

레이저 표면개질된 SM45C강의 마멸거동

배춘익 · 옥철호* · 박흥식** · 전태옥**

경남정보대학 기계설계과

*동아대학교 대학원

**동아대학교 공과대학 기계공학과

Wear Behavior of Laser Modified SM45C Steel

Choon-Ik Bae, Chul-Ho Ok, Heung-Sik Park and Tae-Ok Jun

Department of Mechanical Design, Kyung Nam College

**Department of Mechanical Engineering Graduate School, Dong-A University*

***Department of Mechanical Engineering, Dong-A University*

Abstract—Radiation of Nd-YAG laser changes and refines the surface microstructure of steels, which gives rise to enhancement of hardness and resulting wear resistance. In the present work, the effect of processing parameters during the surface modification with laser on the wear behavior of the SM45C steel was studied by means of wear testing. The counter material was alumina ceramics. The microstructure observation revealed the dependence of molten depth and width on the defocusing distance. The laser modification of steel surface give rise to improved wear resistance in the testing speed range of either <0.2 m/s or >0.9 m/s. Material transfer from steel was wear observed the surface of counter material when testing speed was lower than 0.7 m/s.

Key words—Defocusing distance, power density, molten depth, oxidation speed, wear speed.

1. 서 론

일반적으로 레이저에 의한 표면개질은 고품질·고정도·고속·비접촉 공정이며, 열투입 조절이 가능하므로 강 부품의 마멸저항과 피로강도를 향상시킬 수 있는 방법중의 하나이다[1,2]. 그러나 빔에너지가 상당히 좁은 미소영역에 집중함으로써, 빔의 강도와 폭의 한계성으로 인하여 넓은 부분은 부적당하며, 또한 열처리를 전체적으로 하였을 때 담금질 균열이나 치수변화에 따른 2차 가공비용이 증가하게 된다.

이러한 적용상의 어려움을 해결하기 위하여 국부적 변형을 최소화하고, 단시간에 일정영역만을 냉각시키기 위한 급속 자기담금질(self quenching)을 통하여 변태경화(transformation hardening)되는 원리를 이용한 것이 레이저에 의한 표면개질이다[3,4,5].

레이저에 의한 표면개질은, 첫째 종래의 열처리에 비해서 에너지가 높아 내부의 열 확산이 억제되기 때

문에 열처리 변형을 최소한으로 억제할 수 있으며, 둘째로 고주파 열처리에 비해서 처리속도가 빠르며, 다른 열처리에 비해서 경도가 높고 또한 제어성이 우수하며, 셋째로 재료가 종량에 비해 면적이 작은 경우 비용이 적게 드는 이점이 있다[6,7]. 이러한 이유로 레이저에 의한 표면개질은 모재의 재질보다 미세하고, 강한 마멸저항을 가지는 재료성질을 변환시키는 데 이용될 수 있다.

여기에 사용되는 레이저는 보통 연속파(continuous wave, CW)와 펄스(pulse) 레이저를 사용하고 있지만, CO₂ 레이저 빔에서는 10.6 μm 의 파장을 갖기 때문에 용입량이 많고 일반적으로 대용량에 많이 사용되고 있으며, 1.063 μm 의 파장을 갖고 있는 YAG 레이저는 미소부품이나 소형용접에 사용되고 있다[8]. 이것은 레이저의 파장이 길수록 재료 표면에서의 반사율이 높으므로 파장특성에 따라 동일한 재료라도 용입깊이가 변화하게 된다.

본 연구에서는 펄스 Nd-YAG 레이저를 이용하여 디포커스 거리 변화에 따른 기계구조용 탄소강 SM45C의 경화층 깊이와 폭, 표면하방의 경도분포 및 열영향부의 표면상태를 검토하였다. 그리고 마멸 시험편으로 최적의 유효경화 깊이를 가지는 레이저 조사조건으로 표면개질하여, 상대재료인 알루미나 세라믹스(Al_2O_3)와 함께 미끄럼 마찰시험을 통하여 표면개질강의 마멸거동을 조사하였다.

2. 실험방법

2-1. 실험재료

본 실험에 사용한 실험재료는 펄스 Nd-YAG 레이저로 표면개질한 기계구조용 탄소강 SM45C를, 그리고 마멸시험을 위한 상대재료는 소결한 순도 95%의 알루미나 세라믹스(Al_2O_3)로서, Table 1에는 알루미나 세라믹스의 화학 성분을, Table 2에는 실험에 사용한 레이저 빔의 조사조건을 표시하였다.

Fig. 1에는 마멸시험을 위한 SM45C와 세라믹스의 시험편 형상을 나타낸 것으로, 마찰면은 링(ring)상으로 하였다. 그림 (a)는 SM45C의 것으로 세라믹스의 표면에 완전한 마찰이 되도록 하기 위하여 마찰면의 폭을 세라믹스보다 1.5 mm 좁게 하였고, (b)는 세라믹스의 형상으로 외경 22 mm, 내경 15 mm로 하였다.

2-2. 실험장치 및 실험방법

2-2-1. 레이저에 의한 표면개질

Fig. 2는 SM45C의 표면개질을 위하여 사용한 펄스형 Nd-YAG 레이저 조사장치를 나타낸 것으로, 이것은 크세톤(Kr) 아크 플래시 램프형으로, 파장은 1,064 nm, 멀티모드의 빔으로서 평균출력은 400W에 최대출력 5 KW, 펄스 폭은 1~9.9 ms 및 펄스의 반복은 200 Hz까지 레이저 조사가 가능하다.

Table 1. Chemical compositions of alumina ceramics (wt.%)

	Al_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	Fe_2O_3	Na_2O
95% Ceramics	95.2	3.53	0.27	0.05	0.05	0.25

Table 2. Laser irradiating condition

Frequency (PPS)	Beam traveling velocity(m/s)	Power (J/s)	Pulsewidth (ms)	Defocusing distance (mm)	Beam mode	Shielding gas
10	10	3	3	4, 6, 8, 10, 12, 14	Multi mode	Ar

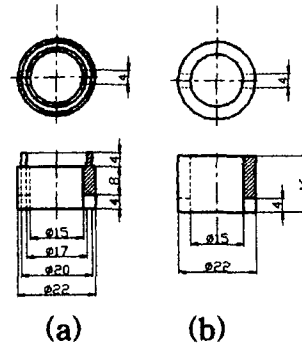


Fig. 1. Shape and dimensions of specimens.

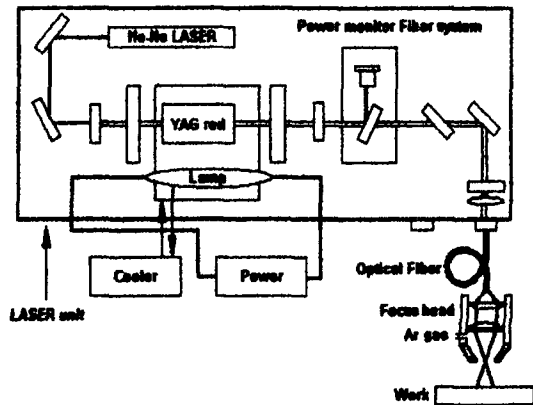


Fig. 2. Schematic diagram of laser unit.

그림에서 헬륨-네온 레이저에서 발진된 레이저 빔은 정반사경과 부분 투과반사경 사이에서 램프에 의하여 펌핑된 YAG 로드(Rod)와 결합하여 증폭하게 되어 있으며, 빔은 옵티컬 파이버(optical fiber)에 유도되어 포커스 헤드(focus head)에 집광되어 시험편에 조사하는 구조로 되어 있다.

레이저 조사는 레이저 발진장치에서 옵티컬 파이버로 유도된 레이저 빔을 포커스 헤드에 집광시키고, 이 포커스 헤드를 조절하여 디포커스 거리에 따라 시험편 표면이 렌즈의 초점 높이가 되도록 조절하였다. 그리고 시험편은 X-Y 스테이지 구동 로봇 위에 시험편을 고정시켜, 일정한 속도로 이동시킴으로서 표면을 급속 용해 및 냉각시켜 표면개질 처리를 행하

었다. 또한 포커스 헤드의 내부의 렌즈와 실드 글라스의 보호를 위해 헤드 측면에 아르곤(Ar)가스를 분당 15 l/min로 분사시켰다.

시험편이 1회전하는 시간은 15 sec이며, 테이블의 회전속도는 10 mm/s, 펄스 수는 10 pps로 하였다. 최초 스폿(spot)위치를 찾아 초점위치를 정하고(디포커스 거리 0 mm), 그 위치를 기준으로 하여, 렌즈가 멀어지는 방향으로 초점거리를 이동하여, 조사표면의 개질특성을 조사하였다. 시험편인 SM45C의 표면개질은 디포커스 거리 8 mm, 에너지밀도 3 J/s, 펄스 폭 3 ms 및 조사속도 10 mm/s로 행하였다.

2.3. 마찰·마멸 실험

Fig. 3은 본 연구를 위하여 설계 제작한 마찰·마멸시험기의 개요도를 나타내었다. 작용하중은 상부 시험편 지지부에 사하중을 걸어 가압하였고, 미끄럼 속도는 AC모터를 이용하여 V 벨트로 구동시켜 이를 인버터(inverter)로 무단구동하였다. 실험방법으로 고정부인 상부에는 상대재료인 세라믹스를, 회전부인 하부에는 레이저 표면개질한 SM45C를 부착하여 각 실험조건에 따라 마찰실험을 행하였다. 양 시험편은

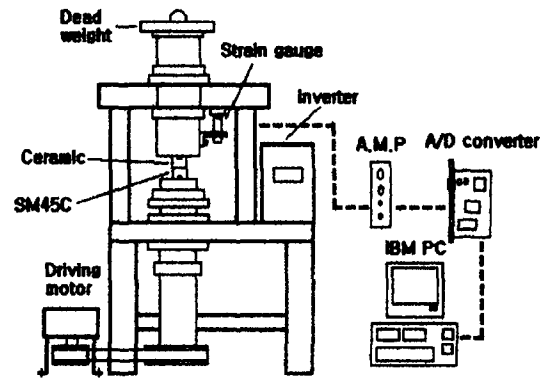


Fig. 3. Schematic diagram of experimental unit.

연마지(#200~1200)로 연마하여 그 표면조도를 $R_{max} = 2 \mu\text{m}$ 로 일정한 후 약 3분간 초음파 세정 후 건조시켜 실험조건에 따라 마찰실험을 행하였다.

그리고 실험 후 마멸량은 0.1 mg의 디지털 천칭을 사용하여 실험전 후의 중량의 변화로 측정하였으며, 마찰면은 화상처리 시스템의 CCD 카메라를 이용하여 마찰면을 비교 분석하였다. 실험조건으로 미끄럼속도를 0.1~0.8 m/sec, 작용하중은 5 kg, 10 kg 및 15 kg의 3단계로 하였으며, 미끄럼거리는 3.0 km까지로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 레이저 조사조건에 따른 경화층

Fig. 4에는 에너지 출력 3 J/s, 펄스 폭 3 ms을 일정하게 레이저 빔을 조사하였을 때 디포커스 거리에 따른 경화 깊이와 경화 폭을 나타내었다. 디포커스 거리가 증가함에 따라 경화 깊이는 감소하지만 경화 폭은 거의 비례적으로 증가하고 있다. 이것은 디포

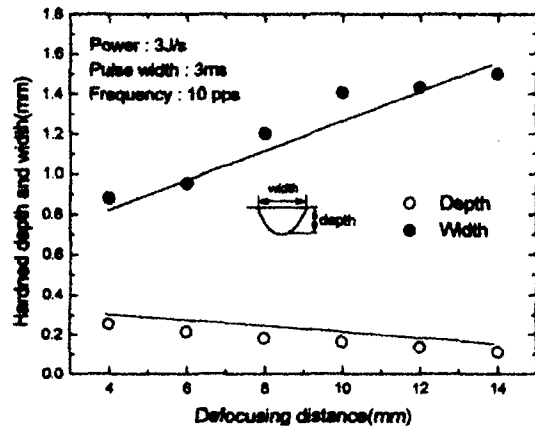


Fig. 4. Influence of defocusing distance on hardened depth and width.

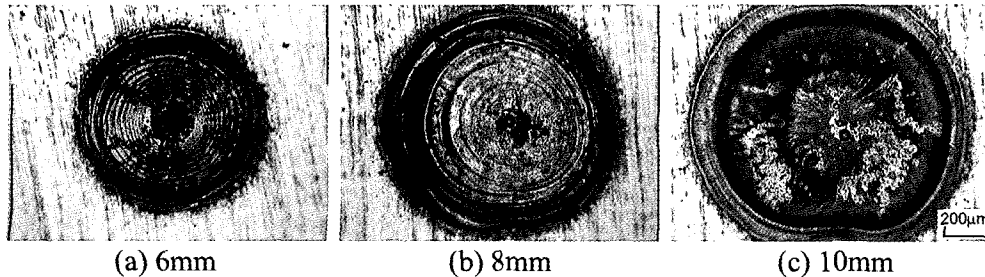


Fig. 5. Micrographs of laser irritated surface showing effect of defocusing distance.

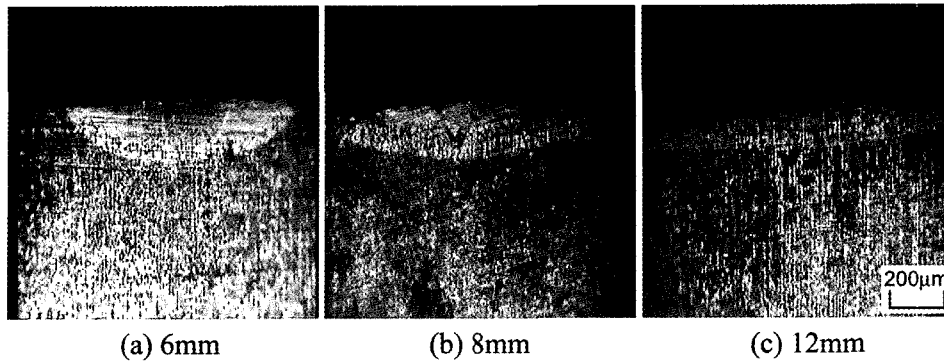


Fig. 6. Micrographs of cross section showing effect of defocusing distance.

빔의 강도저하로 인하여 입열량이 감소하고, 또한 조사부 표면의 면적이 증가하기 때문이다.

Fig. 5는 디포커스 거리에 따른 레이저빔의 조사면을 나타낸 것으로서, 디포커스 거리가 (a)6 mm의 경우 중심으로부터 원형 불결모양의 경화층을 형성하고 있지만 디포커스 거리가 증가할수록 레이저 조사면의 넓이와 열영향부의 면적이 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히, 디포커스 거리가 12 mm이상이 되면, 레이저 빔의 강도저하로 인하여 입열량이 감소[7]하여 거의 표면개질이 이루어지지 않았다.

Fig. 6은 디포커스 거리에 따른 경화층의 깊이와 폭을 광학현미경으로 나타낸 것이다. 디포커스 거리가 (a)6 mm에서는 경화부가 깊고, 폭이 좁게 나타나면서 내부로 들어갈수록 약간의 테이퍼를 가진 원추형으로 형성되어 있다. 그리고 디포커스 거리가 (c)12 mm의 경우에는 (a)6 mm 경우보다 경화 깊이가 작아지고 그 폭은 점차 넓어지고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 빔 조사부의 표면에서 내부로 깊이 0.25 mm까지의 경도치 분포를 디포커스 거리에 따라 측정된 결과로서 디포커스 거리가 증가할수록 경화층의 경도치는 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 디포커스 거리 6 mm의 경우 표면에서 0.05 mm는 870 Hv, 0.1 mm까지는 764 Hv 그리고 0.25 mm에서는 거의 모재의 경도치와 유사한 250 Hv로 된다는 것을 볼 수 있다. 이것은 조사부 표면에서는 레이저 빔의 집광성으로 오스테나이트 변태 개시점까지 급속 가열되고 또한 급냉에 의한 자기담금질(self quenching)로 현미경 조직이 마르텐사이트(martensite)로 변태하여 높은 경도치를 보이지만 표면 하부로 갈수록 냉각속도의 저하로 fine pearlite 또는 medium

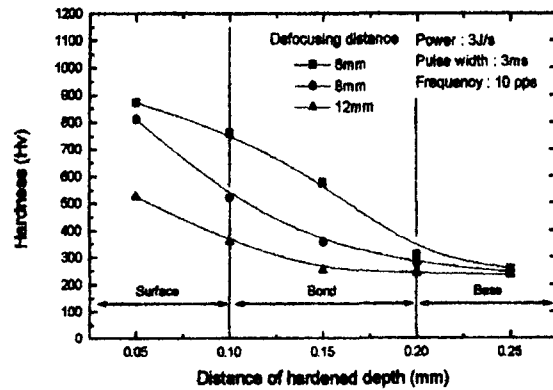


Fig. 7. Relationship between distance of hardened depth below subsurface and hardness.

pearlite 조직으로 변태[9]되었기 때문이다. 이로부터 디포커스 거리에 따라 다르지만 경도치가 급격히 감소하는 표면하방의 깊이까지를 경화층의 유효경화 깊이가 된다.

3-2. 레이저 표면개질강의 마멸거동

레이저 빔에 의하여 경화된 표면개질강의 마찰조건에 따른 마멸거동을 조사하기 위하여 본 연구에서는 디포커스 거리 8 mm로 경화시킨 시험편을 사용하여 마찰·마멸실험을 행하였다. 여기서 디포커스 거리 8 mm로 조사한 시험편을 사용한 것은 Fig. 4에서처럼 디포커스 거리가 짧은 경우는 경화깊이는 깊지만 경화 폭이 좁고, 반대로 디포커스 거리가 긴 경우는 경화 폭은 넓지만 경화깊이가 작아지기 때문이었다.

Fig. 8은 작용하중 P 가 5 kg, 10 kg 및 15 kg에서,

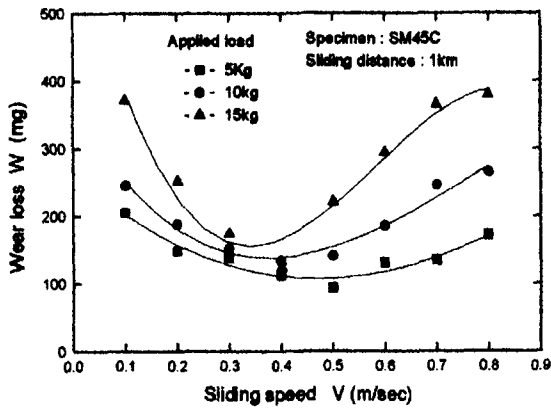


Fig. 8. Relationship between wear loss and sliding speed.

미끄럼속도 V 를 단계적으로 변화시켰을 때의 마멸량 W 를 나타낸 것이다.

W 는 미끄럼속도 V 가 0.1 m/sec의 저속영역에서부터 V 의 증가에 따라 감소하다가

중속도인 영역인 0.4 m/sec 근처에서 최소값을 나타내며, 이 이후의 속도에서는 다시 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 V 에 관계없이 P 가 증가할수록 증가하지만, P 가 5 kg에서는 0.5 m/sec에서, 10 kg과 15 kg에서는 0.4 m/sec에서 마멸량이 최소값을 가진다는 것을 볼 수 있다.

그림에서 V 가 0.1 m/sec의 저속영역에서 W 가 큰 값을 가지는 것은 양 시험편 돌기의 직접접촉에 의한 응착마멸이 지배적으로 작용한 결과이며, 중속영역에서 W 가 최소값을 가지는 것은 저속에서 나타나는 응착마멸의 경우와는 달리 미끄럼 속도의 증가에 따른 마찰면의 온도상승과 함께 산화반응 속도가 증가하여 강의 마멸분이 산화[10,11]되어 실제 접촉을

감소시키기 때문으로 생각된다. 그리고 0.7 m/sec 이상의 고속영역에서 다시 W 가 증가하는 것은 미끄럼속도가 고속도가 되면 양 시험편 돌기부에서 생성되는 마멸속도가 보다 빠르게 진행되어 산화물의 생성이 적고, 또한 실제 접촉부의 온도상승에 의한 강 표면의 연화로 인하여 연삭마멸과 응착마멸이 진행된 결과라고 생각된다.

Fig. 9는 마멸량 W 가 가장 큰 값을 가지는 작용하중 15 kg에서의 실험 후 레이저 표면개질강의 마찰면을 나타낸 것으로 저속인 (a) 0.1 m/sec의 경우는 양 시험편 재료의 직접접촉에 의하여 부분적으로 소착현상이 발생하여 마멸이 진행된 것을 볼 수 있다.

중속도인 (b) 0.4 m/sec에서는 마찰면 전 부분에 적갈색의 산화물이 덮혀 있지만 고속도인 (c) 0.8 m/sec의 경우는 미끄럼 방향으로 부분적으로 흑색의 산화물의 띠를 가지는 마찰트랙과 경한 세라믹스의 돌기에 의한 연삭마멸과 생성된 groove에는 부분적으로 응착에 의한 마찰흔을 볼 수 있다. 이러한 마찰면의 상태는 작용하중 P 에 관계없이 각 속도에서 유사한 경향을 나타내었다.

Fig. 10은 Fig. 8과 동일한 마찰조건에서 상대재료인 세라믹스의 마멸량 W 를 나타낸 것으로, W 는 실험재료인 표면개질강의 경우와는 달리 각 작용하중 P 에서 미끄럼속도 V 가 0.7 m/sec 이하에서는 오히려 세라믹스의 마멸분 중량이 증가하고 있다는 것을 알 수 있다. 특히 Fig. 8의 표면개질강에서 처럼 각 P 에서 W 의 최소값을 나타내는 미끄럼속도 영역에서 세라믹스의 마멸분 중량이 가장 크게 증가하고 있다는 것을 볼 수 있다. 이것은 강과 세라믹스의 조합으로 마찰실험을 할 경우 강에서 전이된 마멸입자와 산화물이 소결제품인 세라믹스의 미소기공에 충전하

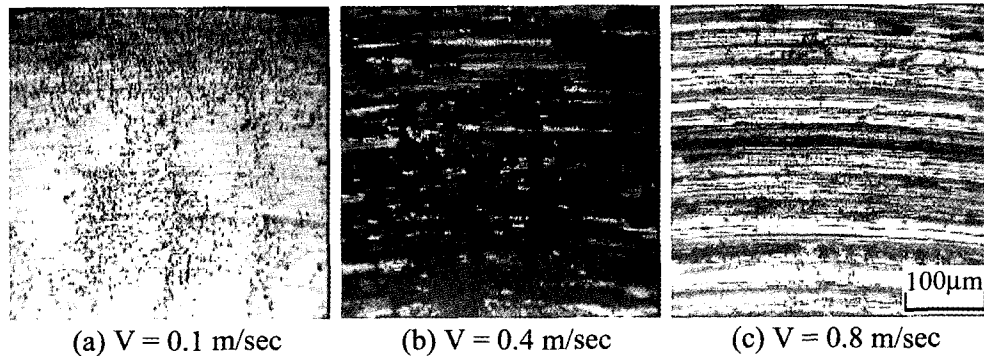


Fig. 9. Photographs of the contact surface for SM45C.

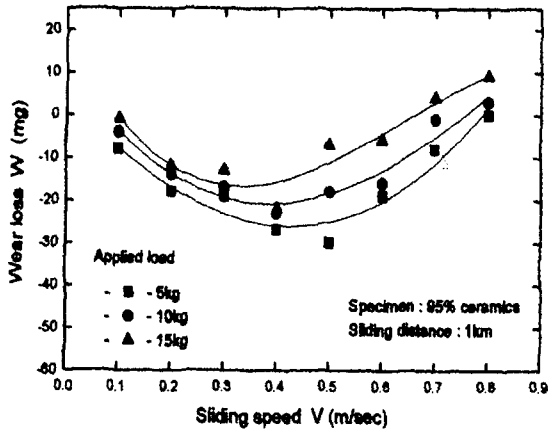


Fig. 10. Relationship between wear loss and sliding speed.

고, 또한 마찰면에 강하게 부착하게 된다. 이로 인하여 세라믹스의 마멸에 의한 중량의 감소보다는 강에서의 전이물과 산화물과 같은 흡착물질[12]에 의한 중량증가가 더욱 크게 작용한 결과로 생각된다. 이것은 표면개질강에서 W 의 최소값을 나타내는 미끄럼속도 영역에서 가장 현저하게 나타나게 된다. 그러나 세라믹스의 W 가 감소하는 V 가 0.7 m/sec 이상의 경우는 전술한 바와 같이 강 표면의 산화반응 속도보다 마멸속도가 보다 빠르게 진행되어 세라믹스와 강과의 실제 접촉이 지배적으로 진행된 결과라고 생각된다.

Fig. 11은 작용하중 5 kg에서 상대재료인 세라믹스의 미끄럼속도 v 에 따른 마찰면을 표시한 것으로서, (a) 0.1 m/sec, (b) 0.5 m/sec 및 (c) 0.8 m/sec 이다. 저속 영역인 (a) 0.1 m/sec의 경우는 미끄럼 방향으로 응착 마멸의 마찰흔적과 강에서 전이된 산화물의 좁은 폭을 가지는 부분을 볼 수 있다. 중속도인 (b) 0.5 m/

sec의 마찰면은 거의 전 부분에 걸쳐 적갈색의 산화물로 덮혀 있어 이것에 의하여 세라믹스의 중량이 오히려 증가되었다. 그리고 고속도인 (c) 0.8 m/sec의 경우는 마찰면의 가장자리 부분에 산화물로 덮혀 있지만 나머지 부분은 강과의 응착에 의한 마멸이 주로 작용하여 형성되어 있다는 것을 볼 수 있다.

Fig. 12에는 레이저 표면개질강의 미끄럼 거리에 따른 마멸량을 알기 위하여 전술한 응착마멸이 주 마멸기구로 작용하는 미끄럼속도 V 가 0.1 m/sec의 경우 각 작용하중 P 가 5 kg, 10 kg 및 15 kg에서 미끄럼거리 L 에 따른 마멸량 W 의 마멸진행 곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 처럼 P 가 5 kg에서는 L 의 증가와 함께 거의 직선적으로 증가하며, P 가 10 kg과 15 kg에서는 L 의 증가에 따라 L 이 1 km까지는 W 가 L 에 비례하여 증가하지만 그 이상의 L 에서는 마멸을 (단위길이 및 단위하중 당 마멸량)이 감소한다는 것을 볼 수 있다. P 가 10 kg과 15 kg에서 L 이 1 km까지는 W 가 L 에 비례하여 증가하는 것은 양 시험편의 실제 접촉부의 응착에 의한 돌기부의 소성변형이 진행되는 초기마멸 상태고, 그 이상의 L 에서는 L 의 증가와 함께 실제 접촉부의 온도상승에 의하여 표면개질한 강 표면에 형성되는 산화물의 보호막에 의한 정상마멸이 진행된 결과로 생각된다. 그리고 미끄럼속도 V 를 증가시켜도 V 가 0.1 m/sec의 경우와 유사한 경향을 나타내었지만 초기마멸에서 정상마멸로 천이하는 임계 미끄럼거리가 각 미끄럼속도에 따라 변화하였다.

Fig. 13에는 작용하중 P 가 10 kg, 미끄럼거리 L 이 2 km에서의 마멸분을 채취하여 EDX를 이용하여 성분분석을 행한 결과를 나타낸 것이다. 마멸분의 대부분은 Fe이고, 부분적으로 알루미늄이 세라믹스에서 탈락한 Al과 Si도 나타나지만 산소도 관찰되고 있어

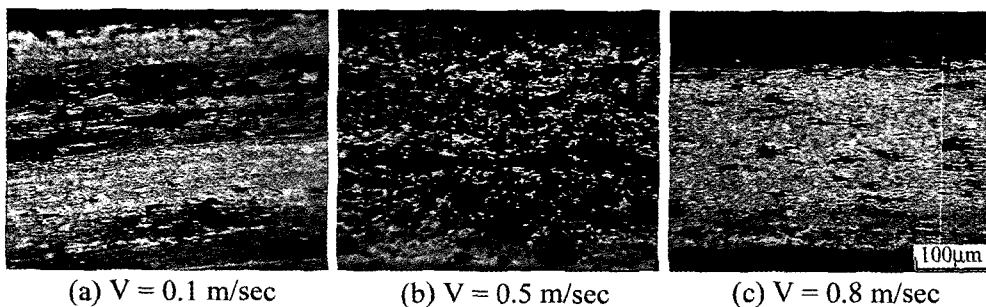


Fig. 11. Photographs of the contact surface for alumina ceramics.

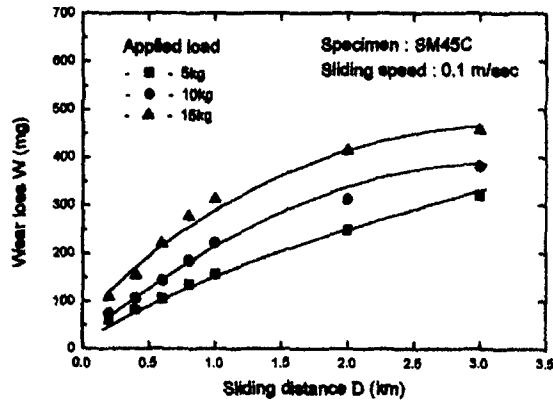


Fig. 12. Wear curve in wear loss vs sliding distance.

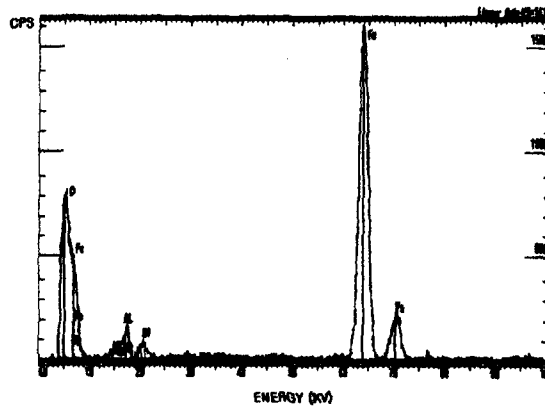


Fig. 13. EDX analysis for wear debris: P; 10 kg, L; 2 km.

마멸분에 함유되어 있는 화합물은 산화물이며, 이 산화물이 양 시험편의 접촉부에 형성되어 마멸을 감소시켜 준 것으로 생각된다.

그리고 작용하중 P 가 5kg과 15kg의 경우에서도 10kg의 경우와 마찬가지로 마찰면에는 대부분 Fe로 구성되어 있어 역시 Fe의 산화물이 접촉면에 큰 역할을 하는 것을 확인하였다.

4. 결 론

기계구조용 탄소강 SM45C에 펄스 Nd-YAG 레이저를 조사하여 표면개질에 의한 개질조건과 대기중에서의 마멸거동을 알기 위하여 원통형 시험편으로 미끄럼 마찰실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 레이저 빔의 디포커스 거리가 증가할 수록 경화깊이는 감소하지만, 경화 폭은 증가한다.

2. 표면개질강의 미끄럼속도에 변화에 따른 마멸량은 저속영역과 고속영역에서 증가하며, 중간영역의 미끄럼속도에서는 최저치를 가진다.

3. 미끄럼속도가 0.7 m/sec 이하의 영역에서 상대재료인 세라믹스는 강에서 전이된 산화물의 흡착으로 오히려 마멸분 중량이 증가한다.

4. 미끄럼거리에 따른 마멸량은 작용하중에 증가에 따라 거의 직선적으로 증가하지만, 10 kg과 15 kg의 경우는 미끄럼거리 1 km까지는 초기마멸이 진행되고, 그 이상의 거리에서는 마멸율은 감소한다.

참고문헌

1. Z. Guangjun and L. Ming, "Microstructure and Wear Resistance of Nodular Cast Iron Laser Heat Treatment," LAMP'92, pp.719-723, 1992.
2. R. VILAR, R.COLAÇO and DURÃO "Laser Surface Melting of Martensitic Stainless Tool Steels," LAMP'92, pp.779-782, 1992.
3. J. Wilson and J. F. B. Hawkes, "Lasers Principles and Applications," Prentice Hall, pp.1-33, 1987.
4. 先端加工技術, "超精密加工技挑戰," 工業調査會, pp.146-151, 1984.
5. F. O. Olsen, "Pulsed Laser Materials Processing, Nd-YAG versus CO₂ Lasers," CIRP, Vol. 44, No. 1, pp. 141-145, 1995.
6. 吉岡俊朗, 白井靖幸, 金釜憲夫, 宮崎俊行, "電子ビーム加工における溶融層の形成とAEの發生," 精密機械, 51, 8, pp. 1534-1539, 1985.
7. M. R. Fishman and J. Zahvi, "Structure and micro hardness of laser-hardened 1045 steel," J. MAT. SCI. 23, pp.1547-1552, 1988.
8. 高橋英明, 温井勝敏, 若林潤, "レザ調査による金屬セラミックの局部表面處理," Materia Japan, 第34卷, 第12號, pp.1276-1283, 1995.
9. 精密工學會表面改質に関する調査研究分科會, "表面改質技術," 日刊工業新聞社, pp.124-130, 1988.
10. 宇佐美初彦, 中村隆, 馬淵英二, "セラミックの摩擦實驗(第3報)," トラロイボジスト, 第34卷, 第12號, pp.1276-1283, 1995.
11. Y. Enomoto and K. Mizuhara, "Characterization of Wear Behavior of Steel and Ceramics in the VAMAS round Robin Tests," Wear, 162-164, pp.119-125, 1993.
12. A. Ravikiran and B. N. Pramila Bai, "High speed Sliding of Al₂O₃ Pins against an EN-24 Steel Disc," Wear, 162-164, pp.296-301, 1993.