

‘YAG 레이저에 의한 표면경화강의 레이저 경화와 마멸특성

옥철호*, 서영백(동아대 생산기술연구소), 조연상, 배효준(동아대원),
박홍식, 전태옥(동아대)

Laser hardening and Wear Characteristics of Surfaces hardening steel by YAG LASER

Chul-Ho Ok*, Young-Baek Seo, Yon-Sang Cho, Hyo-Jun Bae
Heung-Sik Park, Tae-Ok Jun

Abstract

Surface hardening of plain carbon steel (SM45C) by Laser are usually much finer and stronger than those of the base metals. The present study was under taken to investigate the wear resistance and a processing parameters such as, power density, pulse width, defocusing distance, and molten depth for surface modification of plain carbon steel. The wear test was carried out under experimental condition using the wear test device, and in which the annular surfaces of wear test specimens as well as mating specimen of alumina ceramics(Al_2O_3) was rubbed in dry sliding condition. It is shown that molten depth and width depend on defocusing distance. The wear loss on variation of sliding speed was much in lower speed range below 0.2m/sec and in higher speed range above 0.7m/sec, but wear loss was little in intermediate speed range. It depends on oxidation speed and wear speed.

Key Words : Defocusing Distance (디포커스 거리), Power Density(에너지 밀도), Molten Depth (용융깊이), Oxidation Speed(산화 속도), wear speed (마멸 속도)

I. 서론

일반적으로 레이저에 의한 표면경화는 고품질·고정도·고속·비접촉 공정이며, 열투입 조절이 가능한 이유로 강 부품의 마멸저항과 피로강도를 향상시키는 방법 중의 하나이지만, 빔에너지가 상당히 좁은 미소영역에 집중함으로써, 빔의 강도와 폭의 한계성으로 인하여 넓은 부분의 표면경화에는 적당하지 않다. 그러나 기계부품의 미소부분이나 열 부하가 높은 엔진의 내구성, 내열성을 높이기 위한 열처리를

전체적으로 하였을 때 담금질 균열이나 치수변화에 따른 후 가공비용이 증가하게 된다. 이러한 적용상의 어려움을 해결하기 위하여 국부적인 변형을 최소화고, 단시간 내에 기계부품의 표면만을 냉각시키기 위한 급속 자기담금질(self quenching)을 통해, 변태경화(transformation hardening)되는 원리를 이용한 것이 레이저 표면경화이다.^{1,2,3)}

레이저에 의한 표면경화는, 첫째 종래의 열처리에 비해서 에너지가 높아 내부의 열 확산이 억제되기 때문에 열처리 변형의 발생이 최소한으로 억제할 수 있으며,

둘째로 고주파 열처리 열처리에 비해서 열처리 속도가 빠르며, 다른 열처리에 비해서 경도가 높고 제어성이 우수한 열원이며, 셋째로 재료가 중량에 비해 면적이 작은 경우 비용이 적게 드는 이점이 있다. 이러한 이유로 레이저에 의한 표면경화는 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 μm의 파장을 갖기 때문에 용입량이 많고 일반적으로 대용량에 많이 사용되고 있으며, 1.063 μm의 파장을 갖고 있는 YAG 레이저는 미소부품이나 소형용접에 사용되고 있다. 이것은 레이저의 파장이 길수록 가공재료의 표면에서의 반사율이 높으므로 파장의 특성에 따라 동일한 재료의 용입 깊이가 변화하기 때문이다.^{4,5)}

본 연구에서는 펄스 Nd-YAG 레이저를 이용하여 금속표면 근방의 온도를 변태점과 용융점 사이의 온도로 급가열·급냉하여 후처리가 필요없는 조건으로 SM45C를 디포커스 거리 변화에 따른 경화층의 깊이와 폭 및 열영향부의 표면상태를 검토하였다. 그리고 마멸 시험편에 가장 알맞은 최적 레이저 조사조건으로 표면경화시켜, 상대재료인 세라믹스를 이용하여 미끄럼 마찰시험을 통해 표면경화층의 미시적인 마멸거동을 규명하고자 하는 것을 목적으로 하였다.^{6,7,8)}

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험재료

본 실험에 사용한 재료는 펄스 Nd-YAG 레이저로 표면경화한 SM45C를, 마멸실험을 위한 시험편으로 상대재료는 소결한 순도 95%의 알루미나 세라믹스(Al₂O₃ ceramics)를 사용하였다. Table 1은 알루미나 세라믹스의 화학적성분을, Table 2는 실험에 사용한 레이저 빔의 조사조건을 표시하였다.

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

Compositions Materials	Chemical compositions (wt.%)					
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O
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)	Pulse width (ms)	Defocusing distance (mm)	Beam mode	Shielding gas
10	10	3	3	4, 6, 8, 10,12,14	Multi mode	Ar

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

2.2 실험장치 및 실험방법

2.2.1 레이저에 의한 표면경화 처리

Fig. 2는 SM45C의 표면경화를 위하여

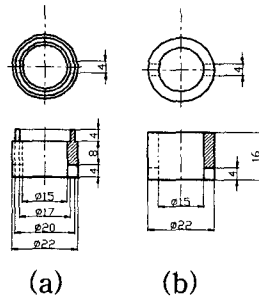


Fig. 1 Shape and dimensions of specimens

사용한 펄스형 Nd-YAG 레이저 조사장치를 나타낸 것으로, 이것은 크세톤(Kr) 아크 플래시 램프형이며, 파장은 1,064nm, 멀티모우드의 빔으로서 평균 출력은 400W에 최대출력 5KW, 펄스 폭은 1~9.9ms 및 펄스의 반복은 200Hz까지 레이저 조사가 가능하다. 그림에서 헬륨-네온 레이저에서 발진된 레이저 빔은 정반사경과 부분투과 반사경 사이에서 램프에 의해 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 구동로봇 위에 시험편을 고정시켜, 일정한 속도로 이동시킴으로서 표면을 급속 용해 및 냉각시켜 표면개질 처리를 행하였다. 또한 포커스 헤드의 내부의 렌즈와 실드 글라스의 보호를 위해 헤드 측면에 아르곤(Ar)가스를 분당 15l/min로 분사시켰다. 시험편이 1 회전하는 시간은 15 sec이며, 테이블

의 회전속도는 10 mm/s, 펄스수는 10 pps로 하였다. 최초 스폿(spot)위치를 찾아 초점위치를 정하고(디포커스 거리 0mm), 그 위치를 기준으로 하여, 렌즈가 멀어지는 방향으로 초점거리를 이동하여, 조사표면의 경화특성과 경화 깊이를 조사하였다. 시험편인 SM45C의 표면경화 조건은 디포커스 거리 8 mm, 에너지밀도 3 J/s, 펄스폭 3 ms 및 조사속도 10 mm/s로 행하였다.

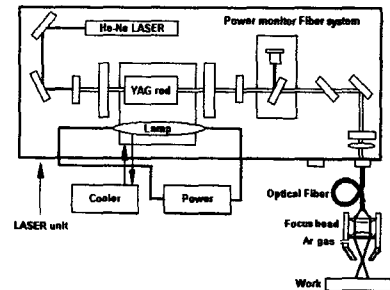


Fig. 2 Schematic diagram of laser unit

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-belt로 구동시켜 이를 인버터(inverter)로 무단구동하였다. 실험방법으로 고정부인 상부에는 상대재료인 세라믹스를, 회전부인 하부에는 레이저 표면개질한 SM45C를 부착하여 각 실험조건에 따라 마찰실험을 행하였다. 양 시험편은 emery paper (#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 0.1mg의 디지털 천칭을 사용하여 실험전 후의 중량의 변화로 측

정하였으며, 마찰면은 화상처리 시스템의 CCD 카메라를 이용하여 마찰면을 비교 분석하였다. 실험조건으로 미끄럼속도를 0.1~0.8m/sec, 작용하중은 5kg, 10kg 및 15kg의 3단계로 하였으며, 미끄럼거리는 3.0km까지로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 레이저 조사조건에 따른 경화층

Fig. 4에는 에너지 출력 3J/s, 펄스 폭 3ms를 일정하게 레이저 빔을 조사하였을 때 디포커스 거리에 따른 경화 깊이과 경화 폭을 나타내었다. 디포커스 거리가 증가함에 따라 경화깊이는 감소하지만 경화 폭은 거의 비례적으로 증가하고 있다. 이것은 디포커스 거리의 증가하게 되면 조사부에 미치는 레이저 빔의 강도저하로 인하여 입열량이 감소하고, 또한 조사부 표면의 면적이 증가하기 때문으로 생각된다.

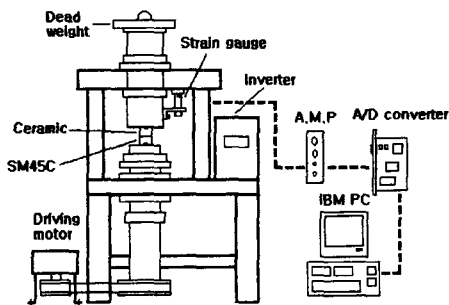


Fig. 3 Schematic diagram of experimental unit

Fig. 5는 디포커스 거리에 따른 레이저빔의 조사면을 나타낸 것으로서, 디포커스 거리가 (a)6 mm의 경우 중심으로부터 원형의 물결모양의 경화층을 형성하고 있지만 디포커스 거리가 증가할수록 레이저 조사면의 넓이와 열영향부의 크기가 증가하는

것을 보여주고 있다. 특히, 디포커스 거리가 14mm이상이 되면, 레이저 빔의 강도저하로 인하여 입열량이 감소하여 거의 표면경화가 이루어지지 않게 된다.

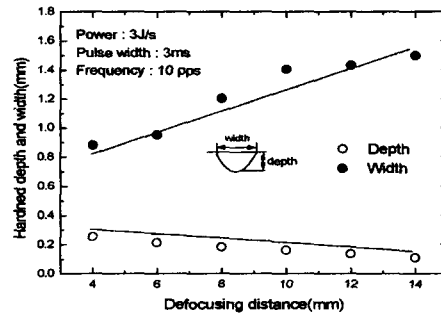


Fig. 4 Influence of defocusing distance on molten width and depth

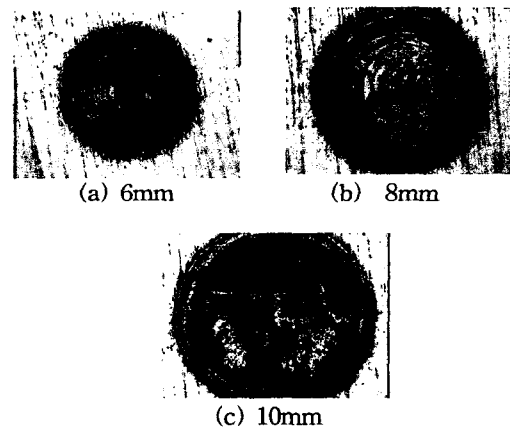


Fig. 5 Micrographs of laser irradiation surface on defocusing distance.

Fig. 6은 디포커스 거리에 따른 경화층의 깊이와 폭을 광학현미경으로 나타낸 것이다. 디포커스 거리가 (a)6mm에서는 경화부가 깊고, 폭이 좁게 나타나면서 내부로 들어갈수록 약간의 테이퍼를 가진 원추형으로 형성되어 있다. 그리고 디포커스 거리가 (b)8mm와 (c)12mm로 증가함에 따라 (a)6mm 경우보다 경화깊이가 작아지고 그 폭은 점차 증가하고 있는 것을 볼 수 있다.

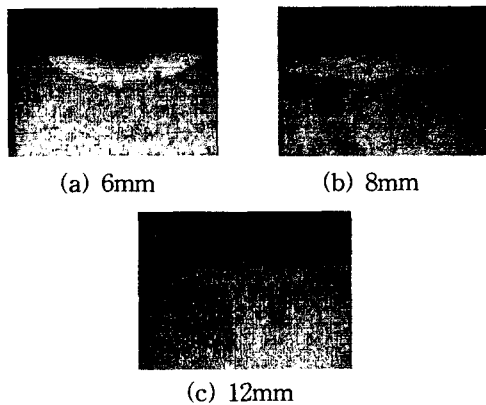


Fig. 6 Micrographs of cross section on defocusing distance.

Fig. 7은 빔 조사부의 표면에서 내부로 깊이 0.25mm까지의 경도치를 디포커스 거리에 따라 측정한 결과로서 디포커스 거리가 증가할수록 경화층의 경도치는 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 디포커스 거리 6mm의 경우 표면에서 0.05 mm는 870Hv, 0.1mm까지는 764Hv, 0.25mm에서는 거의 모재와 유사한 250Hv로 된다는 것을 볼 수 있다. 이것은 조사부 표면에서는 레이저 빔의 집광성으로 오스테나이트 변태개시점까지 급속 가열되고 또한 급냉에 의한 자기담금질(self quenching)로 현미경 조직이 마르텐사이트(martensite)로 변태하여 높은 경도치를 보이지만 표면 하부로 갈수록 냉각속도의 저하로 인하여 fine pearlite나 medium pearlite 조직으로 변태 되었기 때문으로 생각된다. 이로부터 디포커스 거리에 따라 다르지만 경도치가 급격히 감소하는 전까지를 경화층의 유효 경화 깊이라고 생각된다.

3.2. 레이저 표면개질강의 마멸저항

레이저 빔에 의하여 경화된 표면경화

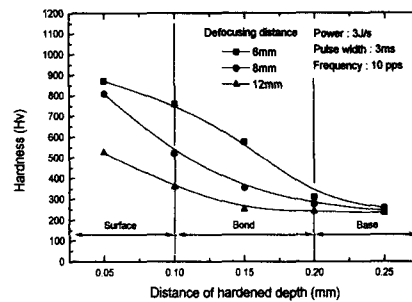


Fig. 7 Relationship between depth below subsurface and hardness

강의 내마멸 특성을 조사하기 위하여 본 연구에서는 디포커스 거리 8mm로 경화시킨 시험편을 사용하여 마찰·마멸실험을 행하였다. 디포커스 거리 8mm로 경화시킨 시험편을 사용한 것은 Fig. 4에서 처럼 디포커스 거리가 짧은 경우는 경화깊이는 크지만 경화 폭이 좁고, 반대로 디포커스 거리가 긴 경우는 경화 폭은 넓지만 경화깊이가 넓어지기 때문이었다.

Fig. 8은 작용하중 P 가 5kg, 10kg 및 15kg에서, 미끄럼속도 V 를 단계적으로 변화시켰을 때의 마멸량 W 를 나타낸 것이다. W 는 미끄럼속도 V 가 0.1m/sec의 저속영역에서부터 V 의 증가와 함께 감소하며 중속도인 영역인 0.4m/sec 근처에서 최소값을 나타내며, 이 이후의 속도에서는 다시 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 V 에 관계없이 W 는 P 가 증가할수록 증가하며, P 가 5kg에서는 0.5m/sec, 10kg와 15kg에서는 0.4m/sec에서 가장 적게 나타났다. Fig. 8은 마멸량 W 가 가장 큰 값을 가지는 작용하중 15kg에서의 실험 후 레이저 표면경화한 강 마찰면을 나타낸 것으로 저속인 (a)0.1m/sec의 경우는 양 시험편 재료의 직접접촉에 의한 응착이 지배적으로 작용하여 미끄럼 방향으로 정상상태의

마멸이 계속된 것을 볼 수 있다. 중속도인 (b) 0.4m/sec에서는 마찰면 전 부분에 적갈색의 산화물이 덮혀 있지만 고속도인 (c) 0.7m/sec의 경우는 미끄럼 방향으로 부분적으로 흑색의 산화물의 띠를 가지는 마찰트랙과 경한 세라믹스의 들기에 의한 abrasive 마멸이 작용하여 groove가 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 마찰면의 상태는 작용하중 P 에 관계없이 각 속도에서 유사한 경향을 나타내었다.

Fig. 8에서 V 가 0.1m/sec의 저속영역에서 W 가 큰 값을 가지는 것은 양 시험편 들기의 직접접촉에 의한 응착마멸이 지배적으로 작용한 결과이며, 중속도 영역에서 W 가 최소값을 가지는 것은 Fig. 9의 (b)의 마찰면에서 보는 것 처럼 저속에서 나타나는 응착마멸의 경우와는 달리 미끄럼 속도의 증가에 따른 마찰면의 온도상승과 함께 산화반응 속도가 증가하여 강의 마찰면이 즉시 산화되어 양 마찰재료의 응착을 감소시키기 때문으로 생각된다. 그리고 0.7m/sec 이상의 고속도 영역에서 다시 W 가 증가하는 것은 미끄럼 속도가 고속도가 되면 산화반응 속도보다 양 시험편 들기부에서 생성되는 마멸속도가 보다 빠르게 진행되어 산화물의 생성이 적고, 또한 실제 접촉부의 온도상승에 의한 강 표면의 연화로 인하여 Fig. 9의 (c)에서 처럼 세라믹스에 의한 abrasive 마멸이 지배적으로 진행된 결과라고 생각된다.

Fig. 10은 Fig. 8과 동일한 마찰조건에서 상대재료인 세라믹스의 마멸량 W 를 나타낸 것으로, W 는 각 작용하중 P 에서 실험 재료인 표면개질강의 변화와 거의 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러나 미끄럼 속

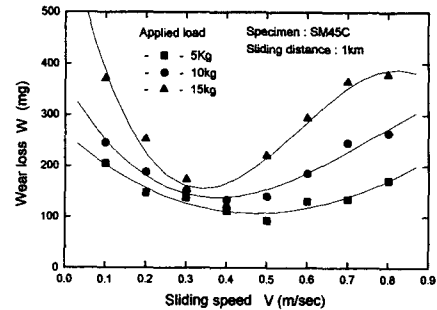


Fig. 8 Relation between wear loss and sliding speed

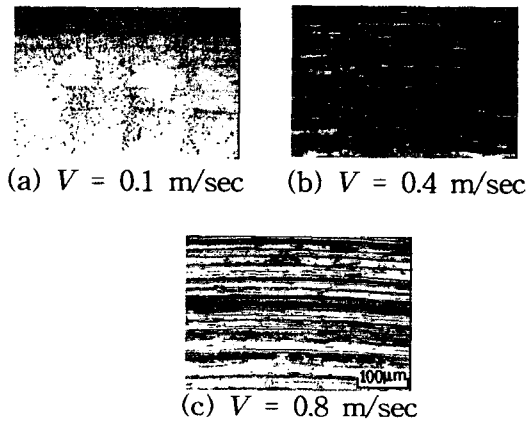


Fig. 9 Photographs of the rubbed surface for SM45C : $L = 1$ km

도 V 가 0.7m/sec와 0.8m/sec의 경우 이하의 V 에서는 오히려 세라믹스의 중량이 증가하고 있다는 것을 볼 수 있다. 특히 Fig. 7의 표면개질강에서 처럼 각 P 에서 W 의 최소값을 나타내는 미끄럼 속도영역에서 세라믹스의 중량이 가장 크게 증가하고 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 강과 세라믹스의 조합으로 마찰실험을 할 경우 강에서 전이된 마멸입자와 산화물이 소결제품인 세라믹스의 미소기공에 충전하고, 또한 마찰면에 강하게 부착하여 세라믹스의 마멸은 거의 일어나지 않고 오히려 중량의 증가에 기인하였기 때문으로

생각된다. 이것은 표면개질 강에서 W 의 최소값을 나타내는 미끄럼 속도영역에서 가장 현저하게 나타나며, V 가 0.7m/sec와 0.8m/sec의 경우는 전술한 바와 같이 강 표면의 산화반응 속도보다 마멸속도가 보다 빠르게 진행되어 세라믹스와 강과의 응착이 진행된 결과라고 생각된다.

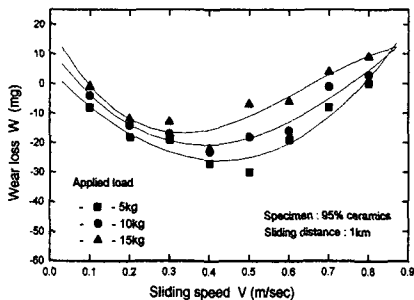


Fig. 10 Relation between wear loss and sliding speed

Fig. 11은 작용하중 P 가 5kg에서의 각 미끄럼 속도 V 에 따른 상대재료인 세라믹스의 마찰면을 표시한 것으로서, (a)0.1m/sec, (b)0.5m/sec 및 (c)0.8m/sec 이다. 저속영역인 (a)0.1m/sec의 경우는 미끄럼 방향으로 응착에 의한 마멸상태와 강에서 전이된 산화물의 좁은 폭을 가지는 부분으로 존재하고 있다. 중속도인 (b)0.5m/sec의 마찰면은 거의 전 부분에 걸쳐 적갈색의 산화물로 덮혀 있어 이것에 의하여 세라믹스의 층량이 오히려 증가되었다. 그리고 고속도인 (c)0.8m/sec의 경우는 마찰면 edge 부분에 산화된 흔적을 나타내지만 대부분은 실험 재료인 강과의 응착에 의한 마멸이 주로 작용하여 형성되어 있다는 것을 볼 수 있다.

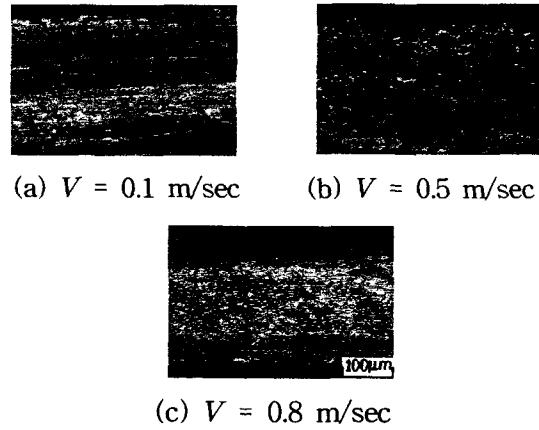


Fig. 11 Photographs of the rubbed surface for alumina ceramics : $L = 1\text{km}$

Fig. 12에는 레이저 표면경화한 강의 미끄럼 거리에 따른 마멸량을 알기 위하여 전술한 응착마멸이 주 마멸기구로 작용하는 미끄럼 속도 V 가 0.1m/sec의 경우 각 작용하중 P 가 5kg, 10kg 및 15kg에서 미끄럼 거리 L 에 따른 마멸량 W 의 마멸진행 곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 처럼 각 P 가 5kg에서는 L 의 증가와 함께 거의 직선적으로 증가하며, P 가 10kg와 15kg에서는 L 의 증가에 따라 L 이 1km까지는 W 가 L 에 비례하여 증가하지만 그 이상의 L 에서는 마멸율이 감소한다는 것을 볼 수 있다. 그리고 이 경향은 P 가 증가할 수록 보다 크게 나타난다는 것을 알 수 있다. P 가 10kg와 15kg에서 L 이 1km까지는 W 가 L 에 비례하여 증가하는 것은 양 시험편의 실제 접촉부의 응착에 의한 돌기부의 소성변형이 진행되는 초기마멸 상태가 진행된 결과이고, 그 이상의 L 에서는 L 의 증가와 함께 실제 접촉부의 온도상승에 의하여 표면개질한 강 표면에 형성되는 산화물의 보호층이 L 의 증가에 따라 형성

되기 때문으로 생각된다. 그리고 이 경향은 P 가 증가할 수록 가속화된다고 생각되므로 P 가 증가와 함께 마멸율의 감소가 일어나게 된다.

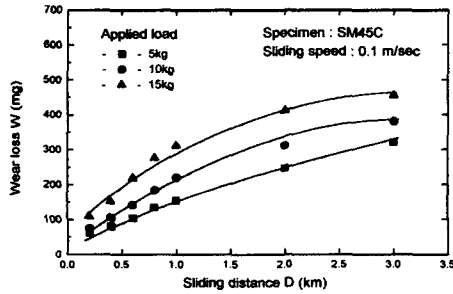


Fig. 12 Wear curve in wear loss with sliding distance

4. 결론

펄스 Nd-YAG 레이저를 SM45C에 조사하여 표면경화에 의한 경화조건과 대기 중에서의 마멸저항을 알기 위하여 원통형 시편으로 미끄럼 마찰실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 레이저 빔의 디포커스 거리에 따른 경화는 거리가 증가할수록 경화깊이는 감소하지만, 경화 폭은 증가한다.
2. 표면경화강의 미끄럼 속도에 변화에 따른 마멸량은 0.2m/sec 이하의 저속영역과 0.7m/sec 이상의 고속영역에서 증가하며, 중간영역의 미끄럼 속도에서는 최저치를 가진다.
3. 미끄럼 속도가 0.7m/sec 이하의 영역에서 상대재료인 세라믹스는 강에서 전이된 산화물에 의하여 오히려 중량이 증가한다.
4. 미끄럼 거리에 따른 마멸량은 작용하중

5kg은 거의 직선적으로 증가하지만, 10kg과 15kg의 경우는 미끄럼 거리 1km까지는 초기 마멸이 진행되고, 그 이상의 거리에서는 마멸율은 감소한다.

참고 문헌

1. J.Wilson and J.F.B. Hawkes, "Lasers Principles and Applications", Prentice Hall, pp.1~33, (1987)
2. 先端加工技“超精密加工技 挑戦”, 工業調査會, pp.146~151 (1984)
3. F.O.Olsen, "Pul Processing, ND-YAG versus Lasers", CIRP Vol.44, No1, pp.14.1~145, (1995)
4. 吉岡俊朗, 白井靖辛, 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)
5. M.R. Fishman and J.Zahvi, "Structure and micro hardness of laser-hardened 1045 steel", J.MAT.SCI.23, pp.1547~1552, (1988)
6. 精密工學會表面改質に關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)
7. 高橋英明, 濫井勝敏, 苦林潤, “レーザー調査による金屬セラミックスの局部表理”, Materia Japan, 第34卷, 第12号, pp.1276~1283, (1995)
8. 강형식, 박인태, 박홍식, 전태욱, “금형내의 레이저에 의한 규소 강판 적층가공에 관한 연구”, 韓國精密工學會誌, Vol.14, No.6, pp.37~43, (1997)