

길들이기에 의한 잔류응력의 형성과 표면파괴

김진욱 · 이영제*

성균관대학교 대학원 기계공학부

*성균관대학교 기계공학부

The Formation of Residual Stresses and the Surface Fracture by the Break-in Process

Jin-Wook Kim and Young-Ze Lee*

Graduate School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

Abstract-In this paper the residual stresses on lubricated sliding surfaces were measured during break-in procedure and up to scuffing by the X-ray diffraction method. The cylinder-on-disk type tribometer was used with the line-contact geometry. Scuffing tests were done using a constant load. In the break-in procedure the loads were increased from very low values in several steps.

It was found that the sliding surfaces with break-in represented relatively higher values of residual compressive stresses than those without break-in. The residual stresses below the surfaces showed the small amount of stress increases. The results of scuffing tests with and without break-in showed the same trends as break-in tests did. However, in case of tests with break-in procedure the stresses below the surfaces showed very large increases in the residual compressive stresses. From the tests of break-in and scuffing, it was found that the increases in scuffing lives were related with the increases of residual stresses on the lubricated sliding surfaces with break-in.

Key words-scuffing, break-in, residual stress, x-ray diffraction

1. 서론

윤활 상태에서 미끄럼운동을 하는 기계요소는 대부분 경계윤활(Boundary Lubrication) 조건에서 작동하게 된다. 이러한 기계요소의 표면은 마멸에 의해 점차적으로 손상을 받을 뿐만 아니라 스커피(scuffing)이라 하는 예상하기 어려운 표면파괴가 발생한다. 스커피는 미끄럼 표면의 갑작스런 파괴 형태를 말하는데, 일반적으로 마찰력의 증가와 표면이 거칠어지는 현상을 수반한다[1]. 이러한 표면 파괴 현상은 길들이기 과정에 의해 억제할 수 있

는데, Fig. 1에서 보듯이 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 표면아래에 까지 연관되어야 한다는 이론이 제시되고있다[7].

본 연구에서는 길들이기 과정을 거친 재료와 그렇지 않은 재료에 대해 x선 회절 기술을 이용하여, 잔류응력을 표면뿐만 아니라 표면 아래에서도 관찰하고, 소성변형량에 선형적 관계를 갖는 것으로 알려진[8] X-ray 회절선 넓이를 측정하여 재료 내부의 변형정도를 관찰하여, 길들이기 과정동안 재료 내부에 발생하는 변화가 표면파괴 현상에 어떠한 영향을 주는가를 관찰하고자 한다.

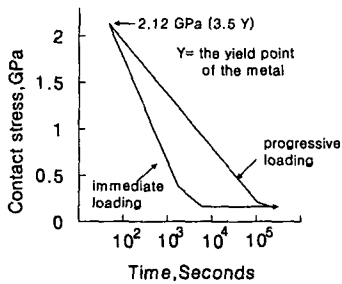


Fig. 1. The durability of steel sliding surfaces with lubricants comparing systems where full loads were applied immediately and progressively [2].

2. 실험

시편은 AISI 1045 강(지름 60mm, 두께 9mm의 원형디스크)으로 Table 1과 같은 물성과 표면조도를 나타내며, 상대재로써 AISI 52100 강(길이 6mm, 지름 6mm의 cylinder)을 사용하여 Fig. 2와 같이 cylinder-on-disk 형태의 반복 미끄럼실험을 광유를 사용하여 수행하였다. 미끄럼 실험장치는 수직하중과 마찰력을 측정하도록 만들어졌고, 대기 중에서 광유 속에 완전히 잠긴 상태에서 미끄럼실험을 하였다. 시험 도중에 잔류응력측정과 소성변형정도를 측정하기 위해 x선 회절 잔류응력 측정기를 사용하였다.

Table 1. The known 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, Ra	0.3 μm

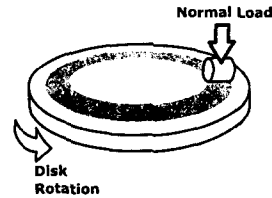


Fig. 2. Cylinder-on-disk type sliding test

실험은 우선 길들이기 하지 않은 재료의 표면파괴를 관찰하기 위해 Table 2에서 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 증가시켜 200N까지 실험을 하였다. 길들이기가 끝난 시편은 역시 730N의 하중을 가해 표면파괴가 일어날 때까지 실험을 수행하였다. 실험 후 재료의 표면과 내부에 형성된 미끄럼 방향으로 존재하는 잔류응력 분포를 측정하였다. 잔류응력을 측정하기 위해 동일한 조건의 여러 시편을 사용하여 일정 시간마다 실험을 단속적으로 실시하였다. 실험은 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. 잔류응력 측정을 위해 사용된 상수 값들은 Table 3과 같다.

잔류응력은 마모트랙 위 6군데의 일정한 위치에서 미끄럼방향으로 측정하였으며, 각 위치마다 6번 이상 측정하여서 그 평균값을 사용하였다.

Table 2. 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 3. Constants used for X-ray diffraction residual stress analysis

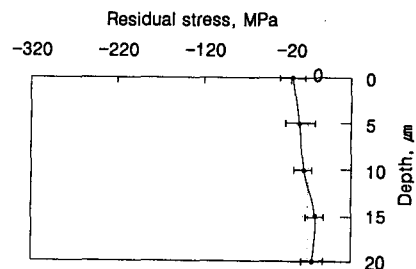
Exposure time	5 sec
Number of exposure	5
Peak fit method	Pearson VII
Percentage used for curve fit	85 %
Focal distance	40mm
Incident angle(°)	-20, -10, 0, 10, 20
Target	Cr (K α radiation)
Exposure method	multiple
X-Ray elastic constant	24,500 ksi

3. 실험결과 및 고찰

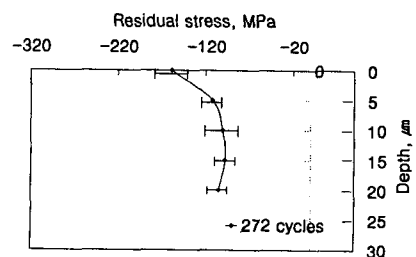
3.1 표면파괴와 잔류응력분포

실험 전, 시편을 연마한 후 측정된 깊이방향의 잔류응력 분포는 Fig. 3(a)와 같다. 표면에서 20 μ m 깊이 까지 +20MPa에서 -20MPa 사이의 잔류응력 값이 형성되어 있는데, 잔류응력이 존재하지 않도록 powder로 제작된 시편의 경우 \pm 6MPa 정도의 잔류응력을 나타내는 것으로 보면, 표면에서 폴리싱의 영향으로 약간의 잔류응력이 발생했음을 알 수

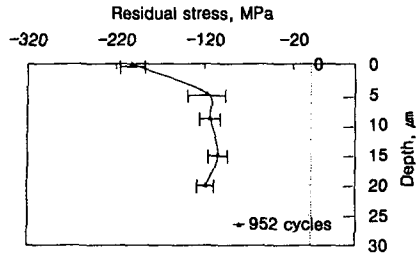
있다. 730N의 하중으로 시험한 결과, 미끄럼 운동 초기에는 Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 272 cycle 정도에서 이미 30 μ m 정도의 깊이까지 최저 압축 잔류응력이 100MPa 정도로 실험 전에 시편에 존재 하던 잔류응력 값보다 증가된 것을 볼 수 있다. 이는 730N의 수직하중 영향으로 생각된다. 표면에서는 압축 잔류응력 값이 미끄럼운동의 마찰력에 의해 증가된 것을 볼 수 있다. 952cycle 까지 미끄럼 운동을 한 결과는 Fig. 3(c)와 같고, 5 μ m이하 깊이에서는 큰 변화가 없었으나, 표면에서는 압축 잔류응력 값이 약 200MPa까지 증가하였다. Fig. 3(d)는 1360 사이클에서의 잔류응력 분포를 보이는데, 이 사이클에서 표면파괴가 발생하였으며, 표면에서는 계속적인 압축잔류응력의 증가를 보이고 5 μ m 정도의 깊이에서도 압축잔류응력의 증가현상을 볼 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 둔화 되는데 이로 인해 더 이상 표면이 마찰력을 이기지 못하고 파괴가 일어남을 알 수 있다.



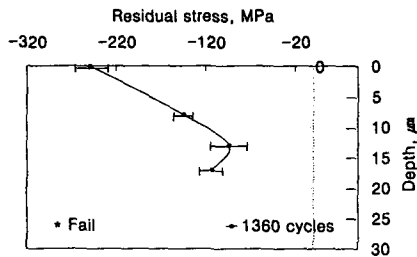
(a) Before the scuffing test



(b) After 272 cycles



(c) After 952 cycles



(d) After 1360 cycles, Failed

Fig. 3. Residual stress distribution during the scuffing test without break-in

3.2 길들이기 과정과 잔류응력분포

Fig. 4는 앞에서 언급한 길들이기 과정 동안 시간의 증가에 따라 측정된 잔류응력 분포의 변화를 나타낸다. 길들이기는 상대적으로 작은 하중을 이용하였기 때문에 표면에서 마찰력에 의한 변화가 두드러졌으며 표면아래에서는 상대적으로 압축잔류응력의 증가는 크게 나타나지 않는다. 깊이에 따라 잔류응력은 5 μ m 깊이에서 급격한 구배를 나타내었으며 미끄럼 운동이 반복됨에 따라 구배가 증가하였다. 이는 안정된 길들이기 과정에서 마찰의 영향으로 표면에서는 잔류응력이 증가하는 반면, 깊이에 따라서는 수직하중의 영향이 그다지 크지 않기 때문이라 생각된다. 그리고 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 윤회면의 수명을 연장시키는 길들이기 과정동안 재료표면에 압축잔

류응력이 형성되고, 깊이 약 5 μ m까지 압축잔류응력이 안정되게 형성되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 표면근처에 형성된 압축잔류응력으로 인하여 미끄럼 초기에 표면을 미세하게 손상시킬 수 있는 인장 응력에도 저항할 수 있을 것으로 보인다.

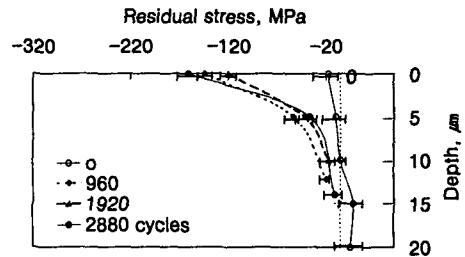


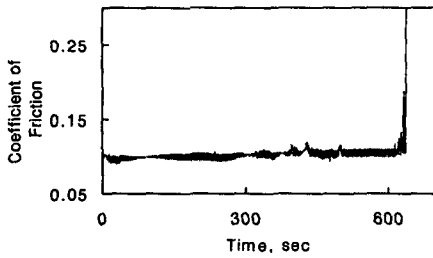
Fig. 4. Residual stress distribution produced during the break-in process

3.3 길들이기 과정과 표면파괴

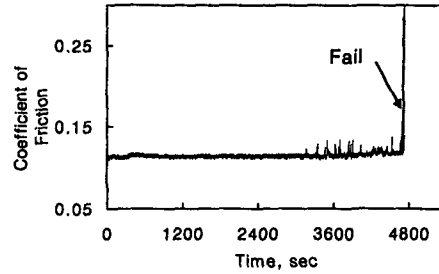
길들이기 한 재료와 그렇지 않은 재료의 표면파괴 실험 동안 마찰계수의 변화는 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 길들이기 된 경우는 안정된 마찰계수 구간이 존재하였고, 파손까지의 수명은 길들이기를 하지 않은 경우에 비해 8배정도 증가되었음을 알 수 있다. 이와 같이 적합한 길들이기를 마친 시편을 이용하여 표면파괴가 일어날 때까지 미끄럼시험을 수행하면서 잔류응력 분포의 변화를 살펴보았다. 952사이클 후 잔류응력 분포는 그 Fig. 6(a)에서 볼 수 있듯이, 표면에서는 약 170MPa에서 210MPa까지 증가하여 길들이기를 거치지 않은 시편과 비슷한 값을 나타내었으나, 표면 아래에서는 길들이기 과정을 거치지 않은 시편 보다 훨씬 큰 값의 잔류응력을 15 μ m 깊이까지 나타내었다. 길들이기 되지 않은 경우 파손이 발생하였던 1360 사이클에서는 Fig. 6(b)에서와 같이 표면에서의 잔류응력 증가보다 표면 아래에서의 증가가 두드러졌고, 특히 5 μ m에서 매우 큰 값의 잔류응력을 나타내었다. 이는 길들이기 과정을 거치지 않은 시편의 경우보다 두 배 이상 큰 값으로 이로 인해 미끄럼 표면의 수명이 연장되었음을 알 수 있다. 비교적 많은 시간이 경과하여 파손이 발생한 시점인 10880 사이클에서

잔류응력 분포는 Fig. 6(c)에서 볼 수 있듯이 표면에서 잔류응력 값이 약 300MPa 까지 급증하고 깊이 15 μ m까지는 약간의 증가가 있었지만 깊이 15 μ m 이하에서는 역시 더 이상 압축잔류응력이 크게 증가하지 못하고 있었음을 볼 수 있다. 이러한 표면 아래에서의 잔류응력의 증가와 표면에서의 잔류응력 증가로 인해 시편의 수명이 길들이기를 거치지 않은 시편에 비해 마찰 수명이 8배정도 연장되었다.

표면파괴 시에 형성되어 있는 잔류응력을 비교해 보면, 표면에서의 압축잔류응력은 파손될 때까지 그 값이 약간 증가되고 전체적인 압축잔류응력 값이 길들이기 한 시편에서 더 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 잔류응력의 형성은 재료내부의 소성 변형과 탄성변형의 복잡한 관계에 의한 것이다. 그러므로 적합한 길들이기는 요소의 작동 기간동안에 재료내부에서도 압축잔류응력이 증가되도록 표면과 표면아래에 소성변형과 탄성변형의 분포를 형성시키는 역할을 하는 것으로 추정된다. 이렇게 증가된 압축잔류응력으로 인하여, 재료는 미끄럼 실험당시 하중과 마찰영향이 가장 큰 영역에서 미끄럼 방향의 인장력에 저항할 수 있는 능력을 갖게 된다고 볼 수 있다.

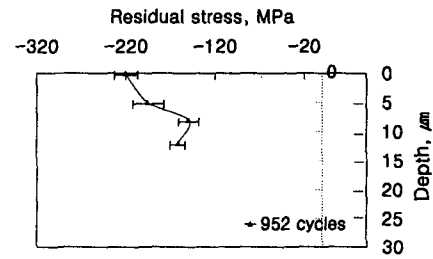


(a) Without break-in

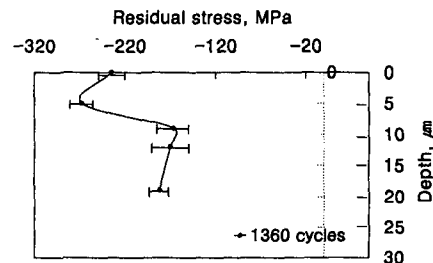


(b) With break-in

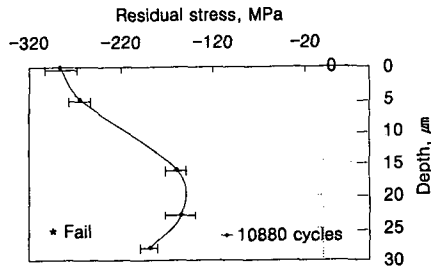
Fig. 5. The variation of friction coefficient



(a) After 952 cycles



(b) After 1360 cycles



(c) After 10880 cycles

Fig. 6. Residual stress distribution during the scuffing test with break-in

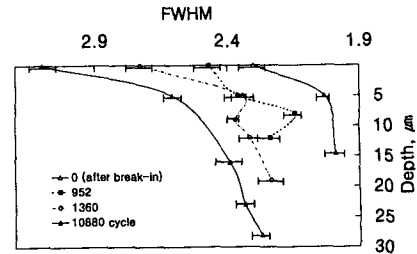


Fig. 7. The degree of plastic deformation during the scuffing test with break-in

3.4 재료의 소성변형분포의 변화

재료의 소성변형 정도와 선형관계를 갖는 것으로 알려진 X-ray 회절선 넓이(Full Width at Half Maximum Intensity)를 측정하여 재료의 소성변형 정도의 분포를 Fig. 7에 나타내었다. 전체적인 분포를 살펴보면, 잔류응력의 분포와의 차이는, 표면에서 소성변형의 지속적인 증가와 함께 표면아래에서도 지속적인 증가를 한다는 점이다. 이것은 잔류응력의 생성은 소성변형과 직접적인 연관성이 있기는 하지만, 재료전체의 거동이 아닌 표면의 특정 영역에만 외력이 가해지는 미끄럼운동에서는 소성변형의 분포가 잔류응력의 분포와 일치하지는 않는다는 것을 보여주며, 이는 재료내부의 소성변형과 탄성변형의 복잡성을 보여주는 예라고 할 수 있다.

길들이기 과정을 거치는 동안의 소성변형은 재료 내부 뿐만 아니라 표면에서도 그리 크지 않은 분포를 나타내고 있다. 하지만 표면파괴 실험동안 사이클의 경과와 함께 표면에서는 현저한 소성변형을 보이고 적어도 깊이 30 μ m까지는 표면아래에서도 전체적인 증가를 보이고 있다. 이러한 소성변형이 표면에서 현저하게 증가함에도 불구하고 파손이 지연되는 것은, 과도한 소성변형이 이루어지는 위치에서 발생하기 쉬운 결함의 생성과 성장이 길들이기 과정동안 형성된 압축잔류응력의 영향으로 인하여 방지되거나 지연되기 때문으로 생각된다.

4.결론

재료의 표면과 표면아래 영역에 형성되는 잔류응력을 관찰하여 길들이기 과정이 표면파괴 현상에 어떠한 영향을 주는 가를 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 m이하 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 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 마찰

영향이 가장 큰 표면과 표면아래에서 미끄럼 방향의 인장력에 저항할 수 있는 능력을 갖게된다.

4. 잔류응력의 생성은 소성변형과 직접적인 연관성이 있기는 하지만, 재료전체의 거동이 아닌 표면의 특정 영역에만 외력이 가해지는 미끄럼운동에서는 소성변형의 분포가 잔류응력의 분포와 일치하지는 않는다는 것을 알 수 있으며, 길들이기 이후 파손실험에서 사이클의 증가와 함께 소성변형이 현저하게 증가함에도 불구하고 파손이 지연되는 것은, 과도한 소성변형이 이루어지는 위치에서 발생하기 쉬운 결함의 생성과 성장이 길들이기 과정동안 형성된 압축잔류응력의 영향으로 인하여 방지되거나 지연되기 때문으로 생각되며, 이는 표면파괴의 원인이 표면이 아닌 표면아래에 있다는 이론을 뒷받침할 수 있는 것으로 생각된다.

vol. 175, pp.123-131, 1994

7. T. Sheiretov, H. Yoon and C. Cusano, "Scuffing under dry sliding conditions - part1: Experimental studies", Tribology Transaction, vol. 41, pp.435-446, 1998
8. P. S. Prevey, "The measurement of subsurface residual stress and cold work distribution in Nickel base alloys", Residual stress in design, process and materials selection, ASM International, pp.11-19, 1990

참고문헌

1. K. T. Kim and K. C Ludema, "A correlation between low cycle fatigue properties and scuffing properties of 4340 steel", ASME J. of Tribology, vol. 117, pp.617-621, 1995
2. Y. Z. Lee and K. C Ludema, "The shared load wear model in lubricated sliding: scuffing criteria and wear coefficient", Wear, vol. 138, pp.13-19, 1990
3. S. C. Lee and H. S. Cheng, "Correlation of scuffing experiments with EHL analysis of rough surfaces", ASME Journal of Tribology, vol. 113, pp.318-326, 1991
4. S. C. Lee and H. S. Cheng, "Scuffing theory modeling and experimental correlations", ASME J. of Tribology, vol. 113, pp.327-324, 1991
5. Y. Z. Lee and K. C Ludema, "The effects of surface roughening and protective film formation on scuff initiation in boundary lubrication", ASME J. of Tribology, vol. 113, pp.295-302, 1991
6. K. B. Park and K. C Ludema "Evaluation of the plasticity index as a scuffing criterion", Wear,