

論 文

CO₂ 레이저 표면경화처리된 중탄소 저합금강의 내마모 특성에
미치는 레이저 표면경화 인자의 영향

박근웅 · 노용식 · 한유희* · 이상윤

동아대학교 금속공학과

* 해사기술연구소

Effect of Laser Surface Hardening Factors on the Wear Resistance of
Medium Carbon Low Alloy Steel Surface-hardened by Using CO₂ Laser Technique

K. U. Park, Y. S. Roh, Y. H. Han* S. Y. Lee

Department of Metallurgical Engineering, Dong-A University

* Research Institute of Ship and Ocean Engineering, Korea

ABSTRACT

This study has been performed to investigate into some effects of the power density and traverse speed of laser beam on the optical microstructure, hardness and wear characteristics of medium carbon low alloy steel treated by laser surface hardening technique.

The results obtained from the experiment are summarized as follows :

(1) Optical micrograph has shown that finer lath martensite is formed and the amount of undissolved complex carbides increases as the traverse speed increases under the condition of a given power density, whereas the coarsening of lath martensite and the reduction of undissolved complex carbides occur with increasing the power density at a given traverse speed.

(2) Hardness measurements have revealed that as the traverse speed increases, hardness values of outermost surface layer more or less decrease under low power densities, but are uniformly distributed under high power densities, also showing that they are uniformly distributed at low traverse speeds and more or less decrease at high traverse speeds with increasing the power density.

(3) The effective case depth has been found to decrease from 0.26 mm to 0.17 mm with increasing the traverse speed from 1.5 m/min to 3.0 m/min at a given power density of $25.48 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$ and to increase from 0.20 mm to 0.36 mm with increasing the power density from $19.11 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$ to $38.22 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$ at a given traverse speed of 2.0 m/min.

(4) Wear test has exhibited that the amount of weight loss of laser surface hardened specimen with respect to sliding distance at a given load increases with increasing traverse speed at a given power density and decreases with

increasing power density at a given traverse speed.

1. 서 론

강재를 사용하는 자동차부품, 항공기부품 등 일반 각종 기계부품 등의 표면경화 열처리에는 주로 고주파 표면경화(induction surface hardening), 화염표면경화(flame surface hardening) 등의 보통열처리(thermal treatments)와 침탄(carburizing), 침탄질화(carbonitriding), 침질탄화(nitrocarburizing), 질화(nitriding) 등의 화학열처리(thermochemical treatments)가 적용되고 있지만 부품표면에 변형과 여러 결함들이 일어나기 쉽고 열처리 후에 많은 공정이 뒤따르고 있다. 그리고 경화깊이, 경도 등의 정밀제어가 어려워 열처리 제품의 품질이 불균일하게 되는 예가 많고 부품의 극히 일부분만의 경화를 필요로 할 때에는 적용상 많은 어려움이 수반되고 있다¹⁻⁴⁾.

레이저 표면경화처리(laser surface hardening treatment)는 이러한 적용상 어려움을 해결하고 국부적 변형을 최소화 할 수 있고 단시간내에 부품표면에 깨끗하게 경화되는 처리법으로써 부품표면에 고열원의 레이저 비임을 단시간내에 응점 직하의 오스테나이트 온도 구간으로 가열시켜 물, 기름 등의 냉각매체가 필요없이 부품내부의 기지급속의 냉각된 부분에 의해 급속 자기냉각(self quenching)되어 부품표면이 변태경화(transformation hardening)되는 원리이다⁵⁻¹⁰⁾. 이는 또한 부품의 극히 미세한 부분과 복잡한 형상을 가지는 부품의 선택적인 정밀경화에도 효과적으로 고출력의 레이저 열원을 이용하여 표면층의 미소깊이에만 최대 경화능을 얻을 수 있다.

1960년대 초에 루비(ruby)레이저가 발명된 이후 1964년 CO₂ 레이저가 개발됨에 따라 그 영역이 더욱 확대되어 현재 강재의 레이저 표면경화에 주로 사용되고 있는 레이저는 파장이 10.6 μm 의 긴 파장을 가지고 20 kw 이내의 고출력을 가지는 CO₂ 레이저이다^{1,6)}.

이러한 레이저 표면경화가 처음 실용화된 것은 1974년 미국의 GM사가 파워 스티어링기어 하우징의 내면경화에 레이저 열원을 이용하여 뛰어난 경화효과를 거둔 것인데^{1,12)}. 이를 계기로 주로 자동차 산업을 중심으로 레이저 표면경화가 적극 도입되어 품질향상과 생산성 향상에 크게 기여하고 있다. 레이저 표면경화 처리 후 표면층의 고경도치에 따른 내마모성과 압축 잔류응력

분포에 따른 내피로성 등의 기계적 성질이 향상되며 주로 실린더 라이너(cylinder liner), 밸브시트(valve sheet), 크랭크 샤프트(crankshaft), 캠샤프트(camshaft), 피스톤 링(piston ring), 기어(gear) 등 자동차 부품에서 항공기 부품에 이르기까지 각종 산업분야의 기계부품에 적용된다. 레이저 표면경화 처리의 잇점은 요구하고자 하는 부품표면의 변형없고, 일반적인 열처리와는 달리 물, 기름 등의 냉각매체가 필요없고, 진공이 아니더라도 대기압하에서 열처리를 할 수 있어 경제적으로도 최대도로 활용할 수 있다. 또한 부품표면의 선택적 경화(selective hardening)와 단시간내에 표면의 요구되는 경화깊이의 조절이 가능하며 열처리 후 표면가공과 같은 공정을 줄일 수 있다^{1,5,11,14)}.

레이저 표면경화 처리시 부품표면 경도에 미치는 주경화인자는 레이저 비임 모드(mode), 비임 직경 (beam diameter), 출력밀도(power density), 조사속도(traverse speed)등인데 본 연구에서는 0.4%의 중탄소 Cr-Mo 강인 AISI 4140을 시료로 사용하여 레이저 비임 모드와 비임직경을 일정하게 하고 출력밀도와 조사속도를 변화시켜 레이저 표면경화 처리 후 현미경 조직 및 경도분포 특성을 고찰하고 레이저 표면경화 인자에 따른 내마모특성을 규명하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 시료 준비

2.1.1. 시 료

본 연구에 사용된 시료는 중탄소 Cr-Mo 합금강인 AISI 4140을 직경 30 mm의 환재로 열간압연된 것을 사용하였으며 사용된 시료의 화학조성은 Table 1과 같다.

2.1.2. 마모시험편

마모시험의 정확성을 얻기 위하여 1쌍의 시험편 중 상대마모 시험편인 하부는 표준 시험편으로써 시판되는 JIS SKD 11을 사용하였고 상부 시험편은 2 mm의 분

Table 1. Chemical Composition of Specimen.

Speci.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Al
AISI4140	0.40	0.25	0.85	0.02	0.01	1.03	0.05	0.17	0.01	0.08	0.09

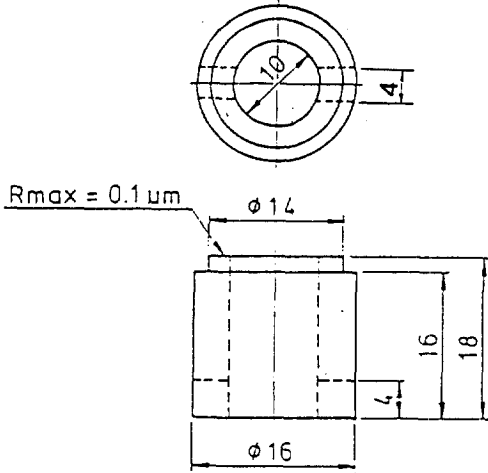


Fig. 1. Wear test specimen.

산광 비임(defocussed beam) 직경으로 각각의 출력밀도와 조사속도의 조건하에서 균일하게 레이저 표면경화 처리된 시험편을 사용하였으며 마모시험편의 형상과 치수는 Fig.1과 같다.

2.2. 잔류응력제거 처리

레이저 표면경화 처리전 시료의 가공중에 형성된 잔류응력을 제거하기 위하여 전기로(L & L special furnace. XL244-H422-3-B)에서 A₁점 직하의 600°C로 가열하여 1시간동안 유지한 다음 공냉하였다.

2.3. 켄칭 및 템퍼링 처리

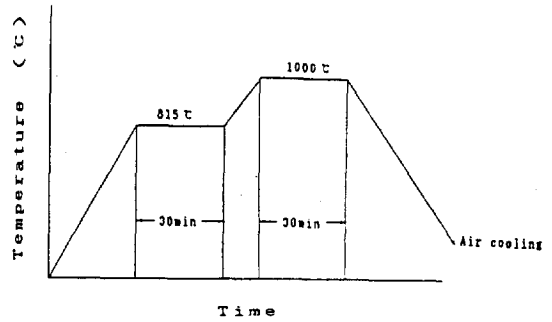
상대마모 시험편인 표준 마모시험편의 표면경도를 일정하게 하기 위하여 광휘분위기 열처리로에서 Fig. 2와 같은 열처리 사이클에 의해서 켄칭(quenching) 및 템퍼링(tempering) 처리를 하였으며 측정된 표면경도의 평균값은 Hv=720 으로 확인 되었다.

2.4. 표면코팅

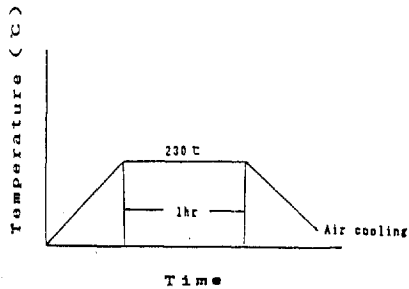
일반적으로 금속표면에 레이저 비임을 조사시 90% 이상 반사되고 10% 미만의 극히 적은 양의 비임만 흡수된다¹⁴⁾. 이는 금속 표면이 적외선 전자기 방사선의 흡수성(absorptivity)이 좋지 않기 때문이다. 금속표면의 레이저 비임의 흡수율과 반사율은 Rosenthal¹⁷⁾의 식(1)로 나타난다.

$$R_a = 1 - R \dots \dots \dots (1)$$

여기서 R_a는 흡수율(absorption ratio)이고 R는 반사율



(a)



(b)

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

(a) Quenching cycle (b) Tempering cycle

(reflection ratio)이다. 따라서 레이저 에너지를 보다 효과적으로 사용하기 위하여 금속표면에 비임 흡수제를 코팅(coating)시킬 필요가 있다. 보통 흡수성이 뛰어난 인산망간(Mn₃(PO₄)₇), 인산아연(Zn₃(PO₄)₂) 등을 화학코팅(chemical coating)시키거나 흑연(graphite, C)분말, 산화규소(SiO₂)분말, 흑색페인트(black paint)를 분무식(spray)으로 코팅시켜 사용하고 있다^{12,18)}. 본 연구에서는 레이저 표면경화 처리시 시료 표면의 레이저 비임에 대한 흡수율을 증가시키기 위해 공업적으로 많이 사용되는 흑색 페인트(black paint)를 시료표면에 2회 반복하여 균일하게 코팅하여 레이저 표면경화처리를 하였다. 코팅하기 전의 전처리로써는 시료표면의 산화막과 불순물을 제거하기 위해 20분간 아세톤 용액에서 초음파세척을 행하였다.

2.5. 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 Rofin-Sinar(RS) 840의

Table 2. Characteristics of 4 kw Laser Resonator.

발진방식	Gas flow 방식	3축 직교 횡류형	
	방전 방식	DC 방전	
방식	Gas	조성	He : N ₂ /O ₂ : CO = 53.9 : 28, 3 : 2.8
		소비량	85 l/hour
출력특성	정격 출력	4000 Watt	
	출력 파	CW	
	안정도	±2%	
비입특성	모드	multi mode	
	비입 직경	41 mm	
	발산 각	3 mrad	

연속출력과(continus wavelength, CW) 및 정격출력 4 kw의 횡류방식(transverse flow type) CO₂ 레이저 장치이며 레이저 비임을 발생하는 발진기(resonator)의 특성은 Table 2와 같으며 레이저 표면경화처리용 시편은 회전 테이블(rotary table)에 고정하여 필요한 조사속도에 일치하도록 회전속도를 측정하여 실시하였으며 시료표면의 산화방지과 플라즈마 제거를 위해 사용된 차폐가스(shielding gas)로는 아르곤(Ar)가스 또는 질소(N₂)가스를 사용하였다.

2.6. 실험조건

레이저 표면경화 처리 실험조건은 중탄소 합금강(AISI 4140)에 대하여 레이저 비임 모우드와 분산광 비임직경(2 mm)을 일정하게 하고 출력밀도(power density)와 조사속도(traverse speed)를 Table 3과 같이 각각 달리 변화시켜 레이저 표면경화처리를 하였다.

2.7. 현미경 조직 관찰

레이저 비임으로 조사된 시료표면 경화부의 미세 조직을 관찰하고 레이저 표면경화 처리되지 않은 시료와 처리된 시료의 마모시험 후 나타나는 마모상태를 비교

Table 3. Esperimental Conditions for Laser Surface Hardening Treatment.

Specimen	power density ×10 ³ (w/cm ²)		traverse speed (m/min)	
AISI4140	19.11.	25.48	1.5,	2.0
	31.85.	38.22	2.5,	3.0

관찰하기 위하여 광학현미경(optical microscope, Nikon NEC-5)을 사용하여 고찰하였다.

2.8. 단면경도시험

레이저 비임으로 조사된 시료의 단면경도 측정을 위해 시료표면을 0.3 μm 알루미늄 분말(Al₂O₃ powder)로 정마(polishing)한 후 미소 빅커스 경도시험기(micro-Vickers hardness tester, Matsuzawa KVK-E)를 사용하여 하중 300 g에서 경화부 최외표면으로부터 중심부(core)에 이르기까지 0.05 mm 간격으로 측정하였다. 경도 측정 후 유효경화깊이(effective case depth)는 최외표면으로부터 Hv=450의 경도치를 나타내는 깊이까지를 유효경화깊이로 설정하였다.

2.9. 마모시험

마모시험은 Fig.3에 나타난 바와 같은 Suzuki-type형 마모시험기(Suzuki-type wear testing machine, 일본 TOYO BALDWIN 사, 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 천청(chemical blance, 스위스 Metter 사, Model H-8)을 사용하여 마모시험전의 시험편의 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 0.54 m/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 화학천청을 사용하여 마모시험후의 무게 감량을 측정하였다.

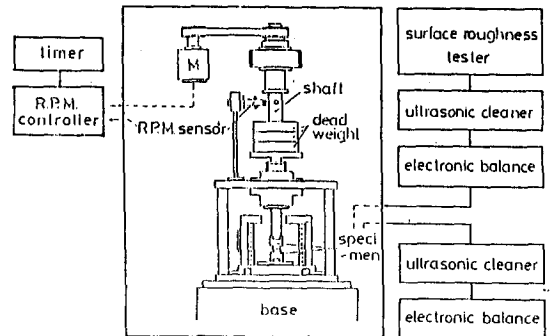


Fig. 3. Block diagram of wear testing machine.

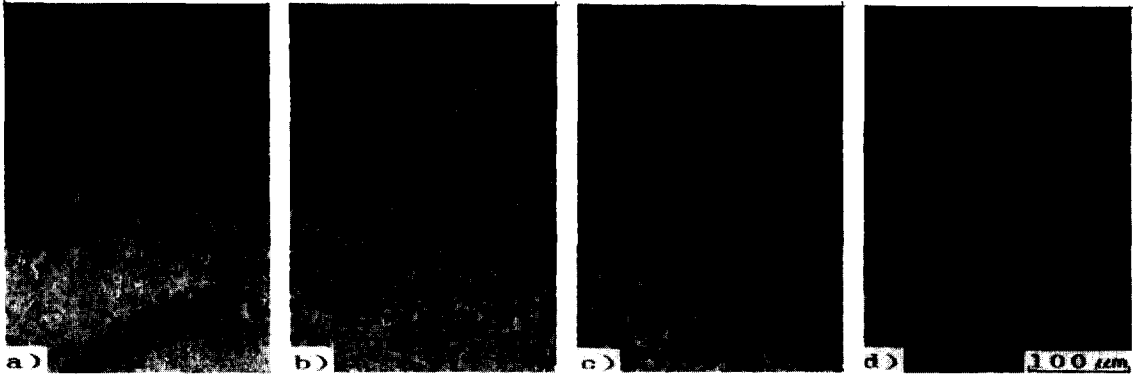


Photo 1. Optical microstructures of AISI 4140 coated with black paint and laser-surface-hardened for different power densities of (a) $19.11 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$, (b) $25.48 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$, (c) $31.85 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$ and (d) $38.22 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$ at a given traverse speed of 2.0 m/min.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 현미경 조직

레이저 표면경화 처리중 2.0 m/min의 동일한 조사속도에서 출력밀도 변화에 따른 중탄소 합금강의 현미경 조직을 Fig.5에 나타내었으며 출력밀도가 $19.11 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$ 에서 $38.22 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$ 으로 증가할수록 경화깊이가 현저히 증가함을 알 수 있다. 이는 동일한 조사속도에서 출력밀도가 증가함에 따라 단위 면적당 시료표면에 흡수되는 입열량이 증가하고 열영향부(heat affected zone)의 폭이 커지기 때문이다. 급속가열 후 급냉에 의한 레이저 표면경화 처리의 특성 중 Photo 1과 2에서

나타낸 것과 같이 경화층과 기지조직(matrix) 사이의 경계가 뚜렷하게 나타나는 것인데 이는 레이저 표면경화가 가능한 시료와 레이저 비임의 상호작용 시간(interaction time)이 0.1 sec~1 sec인 최단시간으로 최표면층에만 열원을 가하여 내부로의 확산변태를 억제시키기 때문이다. 이러한 레이저 표면경화 처리시 최표면층의 온도(T)는 Sandven³⁾이 제시한 식(2)와 같은 관계를 나타낸다.

$$T = T_0 + 2 Q/K\sqrt{\alpha t_b} \text{ierfc} \frac{\delta}{\sqrt{\alpha t_b}} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 T_0 는 실온(°C)이고 Q는 출력밀도(w/cm^2)이며 K는 열전도도($\text{w/cm}^\circ\text{C}$)이다. 또한 α 는 열확산도(cm^2/sec)이다.



Photo 2. Optical microstructures of AISI 4140 coated with black paint and laser-surface-hardened for different traverse speeds of (a) 1.5 m/min, (b) 2.0 m/min, (c) 2.5 m/min, (d) 3.0 m/min with a power density of $25.48 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$.

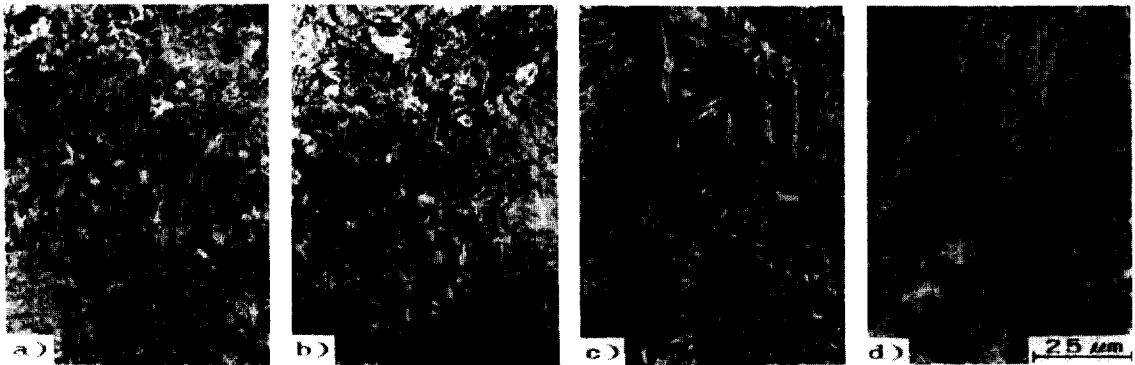


Photo 3. Optical microstructures of AISI 4140 coated with black paint and laser-surface-hardened for different power densities of (a) $19.11 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$, (b) $25.48 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$, (c) $31.85 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$ and (d) $38.22 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$ at a given traverse speed of 2.0 m/min.

$^2/\text{s}$)이고 δ 는 표면으로부터 측정된 깊이(cm)이며 t_b 는 조사시간(sec)이다.

Photo 2는 $25.48 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$ 의 동일한 출력밀도에서 조사속도가 1.5 m/min에서 3.0 m/min으로 증가함에 따른 표면층의 현미경 조직을 나타낸 것으로 Photo 1과는 상반되게 동일한 출력밀도에서 조사속도의 증가에 따라 시료표면에 흡수되는 입열량이 감소하기 때문에 경화깊이가 감소하게 나타난다. 레이저 열원의 영향이 미치지 못하는 내부(bulk)의 변태경화 되지 않은 부위의 조직은 잔류응력 제거를 위해 A_1 이하의 600°C 에서 어닐링(annealing) 처리한 후의 조직인 퍼얼라이트로 구성됨을 알 수 있다.

Photo 3은 Photo 1과 같은 처리조건에서 고배율로 관찰한 경화층의 현미경조직을 나타낸 것으로써 전체적으로 라스 마르텐사이트(lath martensite)와 미고용된 복합탄화물로 구성되어 있으며 출력밀도가 $19.11 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$ 에서 $38.22 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$ 로 증가 할수록 라스마르텐사이트가 조대해지고 미고용된 복합탄화물의 양이 감소해짐을 알 수 있다. 출력밀도가 $19.11 \times 10^2 \text{ w/cm}^2$ 일 때는 출력밀도가 낮음으로 단위 면적당 입열량과 비입강도(beam intensity)가 감소함에 따라 최표면층의 변태경화를 위한 오스테나이트 온도구간까지 충분히 가열되지 못함으로 인해 기지로부터의 냉각속도가 감소하고 탄화물을 오스테나이트에 충분히 고용할 수가 없다. 따

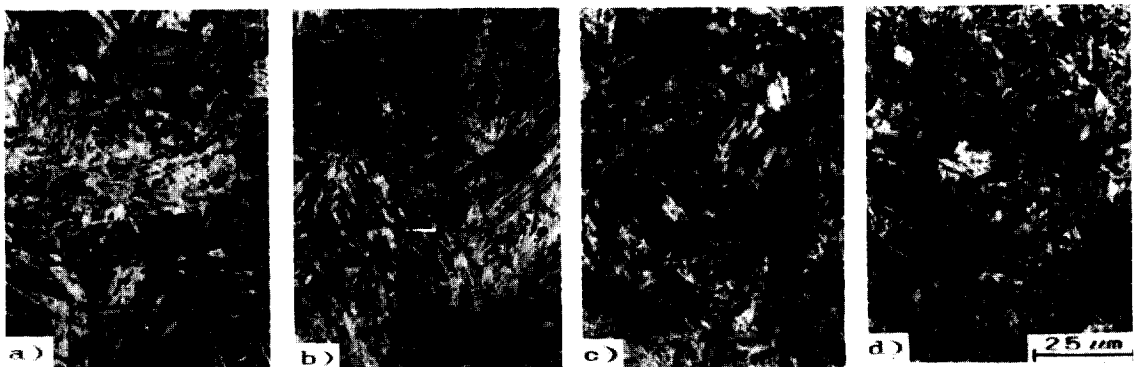


Photo 4. Optical microstructures of AISI 4140 coated with black paint and laser-surface-hardened for different traverse speeds of (a) 1.5 m/min, (b) 2.0 m/min, (c) 2.5 m/min, (d) 3.0 m/min with a power density of $25.48 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$.

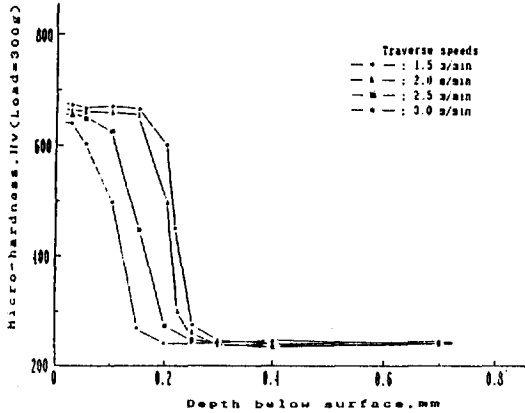


Fig. 4. Relation between hardness and the depth below surface of AISI 4140 coated with black paint and laser-surface-hardened for different traverse speeds with a power density of $19.11 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$.

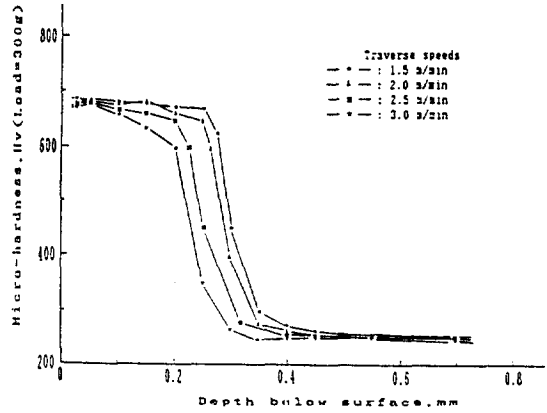


Fig. 5. Relation between hardness and the depth below surface of AISI 4140 coated with black paint and laser-surface-hardened for different traverse speeds with a power density of $31.85 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$.

라서 표면층의 조직은 미세한 라스 마르텐사이트로 구성되고 미용된 복합탄화물의 양이 증가하는 것이다. Photo 4는 동일한 출력밀도, $25.48 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$ 에서 조사속도를 변화시켰을 때의 현미경 조직을 나타낸 것이다. 조사속도가 1.5 m/min에서는 3.0 m/min보다 시료표면에 작용하는 비임의 조사시간이 증가됨에 따라 단위면적당의 입열량과 비임강도가 동시에 증가하여 최단시간내에 표면층은 오스테나이트 온도구간으로 가열되어 기지조직에 의해 급속 자기냉각(self-quenching)되기 때문에 조대한 라스 마르텐사이트와 미용된 복합탄화물의 양이 감소하는 것이다.

3.2. 경도특성

중탄소합금강을 동일한 출력밀도에서 조사속도를 각각 달리 변화시키면서 레이저 표면경화 처리 했을때의 단면경도 변화곡선을 Fig.4 과 5에 각각 나타내었다. Fig.4는 $19.11 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$ 의 동일한 출력밀도에서 조사속도를 1.5 m/min에서 3.0 m/min으로 증가함에 따라 나타나는 최표면층의 경도분포를 나타낸 것으로 최대 경도값은 다소 감소하고 경화깊이는 현저히 감소함을 알 수 있다. 조사속도가 1.5 m/min에서 3.0 m/min으로 증가함에 따라 최표면층의 최대경도치는 시료 표면의 단위면적당 흡수되는 입열량의 감소와 비임 강도의 저하로 인해 Hv=680에서 Hv=645로 감소하고 열영향부 폭의 감소로 인해 변태경화 깊이가 감소하여

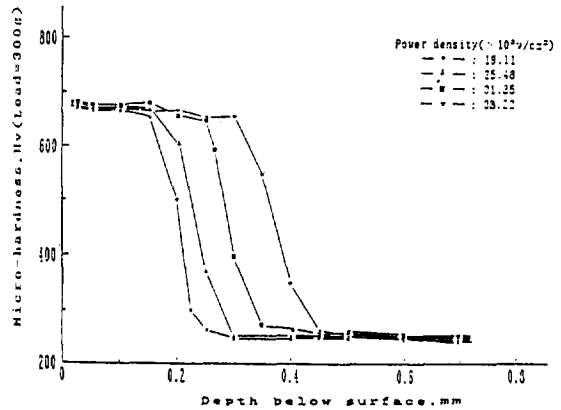


Fig. 6. Relation between hardness and the depth below surface of AISI 4140 coated with black paint and laser-surface-hardened for different power densities at a given traverse speed of 2.0 m/min.

경화깊이는 직선적으로 현저히 감소함을 나타낸다. Fig.5는 Fig.4보다 고출력밀도인 $31.85 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$ 의 동일한 출력밀도에서 조사속도의 증가에 따라 경도분포 곡선은 비교적 일정하게 분포하며 시료 표면부의 극부가열에 따라 표면층의 경도분포는 일정하게 유지되다가 레이저 비임의 고열원이 미치지 못하는 기지에서 급격하게 감소하는 특성을 나타낸다.

Fig.6은 2.0 m/min의 동일한 조사속도에서 출력밀

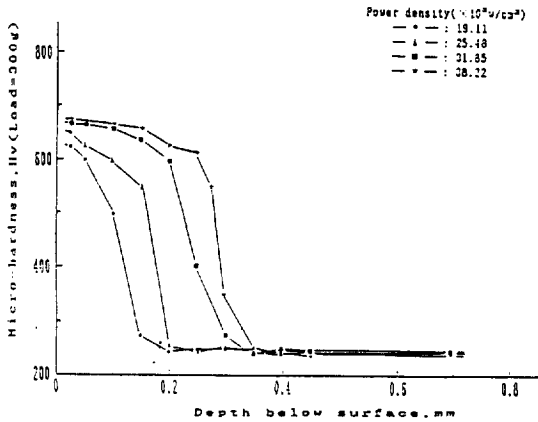


Fig. 7. Relation between hardness and the depth below surface of AISI 4140 coated with black paint and laser-surface-hardened for different power densities at a given traverse speed of 3.0 m/min.

도를 $19.11 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$ 에서 $38.22 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$ 으로 증가시켜 표면경화 처리한 후의 표면경도 분포로써 최표면층으로부터 0.15 mm 까지는 출력밀도의 증가에도 불구하고 최표면 경도치는 Hv=675 로써 일정하게 나타나고 0.15 mm 이상에서는 경화깊이의 변화폭이 현저히 증가함을 나타낸다. 이는 또한 최표면층으로부터 0.15 mm 까지는 각각의 조건에서 거의 동일한 레이저 변태 경화 특성을 나타내고 있다.

Fig. 7에서는 Fig. 6의 2.0 m/min 보다 증가된 3.0 m/min의 동일한 조사속도에서 출력밀도 변화를 $19.11 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$ 에서 $38.22 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$ 으로 증가함에 따른 표면경도 분포를 나타낸 것으로 Fig. 6의 조건하의 경도 분포 특성과는 상이한 변화를 나타낸다.

최표면층의 경도분포는 조사속도가 증가함에 따라 표면층의 레이저 열원에 의한 가열시간(heating time)이 현저히 감소함에 따라 고온으로 급속가열과 동시에 내부에 의한 급냉이 충분히 안되어 변태경화가 완만하게 일어나지 못함으로 감소하게 나타나는 것이다. 레이저 표면경화 처리는 고열원의 레이저 비입과 재료와의 적절한 상호작용시간이 필요하다. 주어진 출력밀도와 조사속도를 재료특성과의 상호작용으로 출력밀도의 변화에 따른 최대 경화능을 레이저 표면경화 처리시 얻을 수 있다. 조사속도의 변화와 출력밀도 변화에 따른 레이저 표면경화 처리시 표면층의 유효경화 깊이를 Fig. 8에 나타내었으며 동일한 조사속도에서 출력밀도의 증가에 따

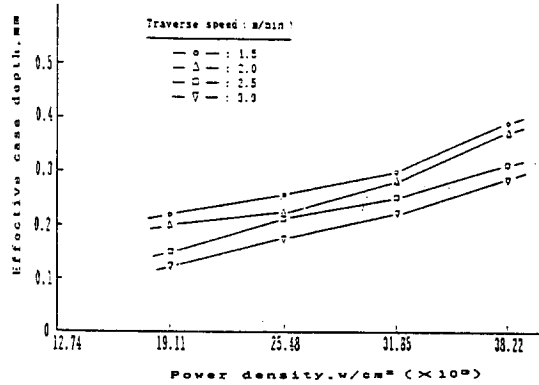


Fig. 8. Relation between effective case depth and power density of AISI 4140 steel coated with black paint and laser-surface-hardened for different traverse speeds.

라 유효경화 깊이는 1.5 m/min의 조사속도에서 0.23 mm에서 0.38 mm로 증가되고 3.0 m/min에서 0.13 mm에서 0.28 mm로 직선적으로 현저히 증가함을 나타낸다. $19.11 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$ 의 동일한 출력밀도에서 조사속도가 1.5 m/min에서 3.0 m/min으로 증가됨에 따라 0.13 mm에서 0.22 mm로 증가되고 $38.22 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$ 에서는 0.30 mm에서 0.38 mm로 증가되는데 동일한 출력밀도에서 조사속도의 증가에 따른 유효경화 깊이의 증가폭은 동일한 조사속도에서 출력밀도 증가에 따른 유효경화 깊이의 증가폭보다 감소함을 나타낸다. 동일한 조사속도에서 출력밀도의 증가에 따른 표면층의 레이저 입열량이 증가함에 따른 것인데 이는 레이저 표면경화 처리시 경화인자의 주 요소중 출력밀도가 시료표면의 경화능을 결정하는 데 가장 중요함을 알 수 있다.

3.3. 마모 특성

레이저 표면경화 처리된 시료의 마모특성을 규명하기 위하여 행해지는 마모기구는 미끄럼 마모(sliding wear), 마찰 마모(abrasive wear), 부식 마모(erosive wear), 절단기구 마모(cutting tool wear) 등이 있다²⁰⁾. 레이저 표면경화 처리가 이뤄지고 있는 자동차 부품 중 실린더 라이너, 피스톤 링등은 왕복운동에 따른 접촉으로 인해 미끄럼 마모가 마모의 주요소로 작용된다. 본 연구에서는 레이저 표면경화 된 시료를 동일한 하중에서 미끄럼 거리에 따른 마모량을 측정하여 레이저 표면경화 인자에 따른 마모특성을 규명하였다. 마모시험에

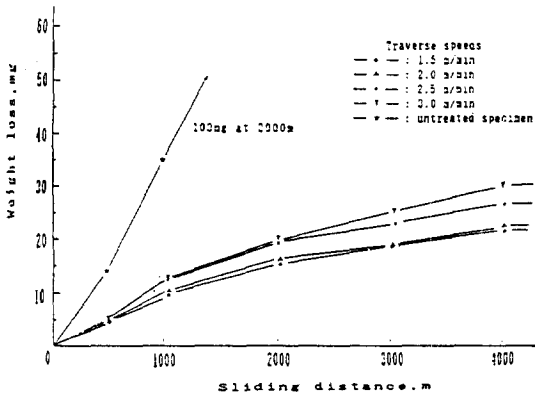


Fig. 9. Relation between weight loss and sliding distance of AISI 4140 coated with black paint and laser-surface-hardened for different traverse speeds with a power density of $19.11 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$.

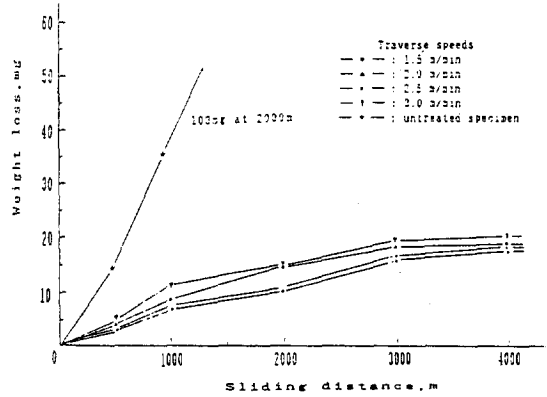


Fig. 10. Relation between weight loss and sliding distance of AISI 4140 coated with black paint and laser-surface-hardened for different traverse speeds with a power density of $31.85 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$.

서 시료의 체적감량과 마모량은 Archard²⁰⁾ 식 (3) 및 (4)로 나타낸다.

$$V = k \frac{S \cdot L}{3H} \dots\dots\dots (3)$$

여기서 V는 마모시험 중 체적감소량(mm³)이고 S는 마모거리(mm)이며 H는 마모시험편의 표면경도이다. 또한 k는 마모계수(mm²/g)이고 k 값의 범위는 1/10³~1/10⁸이며 L는 하중(g)이다.

$$W = k' S \cdot L \dots\dots\dots (4)$$

여기서 W는 중량감소량(mg)이고 k'는 마모상수로서 재료의 표면조도(surface roughness), 표면온도(surface temperature), 표면상태(surface environment) 등에 좌우된다. Leech²⁴⁾는 이러한 미끄럼 마모는 직접적으로 미끄럼 거리, 하중, 및 경화깊이에 관련된다고 하였다.

Fig. 9와 10은 레이저 표면경화 처리되지 않은 시료와 동일한 출력밀도에서 조사속도를 증가시켜 레이저 표면경화 처리한 시료의 마모시험 후 마모량을 나타낸 것으로 처리되지 않은 시료는 미끄럼 거리가 2000 m에서 103 mg으로 마모가 심하게 일어남을 알 수 있고 처리된 시료는 2000 m에서 20 mg 이내의 미량의 마모를 나타내어 레이저 표면경화 처리된 시료의 우수한 내마모 특성을 나타내고 있다. 미끄럼 거리가 2000 m까지는 전반적으로 마모량이 증가되나 2000 m 이후에서는 마모량이 둔화되고 있다. Fig. 9에서는 $19.11 \times 10^3 \text{ w/}$

cm²의 동일한 출력밀도에서 조사속도를 증가시켰을 경우 마모량은 21 mg에서 30 mg으로 증가되는데 이는 동일한 출력밀도에서 조사속도의 증가에 따라 최표면층의 경도가 감소하기 때문이며 미끄럼 거리가 4000 m 이후에서는 미세한 미량의 마모분이 산화되어 시료의 두면의 접촉을 방해하여 응착마모를 감소시키는 경마모(mild wear)가 일어나 마모량의 변화가 현저히 감소하는 것이라 여겨진다.

$31.85 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$ 의 동일한 출력밀도에서 조사속도의 증가에 따른 마모량의 변화를 Fig. 10에 나타내었으며 미끄럼 거리가 2000 m에서 조사속도가 1.5 m/min의 경우 출력밀도 변화가 $25.48 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$ 에서 $31.85 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$ 로 했을때의 마모량은 15 mg에서 10 mg으로 감소하나 4000 m에서는 동일한 상태에서 마모량은 21 mg에서 17 mg으로 감소함을 나타내고 동일한 표면경화 처리조건에서 미끄럼 거리의 증가에 따른 마모량은 15 mg에서 21 mg으로, 10 mg에서 17 mg으로 각각 증가함을 나타낸다. 조사속도가 3.0 m/min의 경우 출력밀도 변화가 $19.11 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$ 에서 $31.85 \times 10^3 \text{ w/cm}^2$ 로 했을때의 마모량은 미끄럼 거리가 2000 m에서 20 mg에서 15 mg으로 감소하나 미끄럼 거리가 4000 m의 경우 30 mg에서 20 mg으로 감소한다.

동일한 조사속도에서 출력밀도 증가에 따라 동일한 하중과 미끄럼 속도에서 미끄럼 거리에 따른 마모량의

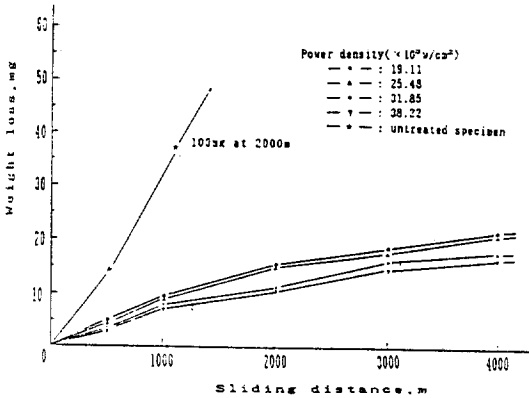


Fig. 11. Relation between weight loss and sliding distance of AISI 4140 coated with black paint and laser-surface-hardened for different power densities at a given traverse speed of 2.0 m/min.

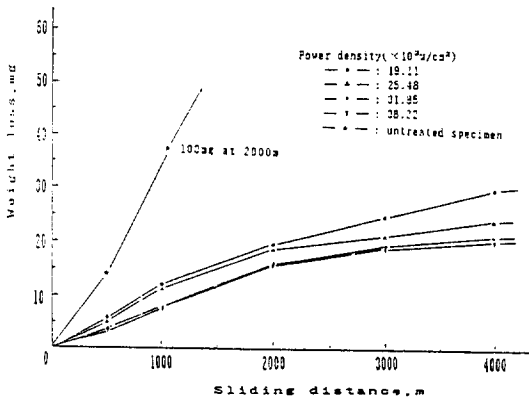


Fig. 12. Relation between weight loss and sliding distance of AISI 4140 coated with black paint and laser-surface-hardened for different power densities at a given traverse speed of 3.0 m/min.

변화를 Fig. 11 과 12 에 나타낸 것이며 2.0 m/min 의 조사속도의 경우 2000 m 에서 출력밀도의 증가에 따른 마모량은 15 mg 에서 10 mg 으로 감소함을 나타내고 4000 m 에서는 21 mg 에서 16 mg 으로 감소한다. 조사속도가 3.0 m/min 의 경우 동일한 상태에서 살펴보면 마모량은 2000 m 의 미끄럼 거리에서 21 mg 에서 14 mg 으로 감소하고 4000 m 의 경우 30 mg 에서 19 mg

으로 감소하는데 이는 동일한 출력밀도 증가하에서 조사속도가 2.0 m/min 에서 3.0 m/min 으로 증가하면 표면층에 흡수되는 레이저 비임의 입열량이 감소하기 때문에 미끄럼 거리에 따른 마모량이 증가하는 것임을 알 수 있다.

4. 결 론

레이저 비임의 출력밀도와 조사속도를 변화시키면서 레이저 표면경화 처리된 중탄소저합금강의 현미경 조직, 경도특성 및 내마모특성에 관한 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 동일한 출력밀도하에서 조사속도의 증가에 따른 현미경조직 변화는 라스 마르텐사이트의 미세화가 일어나고 미고용된 복합탄화물은 증가하며 동일한 조사속도하에서 출력밀도의 증가에 따른 변화는 라스 마르텐사이트의 조대화가 일어나고 미고용된 복합탄화물은 감소한다.

2) 조사속도의 증가에 따른 저출력밀도하에서 최표면 경도 변화는 다소 감소하나 고출력밀도하에서는 균일하게 분포한다. 출력밀도의 증가에 따라 저조사속도하에서 균일하게 분포하나 고조사속도에서는 다소 감소한다.

3) 25.48 × 10³ w/cm² 의 일정한 출력밀도하에서 조사속도의 1.5 m/min 에서 3.0 m/min 의 증가에 따른 유효경화깊이는 0.26 mm 에서 0.17 mm 로 감소하며 2.0 m/min 의 동일한 조사속도하에서 출력밀도의 19.11 × 10³ w/cm² 에서 38.22 × 10³ w/cm² 의 증가에 유효경화깊이는 0.20 mm 에서 0.36 mm 로 증가한다.

4) 동일한 하중하에서 미끄럼 거리에 따른 레이저 표면경화 처리된 시료의 마모량은 동일한 출력밀도에서 조사속도의 증가에 따라 증가하고 동일한 조사속도에서 출력밀도의 증가에 따라 감소한다.

5. 참 고 문 헌

1. 김홍구, 김경수, 길상철, 最新熱處理 技術 : 1981, p.133.
2. Charles A. Stickels, Larry E. Byrnes : Metal Hand Book (9 th ed), vol 4, 1981, p.133.
3. Ole Sandven : Metal Hand Book (9 th ed), vol 4, 1981, p.507.

4. J. Mazumder : *J. of Metals*, vol 35, no.5 (1983) 18.
5. W. Konig, F. Treppe : *The Industrial Laser Annual Hand Book*, Tulsa. Oklahma USA (1989) 118.
6. H. Bande, G.L. Esperance, M.U. Islam, and A.K. Koul : *Materials Science and Technology*, vol 7 (1991) 452.
7. H.W. Bergmann and E.Geissler, Erlangen : ECLAT '88, (1988) 109.
8. R. Dekumbis and A.Frenk, Lausanne : ECLAT '88, (1988) 134.
9. C. Banas, R. Nuss : ECLAT '90, (1990) 103.
10. M.F. Ashby, K.E. Easterling and W-B Li : *Laser Processing of Materials AIME*, (1984) 225.
11. James I. Luxon, David E. Parker : *Industrials and Their Applications*, (1985) 222.
12. G. Moulin, J.M. Siffre, P. Marcus : *Materials Science and Technology*, vol 6 (1990) 100.
13. M. Fastow, M. Bamberger, N. Nir : *Materials Science and Technology*, vol 6 (1990) 900.
14. S. Mandziej, M.C. Seegers, J. Godijk : *Materials Science and Technology*, vol 6 (1990) 350.
15. Victor, G. Gregson : *Laser Processing*, Laser Inst of America. Toledo, vol 668 (1986) 1.
16. G.L. Olson and J.A. Roth : *Laser Processing*, Laser Inst of America. Toledo, vol 668 (1986) 82.
17. Rosenthal L. Engel : *Source Book on Applications of the Laser in Metalworking*, ASM, Metals Park (1976) 149.
18. R. Padmanabhan : *Laser Materials Processing -ICALEO '86* (1986) 185.
19. D.S. Gnanamuthu : *Source Book on Applications of the Laser in Metalworking*, AEM. Metals Park, (1976) 324.
20. P.A. Molian : *Surface Modification Technologies*, AIME (1988) 237.
21. S.D. Allen and J.Y.Y. Yang : *Surface Modification Technologies*, AIME (1988) 303.
22. H.E. Cline and T.R. Anthony : *J. of Applied Physics*, vol 48, no.9 (1977) 3895.
23. C. Dawes and D.F. Tranter : *Heat Treatment of Metals*, vol 4 (1974) 121.
24. P.W. Leech : *Wear*, vol 86 (1986) 315.