

윤활환경에 따라 발생하는 소성변형량과 저주기 피로물성을 이용한 스커핑 수명 예측

김병주 · 이영제*

성균관대학교 대학원
*성균관대학교 기계공학부

The Prediction of Scuffing Life due to Plastic Deformation and Low-cycle Fatigue Properties Under Various Lubricated Conditions

Byung-Ju Kim and Young-Ze Lee*

Graduate School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University
*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

Abstract—A correlation between the low-cycle fatigue life and the scuffing-failure life is demonstrated using the plastic strain increment in boundary lubricated sliding. Loadings proportional to hardness with three different lubricated conditions were used to evaluate the plastic strain increments. As the results of scuffing tests using vacuum pump oils in nitrogen gas, plastic strain increment shows 0.0062, and in the mineral oils and commercial engine oils in air, plastic strain increments show 0.0042 and 0.00092. Those are very useful to describe quantitatively the real lubricated sliding conditions, and are very effective to find the relation between the low-cycle fatigue life and the scuffing-failure life.

Key words—scuffing, low-cycle fatigue property, plastic strain increment.

1. 서 론

윤활 상태에서 서로 접촉하여 상대운동을 하는 기계요소들은 대부분 경계 윤활환경에서 작동을 한다. 이러한 기계요소들의 표면은 마멸에 의해 점진적으로 손상을 받을 뿐만 아니라 갑작스런 표면파괴(Catastrophic surface failure)인 스커핑(Scuffing)에 의해 손상을 받는다[1]. 점차적으로 발생하는 마멸에 의한 표면파괴의 수명은 예측이 가능하며, 또한 마멸을 방지하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다[2,3]. 그러나 스커핑은 작동 중에 갑작스럽게 발생하며, 또한 기계적·화학적·열적 작용을 포함하는 등 매우 복잡하여 그 메커니즘에 대한 완전한 정립이 아직 이루어지지 않았으며, 따라서 스커핑에 의한 표면파괴를 예측하기가 매우 힘들다. 스커핑이 발생하면 마찰력이 증가하고 소

음과 진동을 동반하며 표면이 거칠어지는 등 많은 영향을 끼치며, 미끄럼 운동을 하는 기계요소가 스커핑 발생 후에는 정상적인 작동을 하지 못하게 된다. 스커핑은 캠, 태핏, 피스톤링, 기어 등 미끄럼 운동을 하는 기계요소에서 발생하여 중요한 문제를 야기한다[4-6]. 이러한 기계요소는 스커핑손상을 예방하기 위하여 과도하게 설계되거나 비싼 재료나 특수한 공정을 요구하게 된다.

스커핑에 미치는 인자들은 재료의 기계적물성치, 재료의 열적물성치, 접촉표면의 화학적 인자, 접촉온도, 표면이 받는 하중, 미끄럼속도, 접촉면의 형상, 그리고 외부환경요인 등이 있다. 대부분의 스커핑을 예측하고자 하는 연구는 이것들을 측정하여 정량화 하는 것에 집중되어 왔으며[7,8], 후에 외부적인 조건으로 인해 윤활면에 발생하는 현상들을 중심으로 스커

핑을 설명하여 표면의 형상 및 경도 변화, 보호막의 성장과 손실에 관한 연구들이 진행되어 왔다[9]. 일반적으로 반복 미끄럼 접촉 하에서 하중이 가해지면 재료의 표면은 주기적으로 많은 소성변형량을 일으키므로 재료의 표면은 저주기피로(Low-cycle fatigue)의 영향을 받는다. 재료는 반복접촉의 영향으로 손상을 받고 이렇게 축적된 손상은 결국 표면파괴를 야기시킨다[10-12].

따라서 본 연구에서는 외부적인 조건, 즉 하중이나 속도 등에서 재료 및 윤활환경의 변화에 따라서 윤활면에서의 실제 상황은 접촉표면의 변형량으로 정량화할 수 있으며, 이러한 표면에 반복적으로 가해지는 변형량은 재료 표면의 피로파괴를 야기하고, 이로 인하여 재료표면의 표면변형층, 산화막, 전이층의 변형, 마찰력의 변화 및 온도증가 등의 과정을 거쳐 최종적으로 스키핑이 발생한다고 보고, 이를 실험적으로 설명하고자 한다. 따라서 저주기피로가 스키핑 발생에 중요한 인자가 되며, 여러 윤활환경에서 재료의 표면에 발생하는 소성변형량을 정량화 하여, 소성변형률에 상응하는 재료의 피로수명과 스키핑 수명과의 상관관계를 규명하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 시편 및 윤활유

본 연구에 사용된 시편은 AISI 1045강을 지름 60 mm, 두께 6 mm의 디스크형으로 제작하여 사용하였다. 각 시편은 870 °C의 전기로에서 1시간 동안 가열하여 담금질한 후 템퍼링 온도를 조절하여 브리넬경도로 225, 390, 450, 500 HB인 4종의 시편을 제작하였다. 열처리 후 동일한 조건으로 표면을 연마하여 표면조도를 중심선거칠기(Ra) 0.3 μm 로 일정하게 하였으며, 이렇게 얻은 시편의 저주기피로 물성치가 Table 1에 나타나있다.

Table 1. Fatigue properties of quenched and tempered AISI 1045 steels

Fatigue property	Hardness, HB			
	225	390	450	500
Fatigue ductility coefficient ϵ_f	1.00	0.45	0.35	0.25
Fatigue ductility exponent c	-0.66	-0.68	-0.69	-0.68

*Data from [Technical Report on Fatigue Properties, SAE J1099, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 1977].

Table 2. Properties of Lubricants

Lubricant	Density (15°C) g/cm ³	Flash Point °C	Kinematic Viscosity (40°C) cSt
Mineral Oil	0.879	148	9.125
Vacuum Pump Oil	0.831	250	22.0
Engine Oil	0.880	218	63.3

실험에 사용된 윤활유는 각기 화학적 반응 정도가 달라 윤활환경에 따라 보호막의 형성과 외부 하중을 모재 표면에 전달하여 소성변형을 일으키는 정도가 각기 다르도록 질소 분위기에서 진공펌프유, 공기 중에서 광유와 엔진기유(base engine oil)를 사용하였으며[13,14], 윤활유의 대표적인 물성치가 Table 2에 나타나있다.

2-2. 실험장치

스키핑 실험을 위한 실험장치는 압자와 시험편의 형상을 바꿀 수 있는 Multi-Type(Ball-on-Disc, Cylinder-on-Disc, etc)의 마찰·마모시험기를 이용하였으며, 본 실험에서는 압자와 시험편을 Ball-on-Disc형으로 하여 사용하였다. 압자로 사용된 볼은 직경이 10 mm의 베어링용 재질인 AISI 52100강으로 경도는 62 HRC이며, 스키핑 실험장치의 개략도가 Fig. 1에 나타나있다. 수직하중은 압자에 연결된 스프링을 통해 가해지며, 로드셀을 자료획득장치에 연결하여 수직하중과 마찰력을 온라인으로 처리할 수 있도록 하였다. 또한 마찰력에 의한 회전 속도의 감소를 최소화하기 위해 DC 모터에 감속기를 연결하여 사용하였다.

2-3. 실험내용 및 방법

스키핑 실험은 선속도를 0.3 m/s(143 rpm)로 일정하게 하였으며, 상온에서 수행하였다. 시편에 가해지는 하중조건에 따라서 두 종류의 실험을 하였다.

2-3-1. 일정하중 실험

경도가 다른 4종의 시편에 12 kg_f로 일정한 크기의 수직하중을 가하여 스키핑 실험을 수행하였다. 윤활유는 공기 중에서 광유를 사용하였다. 이 실험은 시편의 경도에 관계없이 일정한 크기의 하중을 주기 때문에 경도가 작은 시편에서 소성변형률이 상대적으로 많이 발생하리라 예상된다.

2-3-2. 비례하중 실험

각 시편에 가해지는 하중은 Table 3과 같이 경도에

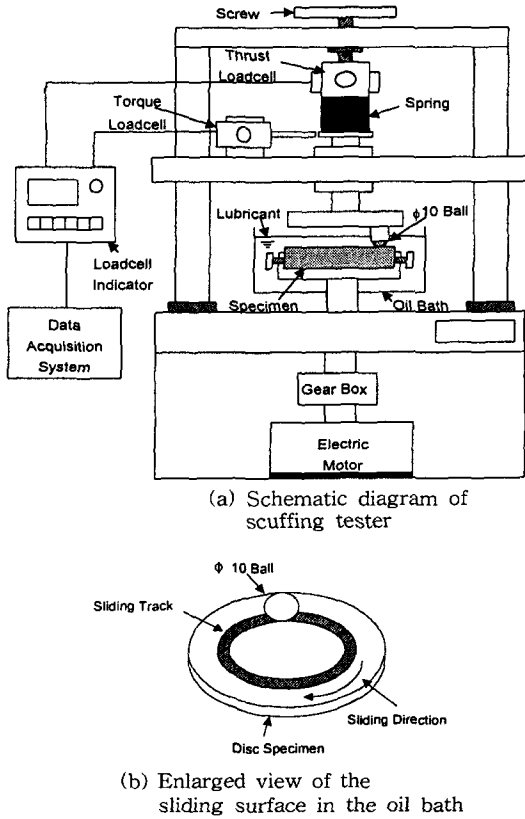


Fig. 1. Scuffing tester.

Table 3. Proportional loading

Hardness, HB	225	390	450	500
Applied load, kg _f	9	15.6	18	20

비례하는 수직하중을 가하여 스키핑 실험을 수행하였다. 경도에 비례하는 수직하중을 줄 경우 재료의 표면에 같은 크기의 소성변형량을 발생시킨다고 보았다. 단순 일축 인장에서 경도가 다른 시편에서 같은 크기의 소성변형량을 발생시키기 위한 하중은 P-δ선도에서 같은 소성변형량에 대응되는 하중일 것이다. 그러나 미끄럼 운동 시 표면의 소성변형은 인장실험과는 다르며 구를 이용한 압입 경도시험과 유사할 것이다. 경도에 비례하는 수직하중을 줄 경우 재료표면은 같은 크기의 접촉면적을 가질 것이며, 같은 크기의 소성변형량이 발생한다고 보아도 타당하다. 윤활유는 공기 중에서 광유와 엔진기유를 그리고 질소분위기에서 진공펌프유를 사용하였다. 각 윤활환경에서 마찰력의 크기가 비슷하다면 실제로 외부에서 윤활면에 작용시

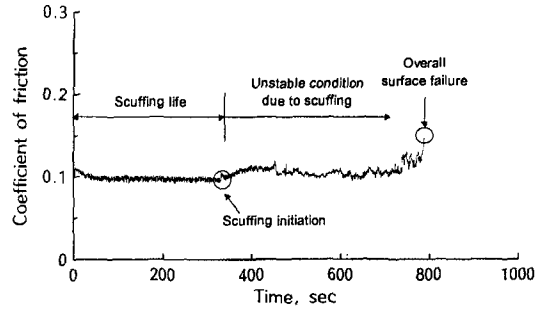


Fig. 2. Typical scuffing behavior in repeated sliding lubricated sliding contact.

킨 수직하중과 마찰력의 합력이 모두 비슷하리라 예상된다.

본 실험에서 스키핑 발생을 마찰력을 기준으로 하여 마찰력이 안정된 상태에서 불안정해지는 사이클을 스키핑 수명으로 결정하였다. Fig. 2는 전형적인 스키핑 거동을 나타내고 있으며, 안정된 마찰력을 보이다가 스키핑 발생으로 갑작스럽게 마찰력이 증가하며 불안정한 상태를 유지한다. 그리고 스키핑 실험을 수행한 후 미끄럼표면을 아세톤으로 세척한 후 표면조도계 (Surface roughness tester)를 이용하여 마멸량(Wear volume)을 구하였다. 마멸비(Wear rate)는 마멸량을 수직하중과 미끄럼거리로 나눈 값으로 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 일정하중 실험

시편의 경도에 상관없이 같은 크기의 수직하중을 가하면서 스키핑 실험을 수행하였으며, 윤활유는 공기 중에서 광유를 사용하였다. 경도에 따른 스키핑 수명과 마멸비(wear rate)가 Table 4에 나타나 있으며, 2회 이상 실험의 평균값이다. 경도변화에 대한 스키핑 수명은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 시편의 경도가 증가함에 따라 스키핑 수명이 증가함을 보여주고 있다. Fig. 4는 경도변화의 따른 마멸량을 수직하중과 미끄럼거리로 나눈 마멸비를 나타내고 있다. 경도가

Table 4. Results of constant loading tests using a mineral oil in air

Hardness, HB	225	390	450	500
The number of cycles to scuffing	337	808	1,554	2,150
Coefficient of friction	0.113	0.108	0.112	0.116
Wear rate, $\times 10^{-6} \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$	6.284	0.558	0.263	0.247

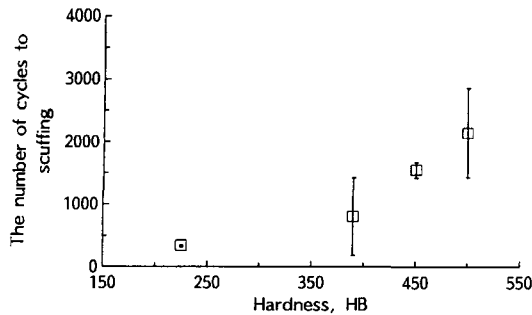


Fig. 3. The number of cycles to scuffing in constant loading tests using a mineral oil in air.

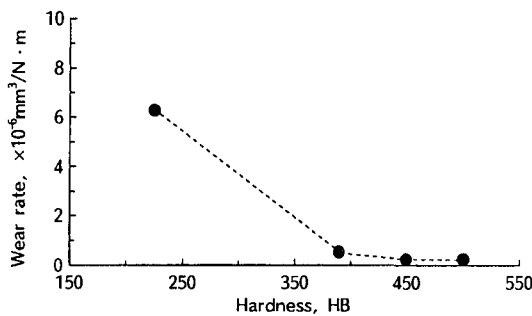


Fig. 4. Wear rates in constant loading tests using a mineral oil in air.

증가함에 따라 마찰계수의 변화는 Table 4에서 보듯이 거의 없으나, 스키핑 수명은 증가하며 마멸비는 Archard 마멸법칙[15]에 따라 감소한다. 동일한 윤활 환경에서 동일한 하중을 받을 경우 경도가 증가함에 따라 스키핑 저항성과 마멸저항성은 동시에 증가함을 알 수 있다. 그러나 이 결과는 무른 재료가 같은 하중 조건에서 더 큰 소성변형량이 발생하기 때문이며, 소성변형량을 정량화하여 스키핑과 저주기피로와의 관

계를 제시하지는 못한다.

3-2. 비례하중 실험

시편의 경도에 비례하는 수직하중을 가하면서 스키핑 실험을 수행하였으며, 윤활유는 공기 중에서 광유와 엔진기유, 질소분위기에서 진공펌프유를 사용하였다. 윤활환경에 따른 스키핑 수명과 마멸비가 Table 5에 나타나 있다. 경도에 따른 마찰계수는 거의 일정하였고, 윤활유에 따라서는 약간의 차이가 있었다. 모든 자료는 2회 이상 실험의 평균값을 사용하였다. Fig. 5는 공기 중에서 광유를 사용했을 경우 경도에 따른 스키핑 수명을 나타내고, Fig. 6은 마멸비를 나타내고 있다. 스키핑 수명과 마멸비는 경도가 증가함에 따라서 감소하였다. Fig. 7은 질소분위기에서 진공펌프유를 사용했을 경우의 경도에 따른 스키핑 수명을 나타내고, Fig. 8은 마멸비를 나타내고 있다. 스키핑 수명과 마멸비는 광유의 경우와 마찬가지로 경도가 증가함에 따라서 감소한다.

경도에 비례하는 하중 실험에서 윤활환경에 상관없이 경도가 증가함에 따라 스키핑 저항성은 낮아지나 마멸저항성은 Archard의 마멸법칙과 같이 커진다. 동일한 윤활유를 사용한 경우 시편 경도에 따라 윤활면에 일정한 소성변형량이 발생하므로 시편의 파괴연성(fracture ductility)에 따라 각기 다른 수명을 나타내며, 경한 시편의 경우 상대적으로 수명이 매우 짧음을 알 수 있다. 마찰계수는 질소분위기의 진공펌프유가 공기 중의 광유에 비해 약간 낮은 값을 보여주고 있으나, 공기 중의 광유가 스키핑 저항성과 마멸비에서는 더 양호한 성능을 보여주고 있다. 그리고 공기 중에 엔진기유를 사용하여 스키핑 실험을 수행한 결과는 Table 5에

Table 5. Results of proportional loading tests

Lubricated condition	Hardness, HB	The number of cycles to scuffing	Coefficient of friction	Wear rate $\times 10^{-6} \text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$
Mineral Oil+Air	225	2,856	0.113	5.943
	390	372	0.117	0.761
	450	191	0.125	0.547
	500	43	0.125	0.161
Vacuum Pump Oil+Nitrogen	225	1,287	0.100	8.02
	390	288	0.087	1.539
	450	63	0.092	0.779
	500	6	0.106	0.307
Engine Oil+Air	450	68,053	0.097	0.105
	500	63,885	0.091	0.058

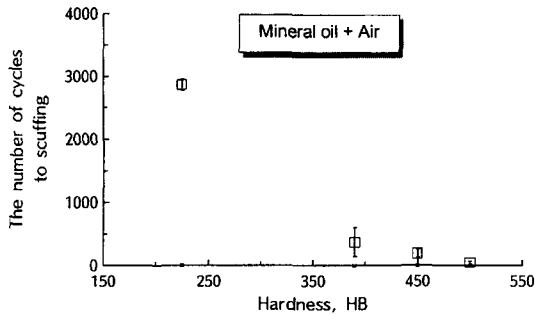


Fig. 5. The number of cycles to scuffing in proportional loading tests using a mineral oil in air.

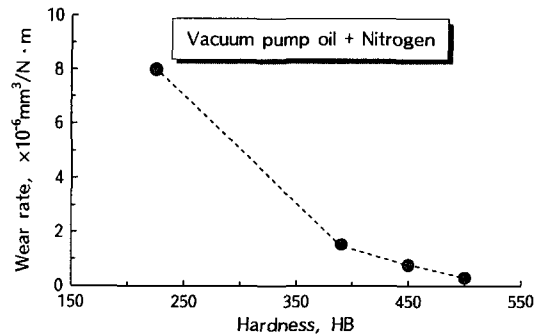


Fig. 8. Wear rates in proportional loading tests using a vacuum pump oil in nitrogen.

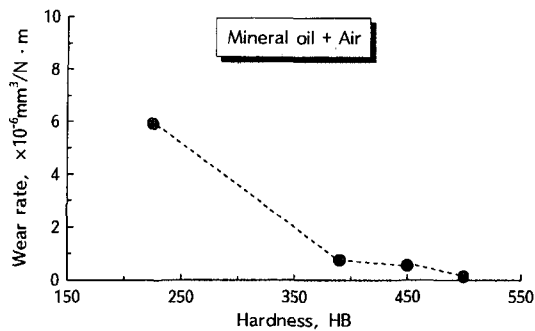


Fig. 6. Wear rates in proportional loading tests using a mineral oil in air.

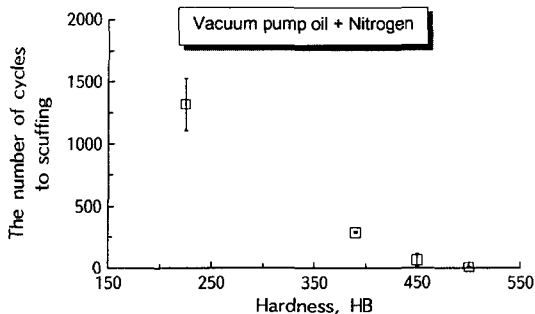


Fig. 7. The number of cycles to scuffing in proportional loading tests using a vacuum pump oil in nitrogen.

나타나 있는 것과 같이 스키핑까지의 수명이 60,000회 이상으로 다른 유탈환경에 비해 월등히 우수한 성능을 보여주고 있다.

보호막의 형성에 관한 이전의 연구[14]에서 광유사용 시 10분 후 5Å 정도의 보호막의 형성이 관찰되었고, 엔진기유의 경우 50Å 정도의 보호막이 관찰되었다. 이러한 보호막은 마찰력을 흡수하여 모재에 전달되는 응력을 감소시킨다. 따라서 외부적으로 가한 수

직하중과 그로 인하여 발생한 마찰력으로 세 가지 유탈환경 모두 같은 크기의 소성변형량이 가해지도록 하중을 주어 실험을 하였으나, 앞에서 언급한 보호막의 형성으로 인해 실제 모재에 가해진 소성변형량에 커다란 차이가 있었음을 알 수 있다.

3-3. 스키핑과 저주기피로와의 상관관계

Fig. 9와 Fig. 10은 경도에 비례하는 하중을 준 경우 저주기피로 물성치인 파괴연성계수(ϵ_f : fatigue ductility coefficient)에 대한 스키핑 수명과 마멸비를 보여주고 있다. 파괴연성계수가 증가함에 따라 스키핑 수명과 마멸비가 동시에 증가하는 경향을 보여주고 있다. 스키핑 저항성의 측면에서는 파괴연성계수가 클수록, 마멸저항성 측면에서는 작을수록 유리함을 알 수 있다. 경도에 비례하는 하중으로 실험을 한 경우 유탈환경에 상관없이 스키핑 저항성과 마멸저항성과는 상반된 경향을 나타내고 있다.

저주기피로와 스키핑과의 상관관계는 직접적으로

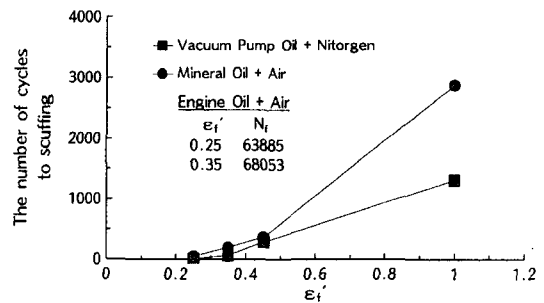


Fig. 9. Correlation between fatigue ductility coefficient and the number of cycles to scuffing for proportional loading tests.

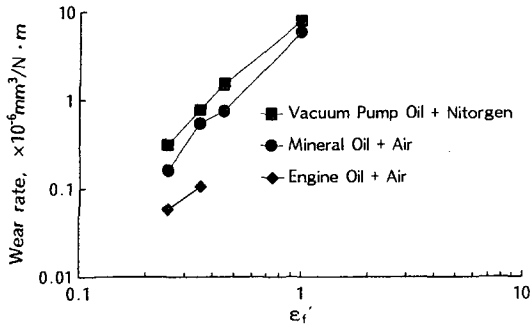


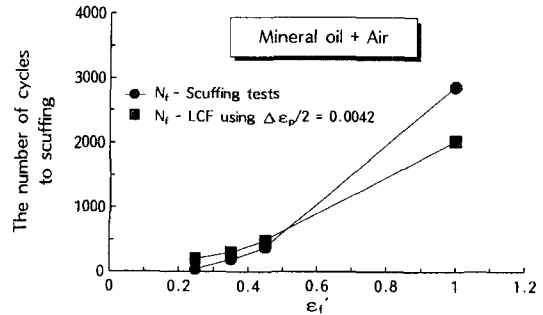
Fig. 10. Correlation between fatigue ductility coefficient and wear rate for proportional loading tests.

저주기 피로수명과 스키핑 수명과의 관계로 나타낼 수 있다. 저주기피로에서 Manson과 Hirschberg가 제안한 Strain-life를 이용하여 일정한 소성변형량일 때의 피로수명은 다음과 같다[16].

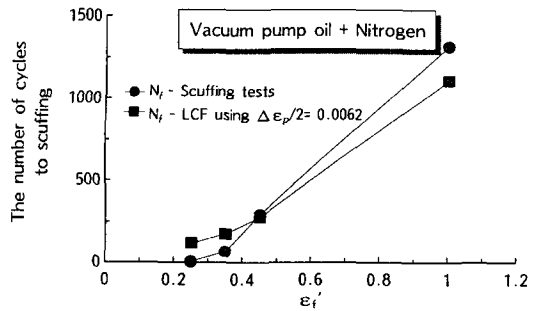
$$N_f = \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{\Delta \epsilon_p}{2 \epsilon_f'} \right)^{\frac{1}{c}}$$

위의 식에 스키핑 실험에서 재료표면이 받는 $\Delta \epsilon_p/2$ 를 대입하여 계산된 저주기피로수명을 스키핑수명과 비교하면, 스키핑과 저주기피로와의 상관관계를 찾을 수 있다. Fig. 11(a)는 공기중의 광유일 경우 $\Delta \epsilon_p/2=0.0042$ 로 가정하여 계산된 저주기피로 수명과 실험에서 얻어진 스키핑수명이 나타나 있으며, 질소분위기의 진공펌프유일 경우 $\Delta \epsilon_p/2=0.0062$ 로 가정하여 계산된 저주기피로수명과 실험에서 얻어진 스키핑 수명이 Fig. 11(b)에 나타났다. 그리고 공기중의 엔진기유의 경우는 수명이 매우 길어 충분한 자료를 얻지는 못하였지만, 대략 $\Delta \epsilon_p/2=0.00092$ 일 때 피로수명과 스키핑 수명이 비슷한 관계를 갖는다. Fig. 11과 같이 윤활 환경에 상관없이 저주기 피로수명과 스키핑 수명과는 유사한 상관관계를 보여주고 있다. 그리고 각 윤활 환경에서 경도가 낮아 질 수록 일정한 소성변형량을 가정한 저주기 피로수명보다 스키핑 수명이 더 크게 나타나고 있다. 이는 접촉 횟수가 증가할 수록 보호막 형성이 촉진(5~50 Å)되어 더 긴 수명을 나타내기 때문이다.

경도에 비례하는 하중을 준 경우 각 윤활환경에서 마찰계수는 거의 변화가 없으므로 외부에서 가해지는 하중과 마찰력은 거의 유사하다고 볼 수 있다. 이러한 외부하중에 의한 소성변형량과 윤활환경에 따라 모재



(a) Using $\Delta \epsilon_p/2 = 0.0042$ for a mineral oil in air



(b) Using $\Delta \epsilon_p/2 = 0.0062$ for a vacuum pump oil in nitrogen

Fig. 11. Correlation between Nf-LCF and the number of cycles to scuffing for proportional loading tests.

가 실제 받는 소성변형량은 윤활면에 형성되는 보호막의 영향으로 서로 다르다. 각 윤활환경에서의 마멸비를 살펴 볼 때 질소분위기에서의 진공펌프유가 공기중의 광유에 비해 전반적으로 1.7배 수준이며, 그리고 공기중의 엔진기유가 광유에 비해 전반적으로 1/3 정도로 작게 나타났다. 이는 소성변형량의 차이와 매우 유사하다. 윤활환경에 따라 형성된 보호막의 차이를 발생하며, 마멸비가 증가하는 경향은 소성변형량이 증가하는 것과 같은 양상을 나타낸다.

Fig. 12는 접촉 횟수에 따른 윤활면의 표면경도변화

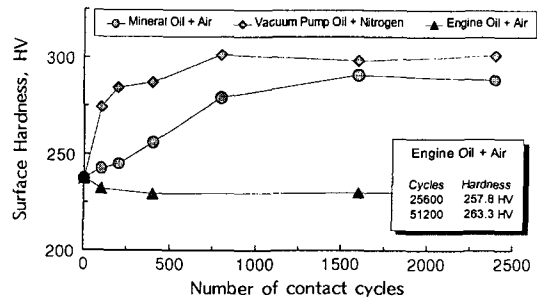


Fig. 12. Surface hardness variation with three lubricated condition.

를 나타낸다. 경도 225 HB(237 HV)인 시편에서 각 윤활환경에 따른 윤활면의 소성변형으로 인한 표면경도 변화(압입하중 50 g)를 보면, 질소분위기의 진공펌프 유가 가장 큰 경도증가를 나타내며, 광유의 경우는 점진적인 증가를 나타내는 반면, 공기 중의 엔진기유는 경도증가가 거의 없었다.

4. 결 론

본 연구에서는 AISI 1045강을 열처리하여 여러 윤활환경에서 스키핑 실험을 통해 스키핑과 저주기피로와의 관계를 찾아보았다.

1. 일정하중 실험에서 경도가 큰 시편이 상대적으로 작은 소성변형량을 받으며, 경도가 증가함에 따라 스키핑 수명은 증가하며 마멸비는 감소한다. 외부적으로 같은 크기의 하중을 가할 경우 경도가 증가할수록 스키핑저항성과 마멸저항성은 동시에 증가한다.

2. 같은 소성변형량을 발생시키는 비례하중 실험에서 경도가 작은 시편이 파괴연성(Fracture ductility)이 크기 때문에 스키핑수명이 크며, 마멸비는 Archard의 관계와 같이 경도에 반비례하게 나타났다. 외부적으로 같은 소성변형량을 받을 경우 경도가 증가할수록 스키핑 저항성은 낮아지며 마멸저항성은 증가한다.

3. 스키핑 수명은 파괴연성계수(ϵ_f : fatigue ductility coefficient)가 증가함에 따라 스키핑 수명은 증가하며, 윤활조건에 관계없이 일정소성변형률일 경우의 저주기피로 수명과 스키핑 수명사이에는 유사한 상관관계를 나타내고 있다.

4. 경도에 비례하는 하중과 세 가지 윤활유를 사용하여, 외부하중 조건은 유사하였지만 각기 다른 윤활환경에서 스키핑 수명까지의 서로 다른 소성변형량을 구하였다. 질소분위기에서 진공유를 사용한 결과 소성변형량은 0.0062 이었고, 공기 중에서 광유를 사용한 경우에는 0.0042, 엔진기유를 사용하여 0.00092의 값을 얻었다. 이는 윤활 표면이 실제로 감당하는 하중이 외부에서 가해지는 하중과 관계없이 윤활환경에 따라 달라지며, 각 소성변형량은 윤활조건을 정량화 하는데 매우 유용한 지표다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 산하 성균관대 산업설비

안전성평가 연구센터의 지원으로 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

1. Ludema, K. C., "A Review of Scuffing and Running-in of Lubricated Surfaces with Asperities and Oxides in Perspective," *Wear*, Vol. 100, pp. 315-331, 1984.
2. Czichos, H. and Kirschke, K., "Investigations into Film Failure (Transition Point) of Lubricated Concentrated Contacts," *Wear*, Vol. 22, pp. 321-336, 1972.
3. Lossie, C. M., Mens, J. W. M. and de Gee, A. W. J., "Practical Applications of the IRG Transition Diagram Technique," *Wear*, Vol. 129, pp. 173-182, 1989.
4. Neale, M. J., "Piston Ring Scuffing-A Board Survey of Problems and Practice," *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol. 185, pp. 21-32, (1970-1971).
5. Scott, D., Smith, A. I., Tait, J. and Tremain, G. R., "Materials and Metallurgical Aspects of Piston Ring Scuffing-A Literature Survey," *Wear*, Vol. 33, pp. 293-315, 1975.
6. Ting, L. L., "Lubricated Piston Rings and Cylinder Bore Wear," *Wear Control Hand-book*, American Society of Mechanical Engineers, pp. 609-665, 1980.
7. Lee, S. C. and Cheng, H. S., "Scuffing Theory Modeling and Experimental Correlations," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 113, Apr. pp. 327-334, 1991.
8. Rhatigan, J. L., Johnson, R. R., Dow, T. A., "An Experimental Study of Thermoelastic Effects in Scuffing Failure of Sliding Lubricated Contacts," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 111, Jan. pp. 23-28, 1989.
9. Young-Ze, Lee, Ludema, K. C., "The Effects of Surface Roughening and Protective Film on Scuff Initiation in Boundary Lubrication," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 113, No. 2, pp. 295-302, 1991.
10. Rozeanu, L., "Fatigue Wear as a Rate Process," *Wear*, Vol. 6, pp. 337-340, 1963.
11. Kimura, Y., "An interpretation of Wear as a Fatigue Process," *Proc. JSLE-ASME Int. Lub. Conf. Tokyo*, p. 67, 1975.
12. Kapoor, A., "Wear by Plastic Ratchetting," *Wear*, Vol. 212, pp. 119-130, 1997.
13. 좌성훈, "고온 윤활상태에서 형성된 경계막의 특성에 관한 연구," *한국윤활학회*, 제11권, 제2호, pp. 34-43, 1995.
14. 이영제, "이중보호막 모델을 이용한 보호막의 형성과 표면파괴에 관한 연구," *한국윤활학회*, 제8권, 제2호,

- pp. 14-19, 1992.
15. Archard, J. F., "Contact and Rubbing of Flat Surfaces,"
J. Appl. Phys., Vol. 24, p. 981, 1953.
16. Manson, S. S. and Hirschberg, M. H., "Fatigue An In-
terdisciplinary Approach," Syracuse University Press
Syracuse, NY, p. 133, 1964.