

재료의 표면파괴와 마멸특성에 대한 표면 형상의 영향

오세두 · 이영제*

성균관대학교 대학원 기계공학부

*성균관대학교 기계공학부

The effect of surface profile on wear and scuffing of boundary lubricated sliding surfaces

Se-Doo Oh and Young-Ze Lee*

Graduate School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

Abstract - In this paper the ball-on-disk type sliding tests with boundary lubricated steels were carried out to verify the relation between surface profiles and wear as well as scuffing. Three kinds of surface roughness and asperity radius were produced on AISI 1045 steels using the different processes of grinding and polishing. Frictional forces and time to scuffing were measured. Also, the shape and amount of wear particles were analyzed to compare with original profiles. From the tests, it was confirmed that the size of wear particles are very related to original surface profile. The time to failures and wear amounts were sensitive to the surface spacing. The large surface spacing shows much longer sliding life and smaller wear amount than the others. Time to scuffing was increased with increasing surface profile spacing. The size of wear particles was increased and the amount was decreased with increasing surface profile spacing. Wear volume and wear rate K were decreased with increasing surface profile spacing. And after sliding tests, surface cracks of inner parts of the wear track occurred scuffing were observed and compared the differences about each specimen having the different surface profile spacing.

Key words-scuffing, surface profile spacing, wear particle, surface crack

1. 서론

윤활 환경에서 미끄럼운동을 하는 기계요소들은 대부분 경계윤활 조건에서 작동하게 된다. 이러한 기계요소의 접촉 표면은 마멸에 의해 손상을 받게 되며, 스커핑(scuffing)이라고 하는 예상하기 어려운 표면파괴가 발생한다. 스커핑은 미끄럼 표면의 갑작스런 파괴형태를 말하는데, 일반적으로 마찰력의 증가와 표면이 거칠어지는 현상을 수반한다[1].

이러한 표면파괴 현상의 원인에 관한 많은 연구들이 있는데[1-4], 재료표면의 변화와 보호막의 효과와 같은 표면에 관련된 현상으로 생각하는 것이 일반적이다[5,6]. 최근에는 윤활유를 사용하지 않은 미끄럼 상황에서 표면 상호작용이 표면아래 상당한 깊이까지 영향을 미치기 때문에 표면파괴에 이르는 과정은 표면아래에 까지 연관되어야 한다는 이론이 제시되고 있다[7].

일반적으로 스커핑이 문제시되는 기계요소들은 반복된 접촉 미끄럼 환경에서 동작을 하게 되며,

그 작동조건상 피로의 특성을 가지게 된다. 즉 응축마멸에 기초한 스커핑이 발생하기 전에 표면 주위에 균열이 발생하게 될 것이다[8]. 본 연구에서는 표면의 형상이 다른 시편에 대해서 미끄럼 실험을 수행하여 재료의 표면파괴(scuffing) 및 마멸에 관한 특성을 알아보려고 한다. 그리고 접촉하는 두 표면이 미끄럼 운동을 하게 될 때 접촉면에서 높은 접촉압력 때문에 나타나는 표면균열들을 확인할 것이다. 스커핑이 일어난 후 마멸트랙에서 떨어져 나온 마멸입자를 채취하여 그 크기와 분포를 알아볼 것이고, 마멸트랙에 나타난 표면균열들을 관찰하고자 한다.

2. 실험

본 실험을 위해서 AISI 1045강을 지름 60mm, 두께 10mm의 원형디스크형으로 가공하여 세 종류의 시편을 제작하였다. 상대재로는 AISI 52100강으로 이루어진 1/4in 볼을 이용하였으며, Fig. 1과 같은 ball-on-disk 형태의 미끄럼 실험을 수행하였다. 윤활 환경으로는 미네랄 오일을 사용하였으며, 실험장치는 수직하중과 마찰력을 로드셀을 이용하여 작용시켰고 시험기와 자료획득장치를 연결하여 마찰력과 마찰계수를 측정하였다. 수직하중은 초기하중 20kg에서 1000cycle 마다 20kg씩 증가시켰으며 마찰력을 관찰하면서 스커핑이 일어날 때 실험을 정지시켰다.

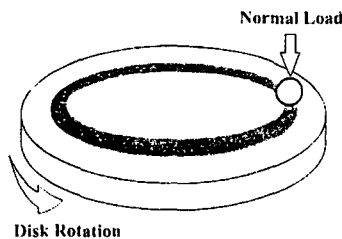


Fig. 1. Ball-on-disk type sliding test

Table 1 Surface parameters of each specimen

Parameters	Type 1	Type 2	Type 3
S_m [mm]	0.0385	0.0617	0.1049
S [mm]	0.0241	0.0305	0.0426
R_a [μm]	0.1902	0.5607	0.9088
R_q [μm]	0.2571	0.7441	1.1503
Δa	0.0662	0.1132	0.1156
Δq	0.0976	0.1706	0.1787
λa [mm]	17.8367	31.4900	49.9033
λq [mm]	16.4700	27.4767	40.6167

실험에 사용된 디스크 시편은 870°C의 전기로에서 1시간동안 가열하여 담금질한 후 템퍼링(Tempering) 온도를 조절하여 브리넬 경도 590HB가 되도록 하였다. 열처리 후 표면의 형태를 다르게 하기 위하여 입도가 다른 슛들을 이용하여 표면을 연마하였으며, 연마된 표면을 동일한 사포를 이용하여 폴리싱 하였다. Table 1은 가공된 세 시편의 표면파라미터를 보여준다.

표면을 폴리싱하므로써 상대재인 볼과 접촉하게 될 때 세 종류 시편의 접촉상태는 동일하게 된다. 단지 차이가 나는 점은 디스크 시편의 스페이싱(S_m)이다. 스페이싱이란 표면 profile의 평균파장으로, peak와 가까운 valley의 가로방향의 평균길이이다. Table 2는 상대재와 접촉을 이루는 peak부분의 표면 파라미터를 보여주는데 그 크기들이 아주 유사하다는 것을 확인할 수 있다. 폴리싱에 의해 표면의 스페이싱을 다르게 함으로써, 표면 돌

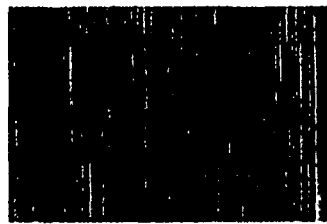
Table 2. Surface parameters of contact part for each specimen

Parameters	Type 1	Type 2	Type 3
S_m [mm]	0.0393	0.0417	0.0422
S [mm]	0.0259	0.0227	0.0206
R_a [μm]	0.1892	0.2043	0.1980
R_q [μm]	0.2123	0.2302	0.2192
Δa	0.0657	0.0703	0.0686
Δq	0.0982	0.0952	0.1098
λa [mm]	17.7020	17.1296	16.7655
λq [mm]	16.9864	16.5419	19.9072

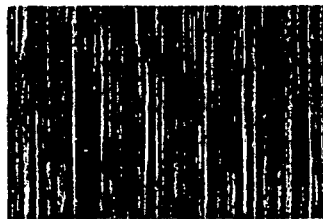
기의 수를 다르게 하면서도 미끄럼 실험에서 접촉 상태를 동일하게 할 수 있다. 따라서 하중이 작용하게 될 때 표면돌기의 peak에서 변형되거나 마멸되는 것들을 줄일 수 있으며, 표면돌기의 valley 부분의 변형이나 균열의 생성이나 진전에 의해 발생하는 마멸현상을 관찰할 수 있다.

Fig. 2는 본 연구를 위해 제작된 시편의 표면을 보여준다. 표면을 보면 알 수 있듯이 Type 1의 표면의 스페이싱은 Type 3의 스페이싱보다 짧다. 표면에서 밝은 부분은 폴리싱에 의해 표면돌기의 peak 부분을 제거해서 평평해진 부분이다.

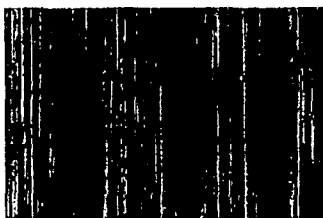
Fig. 3은 각 시편의 표면조도를 보여준다. 시편의 표면조도를 관찰하면 표면돌기의 peak 부분들이 폴리싱에 의해 가공되었다는 것을 확인할 수 있다. 그리고 시편에 따라 스페이싱이 다르다는 사실과



(a) Type 1

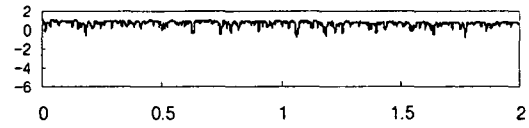


(b) Type 2



(c) Type 3

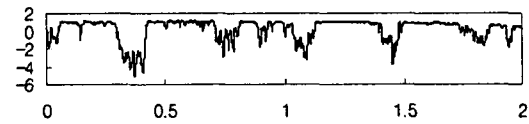
Fig. 2 Surface of each specimen



(a) Type 1



(b) Type 2



(c) Type 3

Fig. 3 Surface roughness of each specimen

그 길이 또한 알 수 있다.

그리고 미끄럼 실험을 수행한 후 스커핑 현상이 일어난 표면의 마멸트랙 주위에 남겨져 있는 마멸입자를 채취하였다. 그리고 표면의 스페이싱에 따른 마멸입자들의 크기를 측정하여 그 경향을 비교하였다. 마멸트랙 주위의 마멸입자들은 세심한 주위를 기울여 채취하였고, 마멸트랙을 4등분하여 한 개의 마멸트랙마다 4번을 채취하였다. 그리고 금속 현미경을 이용하여 마멸입자의 크기를 측정하였고, 그 크기를 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미끄럼 실험결과

Table 3은 표면의 스페이싱(Surface Roughness Spacing)이 다른 세 종류 디스크 시편에 대해서 미끄럼 실험을 수행한 후 결과를 보여준다. 우선 세 시편의 미끄럼 실험 중에 나타난 마찰계수는 0.11~0.12 정도로 그 크기가 거의 같다. 하지만 마찰력과 마찰계수가 급격히 증가하여 표면의 파괴가

일어나는 스커핑 수명은 Type 3이 Type 1보다 더 길다. 또 볼과의 접촉에서 발생한 마멸량은 Type 1 보다는 Type 3가 더 작다. 이것을 통해서 스페이싱의 길이가 길수록 재료의 내마멸성이 우수하다고 할 수 있다.

Table 3 Results of sliding test

	Type 1	Type 2	Type 3
Coefficient of Friction	0.115	0.114	0.117
Scuffing Life (cycles)	2383	4062	4621
Wear Volume (mm ³)	0.1818	0.1485	0.0835
Wear Rate, K ($\times 10^{-6}$ mm ³ /N · m)	2.491	0.802	0.236

3.2 스페이싱에 따른 스커핑 및 마멸특성

미끄럼 실험결과에 의하면 표면 형상의 스페이싱 길이에 따라서 스커핑 특성이 다르다는 것을 알 수 있었다. Fig. 4는 표면의 스페이싱 길이가 다른 스커핑 수명과 관계를 보여준다. 일반적으로 표면 스페이싱이 증가하면 스커핑 수명이 증가하는 경향을 보인다. Fig. 5는 스페이싱에 따른 마멸량을 보여준다. 스페이싱이 증가할수록 재료의 마멸은 감소하고 있다. Fig. 6은 스페이싱에 따른 마멸율을 보여준다. 스페이싱이 증가할수록 재료의 마멸이 감소하기 때문에 재료의 마멸율 또한 감소하게 된다. 이상을 종합해보면, 스페이싱이 길어질수록 재료의 내마멸성이 증가하는 경향을 보인다.

그런데 본 실험에서는 동일한 실험조건에서 단지 변수가 되는 것은 시편으로 사용되는 재료 표면의 스페이싱 뿐이다. 미끄럼 실험에 의하면 스페이싱에 따라서 스커핑 특성과 마멸특성이 현저하게 차이가 나고 있다. 이것은 아마도 접촉하는 두 재료의 접촉면에서 발생하게 되는 균열의 차이 때문이라고 추측할 수 있다.

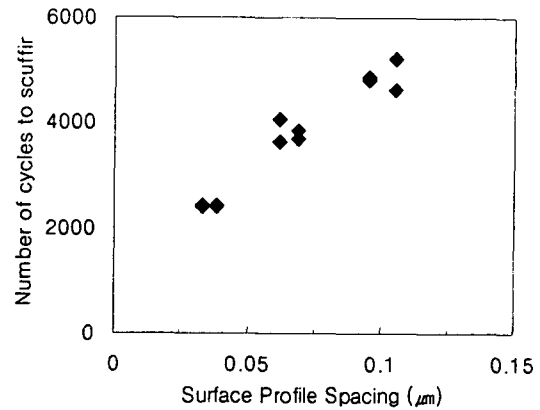


Fig. 4 The number of cycles to scuffing due to spacing of surface profiles

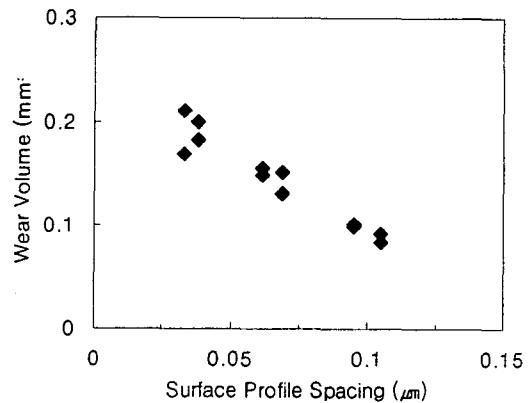


Fig. 5 The wear volume due to spacing of surface profiles

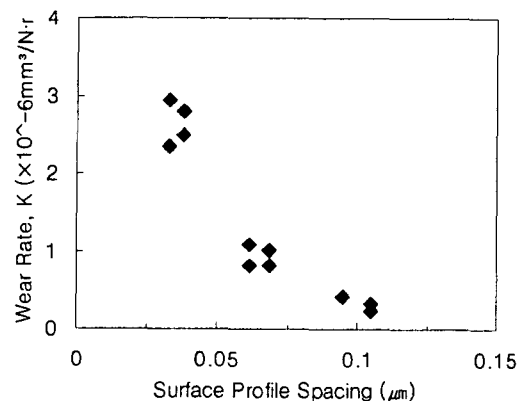


Fig. 6 The wear rate due to spacing of surface profiles

3.3 스페이싱에 따른 마멸입자의 크기

표면의 스페이싱이 다른 세 종류 시편을 이용하여 미끄럼 실험을 수행하였고, 미끄럼 실험을 통해서 스키핑 발생 후 마멸트랙(Wear Track) 주변에 남게 되는 마멸입자(Wear Particles)들을 채취하여 그 크기를 측정하였다. Table 4는 각 시편에서 떨어져 나오는 마멸입자들의 입자크기를 보여준다. Type 1의 시편에서 떨어져 나오는 마멸입자에 비해 Type 3에서 마멸되는 입자들의 평균 크기가 더 크다. 이것으로 표면의 스페이싱이 크면 마멸입자의 평균 크기도 커진다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 7은 마멸입자들을 정규분포함수(Normal Distribution Function)를 이용하여 나타낸 것이다. Fig. 7을 보면 알 수 있듯이 마멸입자에 대한 정규분포곡선이 종 형태의 분포를 보이므로 마멸입자들은 정규분포를 따른다고 할 수 있다.

정규분포곡선을 관찰하면 세 종류의 시편에서 떨어져 나오는 마멸입자의 크기를 알 수 있다. 우선 Type 1에 비해 Type 3의 평균 입자크기가 크다는 것을 알 수 있다. 하지만 Type 1에서의 마멸입자들이 평균크기와 유사한 크기로 떨어져 나온다는 것을 알 수 있다. 반면에 Type 3에서의 마멸입자들은 Type 1과 비교했을 때 그 크기들은 평균 입자크기에 비교해서 다양하다고 할 수 있다.

Fig. 8은 마멸트랙에서 채취한 마멸입자들을 각 크기별로 나타낸 것이다. Fig. 8과 같이 재료에서 떨어져 나오는 마멸입자들의 수는 평균 입자크기

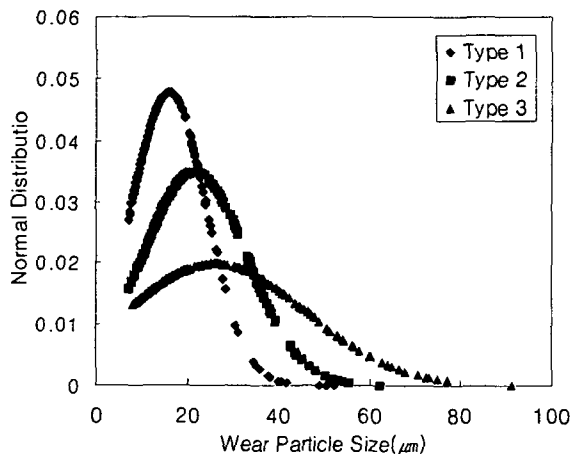
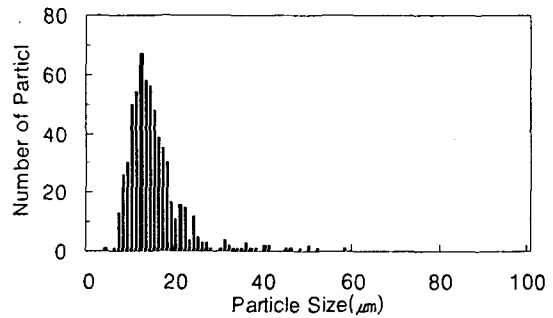


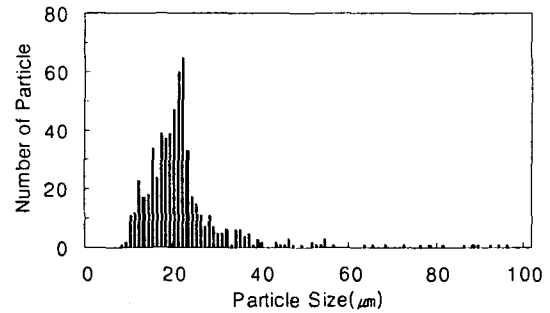
Fig. 7 Normal distribution of wear particles

Table 4. The size of wear particle after sliding test

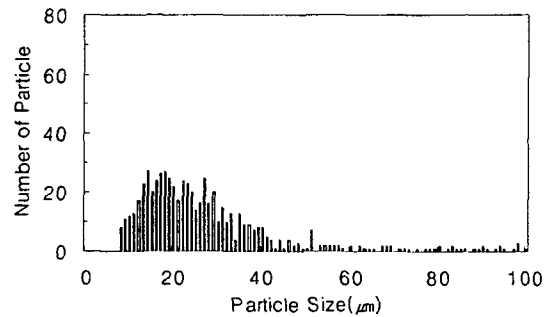
	Type 1	Type 2	Type 3
Ave. Particle Size (μm)	15.60	20.63	26.65
Max. Particle Size (μm)	55	100	180



(a) Type 1



(b) Type 2



(c) Type 3

Fig. 8 Number of wear particle for each specimen

에서 가장 많고 평균 입자크기에서 멀어질수록 그 수가 작아진다. 즉 Fig. 7와 Fig. 8를 겹쳐본다면 아주 유사한 경향이 나타난다는 것을 확인할 수 있다.

한편 Table 4가 보여주는 것과 같이, 각 시편에서 떨어져 나오게 되는 마멸입자들에서 자세히 관찰해야 할 것은 스페이싱 길이가 길어질수록 마멸입자들의 최대크기가 커진다는 것이다. Type 3의 경우 최대 마멸입자의 크기는 $180\mu\text{m}$ 정도이고 Type 2의 경우는 최대 마멸입자의 크기는 약 $100\mu\text{m}$ 정도이고 Type 1의 경우는 약 $55\mu\text{m}$ 정도이다. 이들 크기가 갖는 특징은 표면 돌기의 크기와 거의 유사하다는 것이다. 일반적으로 스커핑 현상은 상대운동을 하는 두 재료의 높은 응착력 때문에 발생한다. 따라서 이 정도의 커다란 마멸입자들이 재료에서 떨어져 나오기 위해서는 이러한 응착력과 미끄럼 방향의 하중에 의해 표면 주위의 어느 부분에서 균열이 생성되어 진전함으로써 표면돌기들이 떨어져 나온다고 생각할 수 있다. 다시 말해서 표면의 스페이싱이 길수록 접촉표면에 나타나는 균열의 길이는 길어지는 것은 높은 압력에 의해 생성된 균열들이 전파할 수 있는 거리가 길어지기 때문이다.

이상을 종합해 보면 재료의 표면에서 스커핑 현상에 의해 마멸이 일어날 때 표면의 형상에 따라 그 경향이 다르다는 것을 알 수 있다. 다시 말해서 표면의 스페이싱이 길게 되면 마멸입자들이 크기가 커지고, 마멸율이 작게 되며 내마멸성이 좋아진다. 이것은 표면의 스페이싱이 작으면 표면 주위에 존재하는 균열의 수가 많게 되어 균열들 간에 결합하여 표면의 마멸에 영향을 주기 때문이다. 스커핑 현상에 의한 표면의 마멸은 표면균열의 많은 표면에서 발생한다고 말할 수 있다.

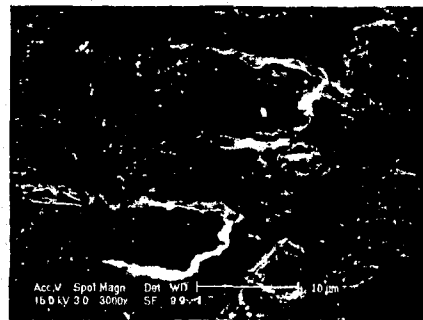
3.4 스페이싱 길이에 따른 표면균열

Fig. 9는 스커핑 현상이 일어난 후 시편의 표면을 SEM(Scanning Electronic Microscope)을 이용하여 관찰한 그림이다. Fig. 9는 각 시편의 표면에서 미끄럼 실험에 의해 나타나는 표면의 균열들을 보여준다. 그림과 같이 표면의 균열들은 서로 다른

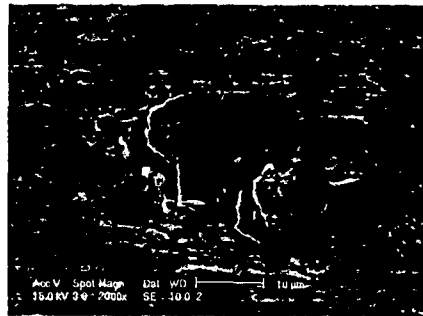
방향으로 성장을 하다가 결합하게 되어 결국에는 마멸현상이 일어나게 된다.

이러한 표면 부근의 균열들이 결합함으로써 표면에서 마멸이 발생하는데 시편의 표면에서 떨어져 나간 마멸흔적은 일반적으로 마멸입자의 크기에 비례하여 Type 1이 Type 3보다 더 작다.

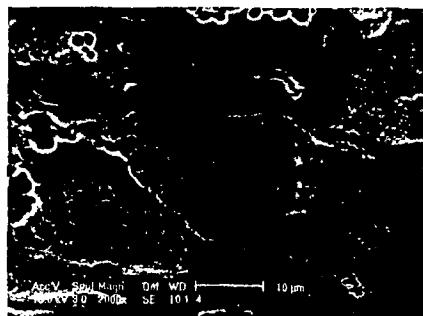
표면균열의 성장 메카니즘은 시편의 돌기들은 미끄럼 접촉운동을 하면서 조금씩 마멸된다. 그러나



(a) Type 1 [$\times 3000$]



(b) Type 2 [$\times 2000$]



(c) Type 3 [$\times 2000$]

Fig. 9 Surface crack of each specimen

높은 접촉 압력과 반복 미끄럼 운동으로 인하여 표면 주위에 균열이 발생하게 된다. Fig. 10은 접촉부분에 발생한 표면균열을 옆에서 관찰한 것인데, 미끄럼 실험을 계속하게되면 화살표 방향으로 균열이 전파하여 마멸입자가 떨어져 나올 것이다.



Fig. 10 The propagation of surface crack

4.결 론

본 연구에서는 미끄럼 실험을 수행하여 표면의 스페이싱이 스커핑 특성과 마모특성에 미치는 영향을 알아보았다. AISI 1045 강으로 세 종류의 디스크 시편을 제작하여 스커핑이 일어난 후 접촉 표면에서 떨어져 나온 마멸입자와 균열들을 관찰하였으며, 실험결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 표면의 스페이싱이 증가하면, 표면파괴로 정의되는 스커핑 수명이 증가한다. 이것은 미끄럼 운동을 수행할 때 두 표면의 접촉면적의 차이 때문에 나타난다. 스페이싱이 증가하면 접촉면적이 증가하여 동일한 하중이라도 접촉압력이 작게되어 스커핑 수명이 늘어나는 것이다.
2. 표면의 스페이싱이 증가하면 스커핑이 발생할 때까지의 마모량은 감소하며, 따라서 마모계수도 작아진다. 이것은 동일한 실험조건에서 스페이싱이

길수록 재료의 내마모성이 증가하기 때문이다.

3. 스커핑이 발생한 후 마모되어 떨어져 나온 입자들은 정규분포함수를 이용하여 나타낼 수 있고, 이를 통해서 정규분포를 이룬다는 것을 확인할 수 있다. 그리고 마모입자들의 평균크기는 스페이싱이 클수록 커지는 경향을 보이며, 그에 따라 입자의 분포도 평균 크기에서 벗어나 다양한 크기의 입자들이 떨어져 나온다. 스페이싱이 작을수록 마모된 입자크기가 고르게 된다는 것을 확인할 수 있다.

4. 표면의 스페이싱이 길수록 접촉표면에 나타나는 균열의 길이는 길어지는데 이것은 높은 압력에 의해 생성된 균열들이 전파할 수 있는 거리가 길어지기 때문이다.

5. 표면 형상의 스페이싱 길이가 증가하면 표면에서 떨어져 나오는 마모입자의 크기는 커지는 경향을 갖는다. 이 입자들 중에서 큰 마모입자들은 표면 돌기들의 크기와 거의 일치한다. 따라서 두 재료가 접촉 미끄럼 하는 조건에서는 접촉하는 재료의 표면에 균열의 생성을 수반하고, 반복된 미끄럼을 통해서 균열의 전파·성장으로 표면에서 떨어져 나오며, 결국에는 표면의 파괴(scuffing)를 야기시킨다.

참고문헌

1. K. T. Kim and K. C Ludema, "A correlation between low cycle fatigue properties and scuffing properties of 4340 steel", ASME J. o 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, 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. H. Fan, L. M. Keer, W. Cheng, and H. S. Cheng, "Competition between fatigue crack propagation and wear", ASME J. of Tribology vol. 115, pp.141~147, 1993