

잔류응력의 표면파손과 마멸에 대한 영향

김진욱* · 이영제†
(2001년 6월 2일 접수, 2002년 1월 29일 심사완료)

The Effect of Residual Stresses on Surface Failure and Wear

Jin-Wook Kim and Young-Ze Lee

Key words: Scuffing(스커프), Break-in(길들이기), Residual Stress(잔류응력), Shot-Peening(쇼트피닝)

Abstract

Break-in is an intentional treatment to enhance the performance life of machinery parts and to maintain static friction behavior. Most studies on break-in have concerned only about surface conditions such as roughness or film formation. But the exact mechanism of break-in has not been found yet. Friction, scuffing behavior and wear of AISI 1045 were studied in relation to break-in and residual stress. The cylinder-on-disk type tribometer was used with the line-contact geometry. Scuffing tests were carried out using a constant load of 730N. In the break-in procedure the step load was applied from 100N to 200N. In this experiment, it was found that the break-in helps compressive residual stress to be formed well enough to enhance the scuffing life during the scuffing test. Specimens that had high compressive residual stress induced by shot-peening show better wear resistance than those were not shot-peened. Results of scuffing test, break-in procedure and wear amount in relation to residual stress have been discussed.

1. 서론

윤활 상태에서 미끄럼운동을 하는 기계요소들은 대부분 경계윤활(Boundary Lubrication) 조건에서 작동하게 된다. 이러한 기계요소의 표면은 마멸에 의해 점차적으로 손상을 받을 뿐만 아니라 스커프(scuffing)이라 하는 예상하기 어려운 표면파괴가 발생한다. 스커프는 미끄럼 표면의 갑작스런 파괴형태를 말하는데, 일반적으로 마찰력의

증가와 표면이 거칠어지는 현상을 수반한다.⁽¹⁾ 이러한 표면파괴 현상은 길들이기 과정에 의해 억제할 수 있는데, 길들이기 과정이 포함된 계단형 하중 실험에서는 일정한 하중을 가하는 경우보다 최고 20배 정도의 수명연장 효과를 가져오는 것으로 알려져 있다.⁽²⁾

표면파괴의 원인에 관한 많은 연구들이 있었는데,⁽¹⁻⁴⁾ 재료표면의 변화와 보호막의 효과와 같은 표면에 관련된 현상으로 생각하는 것이 일반적이었다.^(5,6) 최근에는 윤활유를 사용하지 않은 미끄럼 상황에서 표면 상호작용이 표면아래 상당한 깊이까지 영향을 미치기 때문에 표면파괴에 이르는 과정은 표면아래에까지 연관되어야 한다는 이론이 제시되고 있다.⁽⁷⁾

본 연구에서는 길들이기 된 재료, 쇼트피닝 한 재료와 그렇지 않은 재료에 대해 X선 회절 기술

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부
E-mail : yzlee@yurim.skku.ac.kr
TEL : (031)290-7480 FAX : (031)290-5849
* 성균관대학교 기계공학과

Table 1 The mechanical properties of specimen

Hardness	290 HV
Tensile Strength/ Ultimate	675 MPa
Yield Strength	405 MPa
Modulus of Elasticity	205 GPa
Shear Modulus	80 GPa
Roughness	0.3 μm , Ra

Table 2 Shot-peening condition

	value	Rounded Cut Wire
Shot ball diameter, mm	1	Mass:
Shot speed, m/s	56	3.555×10^{-7} (Kg/m)
Peening time, min	5	Volume:
Coverage, %	100	4.188×10^{-9} (m^3)
Archeight	0.494	Density:
(almen a strip)		84.855 (Kg/m^3)

을 이용하여,^(8,9) 재료내부의 잔류응력 분포를 관찰하고, 길들이기 효과에 대해서 알아보려고 한다.

2. 실험

시편은 AISI 1045 강(지름 60mm, 두께 9mm의 원형디스크)으로 Table 1과 같은 물성과 표면조도를 나타내며, 쇼트피닝 조건은 Table 2와 같다.

쇼트피닝 전후의 경도와 조도는 Table 3과 같으며, 쇼트피닝 후의 표면조도를 쇼트피닝하지 않은 시편의 조도와 같아지도록 서서히 폴리싱하였다.

상대재로써 AISI 52100 강(길이 6mm, 지름 6mm의 실린더)을 사용하여 Fig. 1과 같이 cylinder-on-disk 형태의 반복 미끄럼실험을 Table 4와 같은 특성을 갖는 광유를 사용하여 수행하였으며, 뚜렷한 마모량의 차이를 관찰하기 위해 Ball-on-disk 형태의 마모실험도 하였다.

잔류응력측정과 소성변형정도를 측정하기 위해 X선 회절 잔류응력 측정기를 사용하였다. 실험은 우선 길들이기 하지 않은 재료의 표면파괴를 관찰하기 위해 Table 5에서 보듯이 초기하중 730N으로 계속 일정한 수직하중 미끄럼 실험을 통해 마찰계수를 관찰하여 갑작스런 증가를 보일 때까지 수명(2)과 마찰계수를 구하였다.

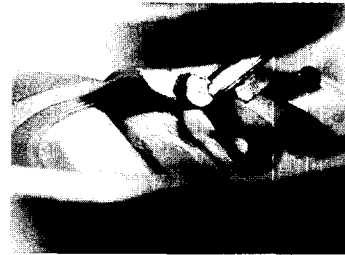
길들이기 과정으로 100N부터 10분마다 50N 씩

Table 3 The hardness and roughness after shot peening

	Before shot peen		After shot peen
	AISI1045	hardness,HV	290
	Roughness(Ra), μm	0.3	0.3

Table 4 The characteristics of mineral oil

Kinematic viscosity at 40 $^{\circ}\text{C}$, cSt	19
Thermal stability, $^{\circ}\text{C}$	135
Thermal conductivity, W/mK	0.134
Specific heat at 38 $^{\circ}\text{C}$, J/KgK	1670
Flash point, $^{\circ}\text{C}$	105
Vapor pressure at 20 $^{\circ}\text{C}$, Pa	1.3x10-3 - 13.3x10-3
Pour point, $^{\circ}\text{C}$	-57

**Fig. 1** Cylinder-on-disk type sliding test

증가시켜 200N까지 미끄럼 실험을 하였고 이러한 길들이기가 끝난 시편 또한 730N의 하중을 가해 표면파괴가 일어날 때까지 실험을 수행하였다.

실험 동안 재료의 표면과 내부에 형성된 미끄럼 방향으로 존재하는 잔류응력 분포를 측정하였다. 잔류응력을 측정하기 위해 동일한 조건의 여러 시편을 사용하여 일정 시간마다 실험을 단속적으로 실시하였고 각 단계 별로 3번 반복하였다.

깊이별 측정을 위해 전해 연마를 하여 단계별로 약 5 μm 정도 씩 제거 후 측정하였고, 무한평면을 가정하여 응력완화 효과를 고려한 잔류응력을 결과 값으로 사용하였다.⁽¹⁰⁾ 잔류응력 측정을 위해 사용된 상수 값들은 Table 6과 같고, 마모트랙 위 6군데의 일정한 위치에서 미끄럼방향으로 측정하였으며, 각 위치마다 6번 이상 측정하여서 그 평균값을 사용하였다.

Table 5 Normal load history used for scuffing test and break-in process

		Break-in	Scuffing
Rotating speed		93 rpm	136 rpm
Normal Load	Initial	100N	730N
	Increasing rate	50N/10min	
	Final	200N	
Lubricant		Mineral oil	

Table 6 Constants used for X-ray diffraction residual stress analysis

Exposure time	5 sec
Number of exposure	5
Peak fit method	Pearson VII
Percentage used for curve fit	85 %
Focal distance	40mm
Incident angle(°)	-20, -10, 0, 10, 20
Target	Cr (K α radiation)
Exposure method	multiple
X-ray elastic constant	24,500 ksi

3. 실험결과 및 고찰

3.1 표면파괴와 잔류응력분포

실험 전, 시편을 연마한 후 측정된 깊이방향의 잔류응력 분포는 Fig. 2의 0 cycle에서의 분포와 같다. 표면에서 20 μ m 깊이 까지 +20MPa에서 -20MPa 사이의 잔류응력 값이 형성되어 있는데, 잔류응력이 존재하지 않도록 파우더로 제작된 시편의 경우 \pm 6MPa 정도의 잔류응력을 나타내는 것으로 보면, 표면에서 폴리싱의 영향으로 약간의 잔류응력이 발생했음을 알 수 있다.

730N의 하중으로 시험한 결과, 미끄럼 운동 초기에는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 272 사이클 정도에서 이미 20 μ m 정도의 깊이까지 최저 압축 잔류응력이 100MPa 정도로 실험 전에 시편에 존재하던 잔류응력 값보다 증가된 것을 볼 수 있다.

952 사이클까지 미끄럼운동을 한 결과, 5 μ m이하 깊이에서는 큰 변화가 없었으나, 표면에서는 압축잔류응력 값이 약 200MPa까지 증가하였다.

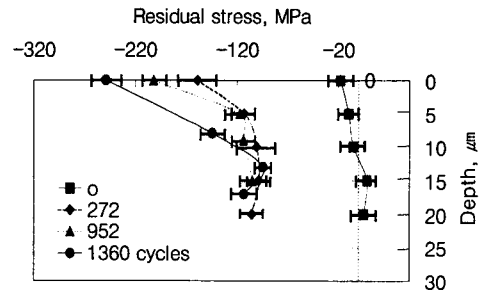


Fig. 2 Residual stress distribution during the scuffing test without break-in

1360 사이클이 지난 후 표면파괴가 발생하였으며, 1360 사이클에서의 잔류응력 분포를 보면, 표면에서 압축잔류응력이 조금 증가되었음을 알 수 있다. 표면에서 약 10 μ m까지 잔류응력의 급격한 변화를 볼 수 있다. 표면파괴까지의 과정을 보면 미끄럼운동에 따라 표면의 잔류응력은 250MPa까지 증가하였고, 표면 아래로는 응력의 증가가 둔화되어 있다.

3.2 길들이기 과정과 잔류응력분포

Fig. 3은 앞에서 언급한 길들이기 과정 동안 시간의 증가에 따라 측정된 잔류응력 분포의 변화를 나타낸다.

길들이기는 상대적으로 작은 하중을 이용하였기 때문에 표면에서는 마찰력에 의한 변화가 두드러졌으나 표면아래에서는 상대적으로 압축잔류응력의 증가는 크게 나타나지 않는다. 깊이에 따라 잔류응력은 5 μ m 깊이에서 급격한 구배를 나타내었으며 사이클의 증가에 비해 표면의 잔류응력 값의 증분이 그리 크지 않음을 볼 때, 재료에 형성될 수 있는 압축잔류응력은 길들이기에 사용된 수직하중과 마찰력에 따라서 증가할 수 있는 한계 값이 존재함을 예상할 수 있다.

따라서 표면파괴를 저지하며 윤활면의 수명을 연장시키는 길들이기 과정동안 재료표면에 압축 잔류응력이 형성되고, 이러한 분포로 인하여 스키핑 파손 실험동안 깊이 약 5 μ m까지 압축잔류응력이 안정되게 형성되게 한다는 것을 알 수 있다.

또한 이처럼 표면근처에 형성된 압축잔류응력으로 인하여 미끄럼 초기에 표면을 미세하게 손상시킬 수 있는 인장 응력에도 저항할 수 있을 것으

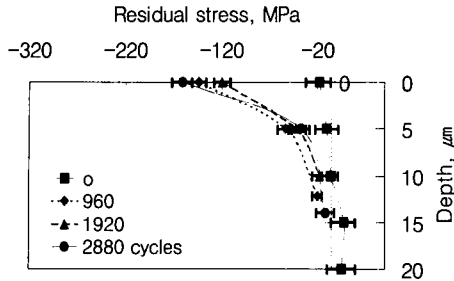


Fig. 3 Residual stress distribution produced during the break-in process

로 보인다.

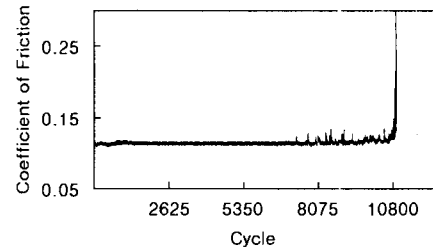
3.3 길들이기 과정과 표면파괴

길들이기 한 재료와 그렇지 않은 재료의 표면 파괴 실험 동안 마찰계수의 변화는 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 길들이기 된 경우는 안정된 마찰계수 구간이 존재하였고, 파손까지의 수명은 길들이기를 하지 않은 경우에 비해 8배정도 증가되었음을 알 수 있다.

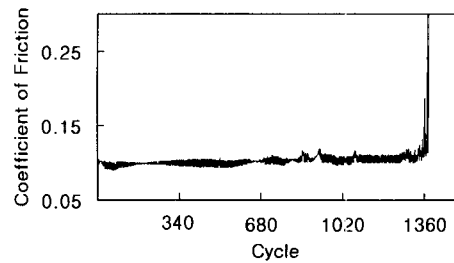
이와 같이 적합한 길들이기를 마친 시편을 이용하여 표면파괴가 일어날 때까지 미끄럼시험을 수행하면서 잔류응력 분포의 변화를 살펴보았다. 952 사이클 후 잔류응력 분포는 그 Fig. 5에서 볼 수 있듯이, 표면에서는 길들이기를 거치지 않은 시편과 비슷한 값을 나타내었으나, 표면 아래에서는 길들이기 과정을 거치지 않은 시편 보다 훨씬 큰 값의 잔류응력을 15 μm 깊이까지 나타내었다.

길들이기 되지 않은 경우 파손이 발생하였던 1360 사이클에서는 표면에서의 잔류응력 증가보다 표면 아래에서의 증가가 두드러졌고, 특히 5 μm 에서 매우 큰 값의 잔류응력을 나타내었다. 이는 길들이기 과정을 거치지 않은 시편의 경우보다 훨씬 큰 값으로 이로 인해 미끄럼 표면의 수명이 연장되었음을 알 수 있다. 비교적 많은 시간이 경과하여 파손이 발생하기 바로 전의 10880 사이클에서 잔류응력 분포는 표면에서 잔류응력 값이 약 300MPa 까지 급증하고 깊이 15 μm 까지는 약간의 증가가 있었지만 깊이 15 μm 이하에서는 역시 더 이상 압축잔류응력이 크게 증가하지 못하고 있었음을 볼 수 있다.

표면파괴 시에 형성되어 있는 잔류응력을 비교



(a) Without break-in



(b) With break-in

Fig. 4 The variation of friction coefficient

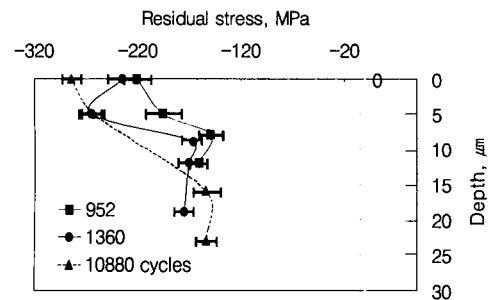


Fig. 5 Residual stress distribution during the scuffing test with break-in

해 보면, 표면에서의 압축잔류응력은 파손될 때까지 그 값이 초기에 비해 약간 증가되고 전체적인 압축잔류응력 값이 길들이기 한 시편에서 더 크게 나타남을 알 수 있다.

그러므로 적합한 길들이기는 요소의 작동 기간 동안에 재료내부에서도 압축잔류응력이 증가되도록 표면과 표면아래에 소성변형과 탄성변형의 분포를 형성시키는 역할을 하게된다.

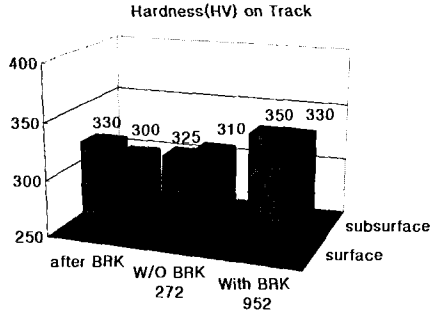


Fig. 6 Hardness on wear track after break-in and without break-in

3.4 마모트랙에서의 경도

길들이기의 효과가 표면에서의 가공경화에 의한 것인가를 알아보기 위해 길들이기를 하지 않은 경우와 길들이기를 한 경우의 마모트랙에서 표면과 8 μ m 깊이에서의 경도를 측정하였고, 그 결과는 Fig. 6과 같다. 길들이기 후의 표면경도는 비커스 경도 330 이었는데, 길들이기를 하지 않은 경우에도 272 사이클 지난 후 경도가 325 정도였다.

그리고 길들이기 된 시편이 952 사이클이 지나도 표면경도가 350정도로 크게 증가하지 않는다. 즉, 미끄럼이 계속되는 동안 길들이기 된 시편과 길들이기 되지 않은 시편은 가공경화 정도에 있어서 차이가 없다고 말할 수 있다.

3.5 마모량

압축잔류응력이 재료의 마모성능에도 좋은 영향을 줄 수 있는가를 알아보기 위해, 마모량을 명확히 구분할 수 있도록 쇼트피닝 한 디스크 시편에 Ball-on-disk 형태의 마모실험을 하였고, 그 결과는 Fig. 7과 같다.

쇼트피닝을 한 경우 마모량이 적음을 알 수 있다. 쇼트피닝 전후의 재료에 존재하는 잔류응력 분포는 Fig. 8과 같다. 원주방향에 대하여 0°, 45°, 90° 각도로 측정하였는데, 측정방향에 거의 영향을 받지 않고 그 값이 거의 동일하였기 때문에 원주방향으로 측정된 값만 표시하였다.

쇼트피닝후 표면과 표면아래 상당한 깊이까지 높은 압축 잔류응력이 형성되어 있다. 경도에 있어서 쇼트피닝을 한 시편은 Fig. 9와 같이 쇼트피닝을 하지 않은 시편보다 표면에서 큰 경도 값을 갖

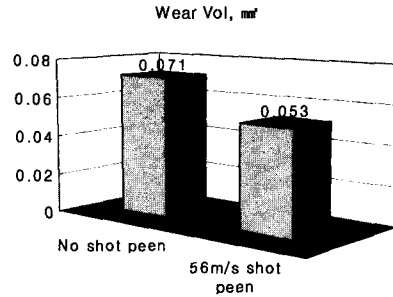


Fig. 7 Wear amount of shot-peened specimen and no shot-peened specimen

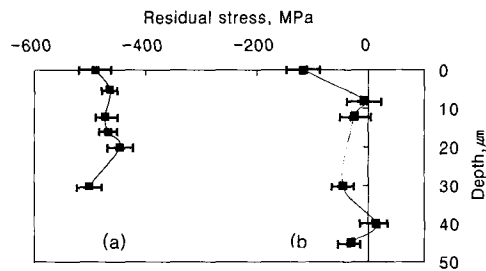


Fig. 8 Residual stress distributions (a) after shot-peening, (b) before shot-peening

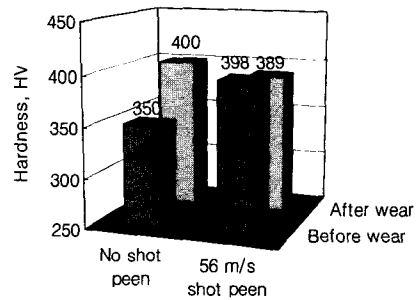


Fig. 9 Hardness on surface of each specimen after wear test

지만, 마모실험 시작 후 쇼트피닝을 하지 않은 시편은 마모트랙에서 가공경화가 수십 사이클 내에 빨리 진행되어 쇼트피닝을 한 시편과 비슷해 진다는 것을 알 수 있다.

즉, 미끄럼실험에 있어서 마모량의 감소는 쇼

트피닝에 의한 가공경화 보다는 잔류응력의 영향을 받는다고 할 수 있다.

4. 결론

재료의 표면과 표면아래 영역에 형성되는 잔류응력을 관찰하여 길들이기 과정이 표면파괴 현상에 어떠한 영향을 주는가를 알아보았고 잔류응력과 마모량에 대해서 알아보았다.

(1) 길들이기를 하지 않은 경우 재료의 표면이 파괴될 때까지 재료에 형성되는 잔류응력분포는 사이클의 증가에 따라 표면에서는 압축 잔류응력 값이 약 200MPa까지 점차적으로 증가하지만, 5 μ m 이하 깊이에서의 압축잔류응력의 증가를 수반하지 못한다.

(2) 길들이기 과정과 같은 작은 하중이 작용하는 경우에 표면에서는 비교적 큰 압축잔류응력이 형성되는 반면, 재료 내부에서는 크게 형성되지 못하며 단지 사이클 수만의 증가로써는 잔류응력 분포에 큰 영향을 주지 못한다. 이것은 주어진 길들이기 과정에서 재료에 형성될 수 있는 압축잔류응력에는 한계 값이 존재한다는 것을 보여준다.

(3) 미끄럼 실험에서 적합한 길들이기는 표면의 가공경화작용이 아니라 작동하중에 의한 응력분포와 중첩되어서 작동 기간동안에 재료내부에서 형성될 수 있는 압축잔류응력의 한계 값이 증가될 수 있도록 표면과 표면아래에 소성변형과 탄성변형의 분포를 변화시키는 역할을 하는 것으로 보인다. 이렇게 증가된 압축잔류응력으로 인하여, 재료는 미끄럼실험당시 하중과 마찰영향이 가장 큰 표면과 표면아래에서 미끄럼 방향의 인장력에 저항할 수 있는 능력을 갖게되고 스키핑 파손을 지연시킬 수 있게된다.

(4) 쇼트피닝에 의해 재료의 마모성능 또한 향상될 수 있으며, 그 원인은 쇼트피닝에 의한 가공경화 보다는 압축잔류응력의 영향이 크다. 따라서 길들이기에 의해 형성된 압축잔류응력은 마모량 감소에도 영향을 준다는 것을 예상할 수 있다. 이것으로 표면파괴의 원인이 표면조건 뿐만 아니라 표면아래에도 있다는 이론을 뒷받침할 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 산하 소관관대 산업설비 안전성평가연구센터의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kim, K. T. and Ludema, K. C., 1995, "A Correlation Between Low Cycle Fatigue Properties and Scuffing Properties of 4340 Steel," *ASME J. of Tribology*, Vol. 117, pp. 617~621.
- (2) Lee, Y. Z. and Ludema, K. C., 1990, "The Shared Load Wear Model in Lubricated Sliding: Scuffing Criteria and Wear Coefficient," *Wear*, Vol. 138, pp. 13~19.
- (3) Lee, S. C. and Cheng, H. S., 1991, "Correlation of Scuffing Experiments with EHL Analysis of Rough Surfaces," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 113, pp. 318~326.
- (4) Lee, S. C. and Cheng, H. S., 1991, "Scuffing Theory Modeling and Experimental Correlations," *ASME J. of Tribology*, Vol. 113, pp. 327~324.
- (5) Lee, Y. Z. and Ludema, K. C., 1991, "The Effects of Surface Roughening and Protective Film Formation on Scuff Initiation in Boundary Lubrication," *ASME J. of Tribology*, Vol. 113, pp. 295~302.
- (6) Park, K. B. and Ludema, K. C., 1994, "Evaluation of The Plasticity Index as a Scuffing Criterion," *Wear*, Vol. 175, pp. 125~131.
- (7) Sheiretov, T., Yoon, H. and Cusano, C., 1998, "Scuffing Under Dry Sliding Conditions - part1: Experimental Studies," *Tribology Transaction*, Vol. 41, pp. 435~446.
- (8) ASTM, 1994, "Standard Test Method for Determining The Effective Elastic Parameter for X-ray Diffraction Measurement of Residual Stress," ASTM E 1426-94, pp. 932~935.
- (9) ASTM, 1990, "Standard Test Method for Verifying The Alignment of X-ray Diffraction Instrumentation for Residual Stress Measurement," ASTM E 915-90, pp. 691~693.
- (10) Moore, M. G., and Evans, W. P., 1958, "Mathematical Correction for Stress in Removed Layers in X-ray Diffraction Residual Stress Analysis," *SAE Trans.*, Vol. 66, pp. 340~345.