 구상흑연 등이 분포함을 밝히고 있으며 구상흑연이 분해하여 탄소가 오스테나이트상에 고용되면서 마르텐사이트로 변태하여 판상 마르텐사이트가 형성된다고 밝히고 있다.

### 3.2 경도분포 특성

직경 5mm의 분산빔으로 2.0m/min의 조사속도에서 출력을 800w~1600w로 변화시켜 구상흑연주철을 표면경화 처리했을 때의 단면경도 변화곡선을 Fig.3에 나타내었다. 출력이 증가함에 따라 심부까지의 유효경화깊이(Hv=550)는 320 $\mu$ m에서 490 $\mu$ m으로 증가되고 경도분포 곡선은 표면경화부와 기지와의 경계지점에서 급격히 떨어지는 양상을 나타내는데 이러한 경향은 빔의 급속가열과 기지의 냉각에 의한 자기쿼칭으로 인하여 기지에 열원이 차단되어 표면경화부는 빔과의 상호작용시간이 길어 오스테나이트에 고용된 탄소함량이 증가되면서 자기쿼칭에 의한 경한 조직인 마르텐사이트로 변태되고 경계부인 열영향부에는 오스테나이트화 조건이 충분하지 못하여 마르텐사이트 및 미세 펄라이트의 혼합조직이 형성됨에 따른 것이다. 출력의 증가에 따르는 최표면층의 최대경도는 미소범위로 증가됨을 알 수 있는데 이는 출력증가에 따라 단위 면적당의 빔 입열량이 증가된 결과로 판단된다. 그리고 출력이 800w일때의 경도분포는 표면층에서 내부로 갈수록 급격히 감소하고 1600w에서는 유효경화층까지 일정하게 최고경도치가 유지되다가 기지에서 급격히 감소한다. 출력이 1600w일때는 빔의 입열량이 상대적으로 증가되어 변태경화능이 향상되면서 마르텐사이트의 형상이 다소 조대해지고 마르텐사이트 경화는 조직의 형성이 두드러져 저출력보다 최고경도치가 유효경화층까지 높게 분포한다고 생각된다.

Fig.4는 1600w의 출력하에서 조사속도를 2.5m/min에서 1.5m/min으로 감소시켜 표면경화 처리한 구상흑연주철의 단면경도 변화곡선을 나타낸 것으로써, 조사속도의 감소에 따른 유효경화깊이는 380 $\mu$ m에서 550 $\mu$ m으로 증가되고 표면경화부는 구상흑연 주위에 마르텐사이트가 형성되는 황소는 조직에 의해 높은 경도값을 유지하다가 열영향부에서는 오스테나이트의 온도까지 충분히 가열되지 못한채 자기쿼칭됨에 따라 미세 펄라이트로 변태되어 경도값이 감소하는 것으로 여겨진다. 그리고

조사속도가 2.0m/min 이상일 때에는 빔과 재료와의 상호작용시간이 큰 폭으로 감소하여 오스테나이트 온도에서의 유지시간이 짧아 마르텐사이트의 변태가 충분히 이뤄지지 않고 탄소의 함량이 감소하여 경화효과가 감소하기 때문에 판단된다. 예서는 오스테나이트의 온도까지 충분히 가열되지 못한채 자기쿼칭됨에 따라 미세 펄라이트로 변태되어 경도값이 감소하는 것으로 여겨진다. 그리고 조사속도가 2.0m/min 이상일 때에는 빔과 재료와의 상호작용시간이 큰 폭으로 감소하여 오스테나이트 온도에서의 유지시간이 짧아 마르텐사이트의 변태가 충분히 이뤄지지 않고 탄소의 함량이 감소하여 경화효과가 감소하기 때문에 판단된다.

### 3.3 피로 특성

Photo.4는 출력조건이 1600w에서 조사속도를 2.0m/min으로 하여 레이저 표면경화 처리된 구상흑연주철의 고응력-저주기 피로사이클 조건에서의 피로파단면을 나타낸 것으로써, 시편의 고응력 범위하의 전형적인 표면기점 피로파괴 특성인 취성파괴를 나타내고 있다. 전체적인 피로파단면은 주응력 변화에 수직을 나타내고 있으며 A점에서 피로기점이 발생하여 표면경화 처리된 부분에 피로영역을 형성시키면서 회전굽힘의 일정한 방향으로 피로파단면이 일어나고 있으며 최표면층에 분포하는 구상흑연에 응력집중이 일어나 구상흑연이 노치역할(18)을 하여 피로기점으로 시작되었음을 알 수 있다. 고응력에 따라 전반적으로 파단면이 불규칙하며 내부는 급속파단의 취성파괴에 의해 구상흑연의 이탈현상도 볼 수 있다. 회전굽힘 피로시험시 완전역전굽힘 피로시험에 따른 응력비( $R = \sigma_{\max} / \sigma_{\min}$ )는 일반적으로 'R=-1'로 정해진다. R=-1인 경우 최대응력(인장)과 최소응력(압축)의 절대값이 같기 때문에 일정한 하중에 따른 반복회전 굽힘피로 시험시 특히 고응력 범위에서 응력분포가 시편전반에 형성된다.

Photo.5는 동일한 레이저 표면경화처리 조건에서 구상흑연주철의 저응력-고주기 피로사이클에서의

피로 파단면을 나타낸 것으로써, 피로파괴 기점은 최표면부의 구상흑연을 피로기점으로 시작하여 서서히 피로한도( $N_f=10^7$ )에까지 피로영역을 형성시키면서 내부로 파단이 확산되고 있음을 알 수 있다. 또한 피로기점 부위에 해변자국을 형성시켜 피로파단의 성장방향을 나타내는 피로파괴 특성을 나타내고 있다. 고응력 범위에서는 표면경화층의 구분없이 피로파괴가 급속하게 일어난 반면 저응력 범위에서는 표면경화 처리한 부분과 처리하지 않은 부분의 경계지점이 균열첨단 역할을 하여 회전굽힘에 따른 일정한 방향으로 피로파괴가 일어났음을 알 수 있다. 또한 피로파단면이 내부로 진행되는 일련의 해변자국(beach mark)이 다소 나타나는 피로파단면의 특성을 나타내고 있다. 저응력-고주기 피로사이클에서의 회전굽힘 피로시험시 피로기점이 최표면부에 발생하여 일정한 반복응력을 계속 받아 피로균열이 진행될 때 계속되는 인장-압축응력에 따라 파단면의 상호마찰에 따라 파단면은 평활해지고 최표면부에서는 미량의 계재물도 분포함을 알 수 있다.

2.0m/min의 동일한 조사속도하에서 800w~1600w의 출력 증가에 따른 구상흑연주철의 표면경화 후 피로사이클과 응력변화에 따른 피로강도 분포곡선을 Fig.5에 나타내었다. 저응력-고주기 피로사이클( $N_f \geq 10^7$ )에서는 표면경화 처리하지 않은 시편의 피로강도가 피로한도에서 14kgf/mm<sup>2</sup>이고 800w의 출력과 1600w의 출력에서의 피로강도는 각각 21 kgf/mm<sup>2</sup>, 25 kgf/mm<sup>2</sup>로 나타나 표면경화 처리한 시험편과 처리하지 않은 시험편의 피로강도는 현저한 차이를 나타내어 표면경화 처리된 시편의 피로강도가 우수함을 알 수 있는데 이는 구상흑연 주위에 형성되는 마르텐사이트에 의해 황소눈 조직과 표면층의 높은 경도분포에 기인하여 나타나는 결과로 판단된다.

Fig.6은 1600w 출력하에서 조사속도를 2.5m/min에서 1.5m/min으로 감소시켜 표면경화 처리한 구상흑연주철의 피로강도 변화곡선을 나타낸 것으로써, 저응력-고주기 피로사이클에서는 표면경화 처

리하지 않은 시편의 피로강도가 피로한도 ( $N_f=10^7$ )에서 14 kgf/mm<sup>2</sup>이고 1.5m/min의 조사 속도와 2.5m/min의 조사속도에서의 피로강도는 각각 26 kgf/mm<sup>2</sup>, 23 kgf/mm<sup>2</sup>로 나타나 표면경화 처리된 시편의 피로강도가 우수하다. 이러한 현상은 조사속도의 감소에 따라 빔과의 상호작용시간이 길어 자기캐칭 효율이 향상되어 구상흑연 주위에 마르텐사이트가 형성되는 황소는 조직에 기인하여 피로강도가 높게 나타난다고 판단된다.

#### 4. 결론

CO<sub>2</sub> 레이저 분산빔을 이용하여 빔 직경을 조절하고 출력 및 조사속도를 변화시켜 구상흑연주철을 표면경화 처리한 후 표면층에 형성된 미세조직의 관찰을 통해서 경화인자의 영향을 분석하고 이에 따른 피로특성의 변화에 대한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 동일한 조사속도 조건하에서 출력 증가와 동일한 출력 조건하에서 조사속도의 감소에 따른 구상흑연주철의 표면경화부에는 구상흑연 주위에 마르텐사이트가 형성되는 황소는 조직과 마르텐사이트 및 소량의 잔류 오스테나이트로 구성되고 열영향부에는 미세 펄라이트로 각각 구성된다.

2. 출력 증가와 조사속도의 감소에 따른 구상흑연주철의 경도분포는 표면경화부에서 구상흑연 주위에 마르텐사이트가 형성되어 경도값이 높게 분포하고 열영향부에서는 미세 펄라이트로 구성되어 경도값이 급격히 감소한다.

3. 구상흑연주철의 고응력 및 저응력 범위에서의 피로파괴 특성은 표면에 분포하는 구상흑연이 노치역할을 하여 응력집중이 생겨 피로파괴 기점으로 시작하여 파단이 일어나며 내부에는 파단에 따라 구상흑연의 소량 이탈현상도 생긴다.

4. 저주기-고응력 범위에서 구상흑연주철의 피로파괴 특성은 피로파괴 기점이 표면에서 시작하여 급격한 벽개파단으로 일어나며  $R=-1$  상태의 인장-압축 응력으로 시편전체의 최표면층에 걸쳐 피

로영역을 나타내며 내부파단면은 덩풀이 관찰된다.

5. 조사속도가 2.0m/min의 조건에서 출력의 증가에 따른 구상흑연주철의 피로한도에서의 피로강도는 21kgf/mm<sup>2</sup>에서 26 kgf/mm<sup>2</sup>로 각각 높게 나타나며 구상흑연주위의 황소는 조직에 기인하여 높게 나타나는 것으로 판단된다.

6. 출력이 1600w의 조건에서 조사속도의 감소에 따른 구상흑연주철의 피로한도에서의 피로강도는 표면경화부의 유효경화깊이 증가와 높은 경도값에 기인하여 23 kgf/mm<sup>2</sup>에서 26 kgf/mm<sup>2</sup>로 각각 증가한다.

#### 참고문헌

1. H.Bande,G.L' Esperance,M,U.Islam and A.K.Koul, "Laser Surface hardening of AISI 01 Tool Steel and its Microstructure", Materials Science and Technology, Vol.7, No.5, pp.452~457, 1991
2. C.D.DesForges, "Laser Heat Treatment", TRIBOLOGY international, Vol.4, pp.139~143, 1978
3. G.H.Parsons and H.C.Man, "Laser Surface Engineering-an Overview", Surface Engineering and Heat Treatment, The Inst.of Metals, London, pp.330~343, 1991
4. Ole Sandven, "Laser Surface Hardening", Metal hand book(10th ed), Vol.5, pp.286~296, 1991
5. V.Rubruck,E.Geissler,H.W.Bergmann, "Case Depth Control for Laser Treated Materials", ECLAT' 90 , pp.207~216, 1990
6. O.De Pascale,C.Esposito and P.Boffi, "A Semi-Empirical Method for Predicting Hardened Case Depths in Laser Heat Treating", Materials Chemistry and Physics, Vol.19, No.3, pp.205~214, 1988
7. H.R.Shercliff, M.F.Ashby, "The Prediction of

Case Depth in Laser Transformation Hardening”, Metallurgical Transactions A, Vol.22A, No.10, pp.2459~2466, 1991

8. 井上勝敬,大村悦二,春田浩一, “亞共析鋼のレーザー硬化處理による組織變化の 計算機シミュレーション”, 日本機械學會論文集, Vol.54, No.500, pp.1026~1034, 1988
9. 大村悦二,宮町恭行,井上勝敬, “速度論に基づく亞共析鋼のレーザー變態硬化過程の解析”, 日本機械學會論文集, Vol.56, No.526, pp.1496~1503, 1990
10. J.M.Bergheau,D.Pont,and J.B.Leblood, “Three Dimensional Simulation of a Laser Surface Treatment Through Steady State Computation in the Heat Source’s Comoving Frame”, Mechanical Effects of Welding Lulea,Sweden, Vol.6, pp.85~92, 1992
11. John R Bradley, “A Simplified Correlation between Laser Processing Parameters and Hardened Depth in Steels”, J.of Physics, Vol.21, No.5, pp.834~837, 1988
12. Victor G. Gregson, “Laser Heat Treatment”, Int.Conference Laser Processing, Laser Inst.of America, Toledo, Ohio, pp.1~16, 1981
13. C.H.Chen,C.P.Ju,J.M.Rigsbee, “Laser Surface Modification of Ductile Iron”, Materials Science and Technology, Vol.4, No.2, pp.161~165, 1988
14. Hidenobu MATSUYAMA,Kimihiro SHIBATA, “Characteristics of Laser Heat Treated Ductile Cast Irons”, Heat & Surface’ 92, Japan Technical Information Service, TOKYO, pp.207~210, 1992
15. Masato Tsujikawa,Makato Hino,Makato Kawamoto and Kunio, “Hard Eye Ductile Cast Iron and its Treatment by Laser Quenching”, Heat & Surface’ 92, Japan Technical Information Service, pp.441~444, 1992
16. V.Lopez,J.M.Bello,J.Ruiz and B.J.Fernandez,

“Surface Laser Treatment of Ductile Irons” J. Materials Scence, Vol.29, pp.4216~4224, 1994

17. V.A.Pereloma, V.L.Naidek, “Laser Treatment of Ferrous Alloys Scientific and Technological Aspects”, IFHT’ 95, Iran, pp.515~521, 1995
18. P.A.Molian, “Fatigue Characteristics of Laser Surface-Hardened Cast Irons”, J.of Eng. Materials and Technology, Vol.109, No.3, pp.179~187, 1987
19. Hiromichi Kawasumi, “Metal Surface Hardening CO2 Laser”, Source book on applications of the laser in metalworking, ASM, Ohio, pp.185~194, 1981

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

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Fe
3.56	2.75	0.51	0.01	0.01	0.05	0.09	0.01	-	0.39	bal.

Table 2. Experimental conditions for laser surface hardening treatment.

output power (w)	traverse speed (m/min)	defocussed beam diameter (mm)
800,1200,1600	1.5, 2.0, 2.5	5.0

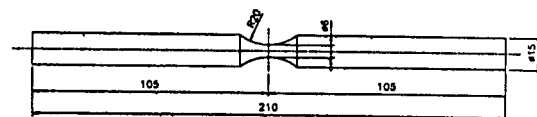


Fig. 1 Configuration and dimensions of rotating fatigue test specimen.

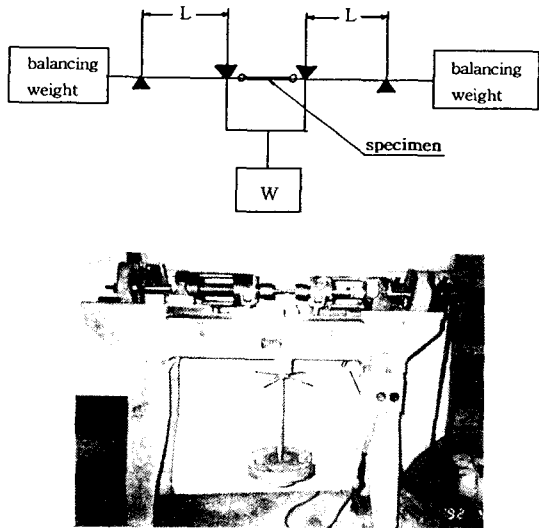


Fig. 2 Mechanism of one-type rotary bending

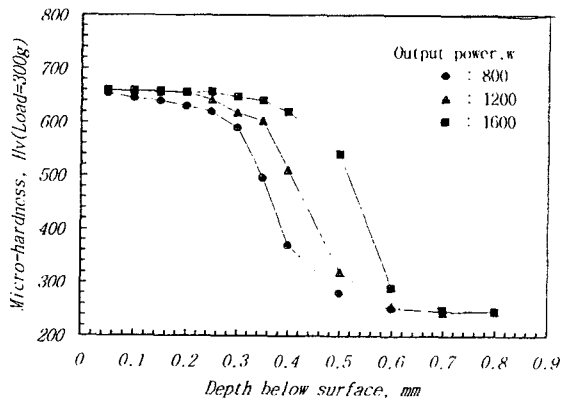


Fig. 3 Relation between hardness and depth below surface of ductile iron coated with black paint and laser surface hardened for different output powers with a traverse speed of 2.0 m/min.

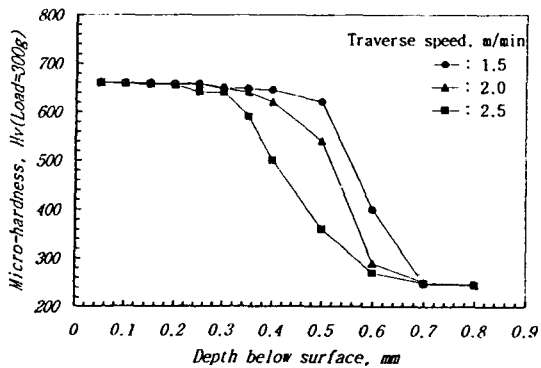


Fig. 4 Relation between hardness and depth below surface of ductile iron coated with black paint and laser surface hardened for different traverse speeds with a output powers of 1600w.

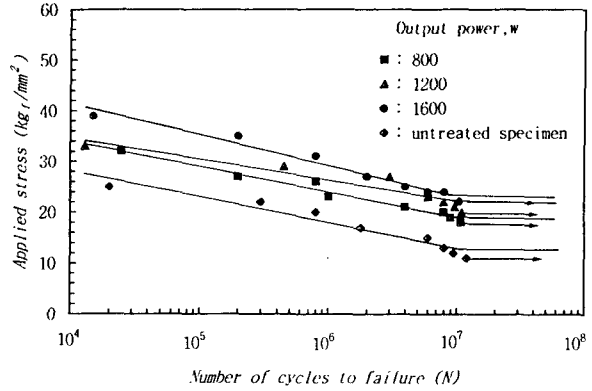


Fig. 5 Relation between applied stress and the number of cycle to failure of ductile iron coated with black paint and laser surface hardened for different output powers with a traverse speed of 2.0m/min.

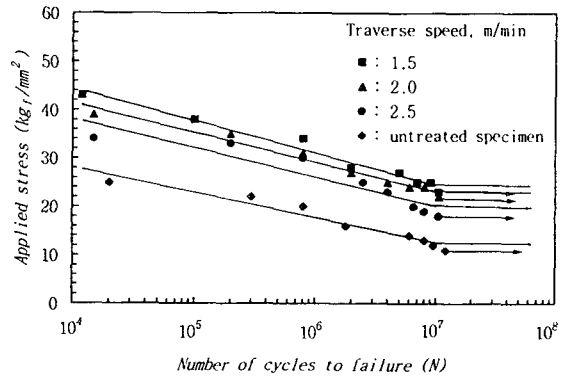
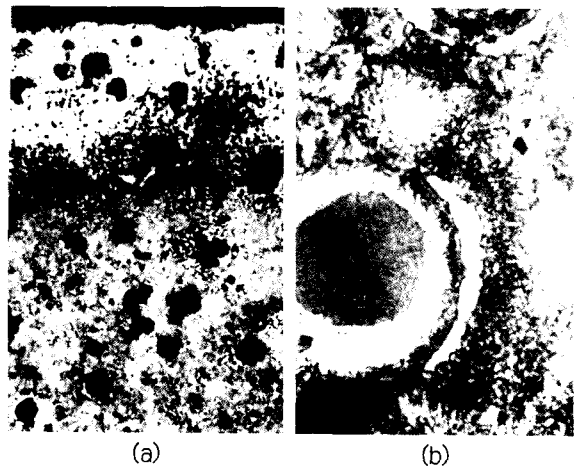


Fig. 6 Relation between applied stress and the number of cycle to failure of ductile iron coated with black paint and laser surface hardened for different traverse speeds with a output powers of 1600w.



(a)

(b)



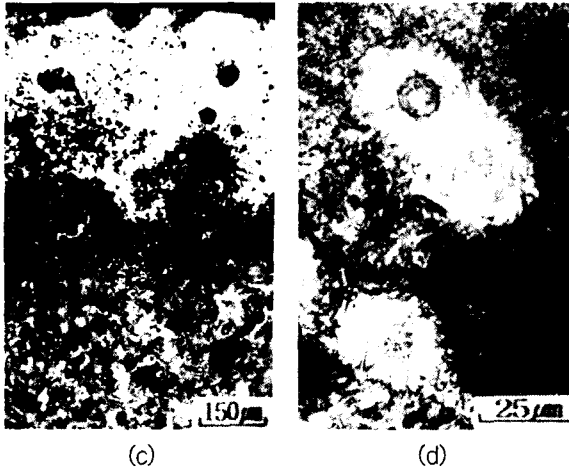


Photo. 1 Optical microstructures of ductile iron coated with black paint and laser surface hardened for different output powers of 800w for (a) and (b) and 1600w for (c) and (d) at a given traverse speed of 2.0 m/min.

Photo. 2 Scanning electron micrographs showing the martensite structure of ductile iron coated with black paint and laser surface hardened for output power of 1600w at a given traverse speed of 2.0m/min.  
(a) Hardened zone, (b) Heat affected zone

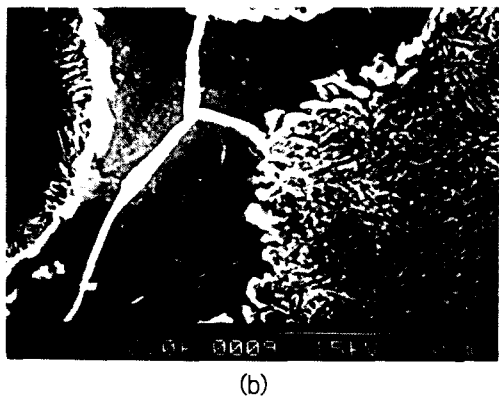
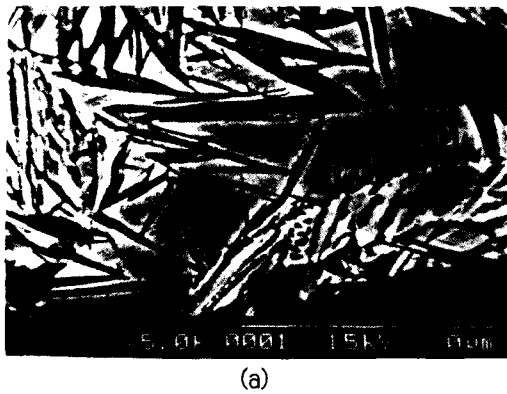
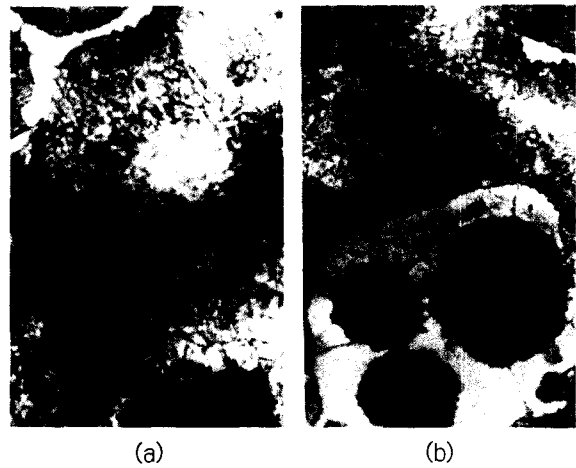
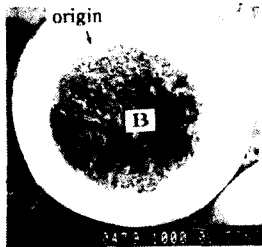
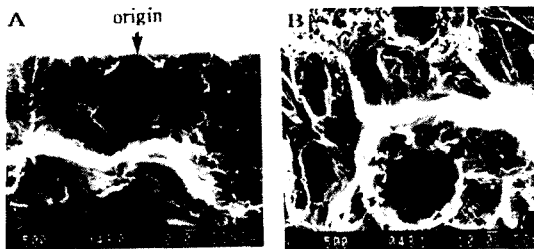


Photo. 3 Optical microstructures of ductile iron coated with black paint and laser surface hardened for output power of 1600w at a given traverse speed of 2.0m/min.  
(a) Hardened zone, (b) Heat affected zone, (c) Matrix



(a)

Photo. 5 Scanning electron micrographs showing the fatigue fracture surface obtained at high stress level in ductile iron laser surface hardened  
 (a) Overall view of fracture surface,  
 (b) Surface area with the origin indicated

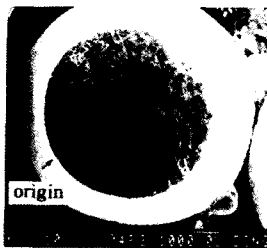


(b)

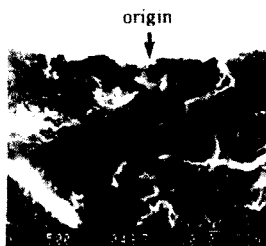
(c)

Photo. 4 Scanning electron micrographs showing the fatigue fracture surface obtained at high stress level in ductile iron laser surface hardened for the output power of 1600w at a given traverse speed of 2.0m/min.

- (a) Overall view of fractured surface,
- (b) Surface area with the origin indicated,
- (c) Core area of fractured surface



(a)



(b)