

# 접촉조건에 따른 접착형 이황화몰리브덴 피막의 마찰 마모 특성 평가

배 일 · 공호성 · 박영필\*

한국과학기술연구원 트라이볼로지 연구센터

\*연세대학교 기계공학과

## Evaluation of the Tribological Behavior for MoS<sub>2</sub> Bonded Films with Different Contact Geometry

Il Bae, Hosung Kong and Young-Pil Park\*

Tribology Research Center, KIST

\*Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

**Abstract**—The tribological behavior for MoS<sub>2</sub> bonded films is evaluated according to the international standard testing methods, such as ASTM D 2625 (Falex tester) and ASTM D 2714 (LFW-1 tester). It has been well known that the tribological behavior for MoS<sub>2</sub> bonded films is affected by several factors. However, in this work, the wear life for MoS<sub>2</sub> bonded films is mainly experimentally measured with different contact geometry, and evaluated in terms of the frictional heating according to the contact geometry of tribotester. The test results show that the wear life of MoS<sub>2</sub> bonded films is significantly affected not only by the frictional heating, but also by the contact pressure, test running-in conditions, and the contact conformity.

**Key words**—friction, wear, MoS<sub>2</sub> bonded film, wear life.

### 1. 서 론

고체윤활 피막은 자기 윤활성이 우수한 고체 입자들을 적절한 폴리머 결합제에 분산시켜서 재료 표면에 도포하는 건식 윤활제로서, 오일이나 그리스 등의 윤활제를 적용하기 어렵거나 우주 항공과 같은 특수한 환경하에서 마찰을 줄이고 내마모성을 향상시키기 위해 사용되는 윤활 방법이다. 현재까지 개발되어 사용되고 있는 고체윤활제들로는 PTFE(polytetrafluoroethylene)로 대표되는 유기물질과, 그래파이트, 이황화몰리브덴(MoS<sub>2</sub>)으로 대표되는 무기계 물질들로 크게 나누어 볼 수 있으며, 특히 하중 지지 능력과 윤활성을 동시에 갖춘 MoS<sub>2</sub>에 대한 연구 및 산업계 적용이 활발히 진행되고 있다[1-4].

피막 접착형 MoS<sub>2</sub> 윤활제의 마찰 마모 특성은 피막 내에 첨가된 MoS<sub>2</sub> 입자 및 수지의 종류, 고체윤활 입자의 크기 및 순도, 배합 비율 등에 영향을 받게 되며,

피막 내에 소량으로 첨가되는 보조 첨가제들에 의해서도 특성상의 변화를 보일 수 있다는 사실이 보고되었다[4]. 그러나 이러한 구성 성분 변화에 따른 단순한 요인만으로는 접착형 MoS<sub>2</sub> 피막을 실제 기계요소에 효과적으로 적용하기에는 불충분하다. 이는 적용 대상인 기계요소들의 기구학적, 역학적 특성들이 각기 상이하며, 특히 상대 운동하는 접촉 표면의 형상과 이때 수반되는 접촉 표면에서의 열적, 화학적 현상에 따라 그 윤활 성능 및 내구수명 특성이 커다란 차이를 보일 수 있기 때문이라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 고체윤활제로서 대표적으로 알려져 있는 이황화몰리브덴을 수지형 바인더에 혼합한 접착형 이황화몰리브덴 피막을 연구 대상으로 하여, 서로 상이한 접촉 조건을 지니고 있는 Falex 시험기(Pin-on-Vee Block)와 LFW-1(Block-on-Ring) 시험기를 이용하고 각 시험기 조건하에서의 시험 접촉 압력, 미끄럼 속도 등의 접촉 조건 변화에 따른 접착형

MoS<sub>2</sub> 피막의 마찰 마모 특성 변화를 파악하고자 하였다.

## 2. 실험 방법 및 실험 조건

### 2-1. 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 접촉 조건에 따른 접착형 이황화몰리브덴 피막의 마찰 마모 특성을 파악하고자 ASTM D 2714에 규정된 Block-on-Ring 형태의 LFW-1 시험기와 ASTM D 2625에 규정된 Pin-on-Vee Block 형태의 Falex 시험기를 각각 사용하였으며[5,6], LFW-1 시험기와 Falex 시험기를 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다.

LFW-1 시험기는 Fig. 1에 보는 바와 같이, 추 하중의 30배가 고정된 Block에 수직 하중으로 전달되며 회전하는 원통형의 Ring 표면에 작용된다. 마찰력은 Ring과 Block의 접촉 접선 방향에 평행한 곳에 위치한 스트레인 게이지형 Load cell에 전달되고 상기 출력 신호를 증폭기로 증폭한 후에 A/D board를 통해 PC에 저장하여 측정하였다. 그리고 LFW-1 시험기의 내구수명 실험은 ASTM D 2714에 규정된 방법에 의하여 실험을 행하였으며, 상기 규정에 의한 피막 파괴의 판단 기준은 마찰계수가 0.1 이상인 경우로 규정되어 있다.

Falex 시험기는 Fig. 2에 보는 바와 같으며, 고정된 Vee block에 하중이 가해지며 원통형의 Pin이 Vee block과 접촉하며 회전한다. Falex 시험기에서 마찰력의 측정은 마찰력을 토크로 변환하여 아날로그 토크 오크 게이지로 측정한 후 측정된 토크를 마찰력으로 환산하여 측정하였다. 그리고 Falex 시험기의 내구수명 실험은 ASTM D 2625에 규정된 방법에 의해 실험을 행하였으며, 상기 규정에 의거한 피막 파괴의 판

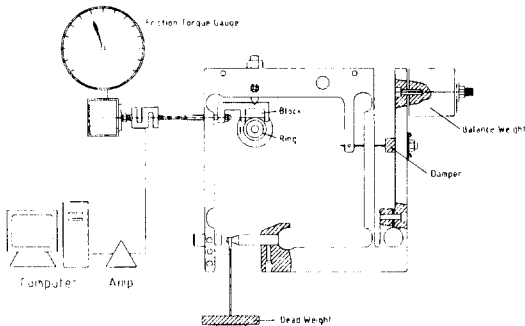


Fig. 1. A schematic view of a LFW-1 tester.

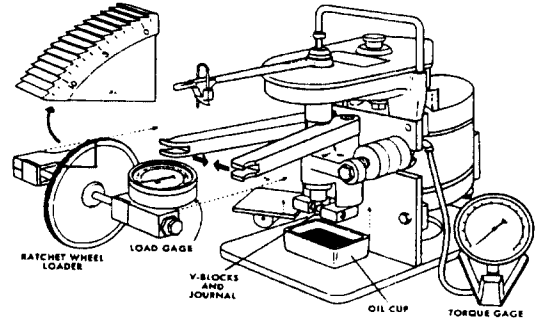


Fig. 2. A schematic view of a Falex tester.

단 기준으로는 마찰 토크 값이 1.1 N·m 이상 증가하는 경우로 규정되어 있다. 시험중 표면온도의 측정은 비접촉식 적외선 온도계를 이용하여 측정하였으며, 온도의 측정부위는 LFW-1 시험의 경우 block의 중앙 접촉부위로부터 약 0.2 mm 떨어진 곳이며, Falex 시험의 경우 핀 표면 부위이다.

### 2-2. 실험 시편 및 실험 조건

LFW-1 시험기와 Falex 시험기에 사용된 시편의 물성치, 표면 전처리 조건에 관한 사항을 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

코팅은 코팅하고자 하는 모재를 평균 120 메쉬 크기의 알루미나 입자를 사용하여 샌드-블라스트 처리를 행한 후 표면 거칠기는 0.9-1.1 μm(Ra) 정도이며, 코팅액에 담금(dipping)으로써 행하였다. 코팅 후 상

Table 1. The mechanical properties of specimens used for LFW-1 tester

LFW-1 tester	Ring	Block
Material type	AISI 52100	AISI 52100
Hardness (HRC)	58-63	58-63
Size, mm	34.98 (O.D.)	6.35 (W)
Roughness (Ra) after Sand-blast	0.9-1.1	No sand-blasting 0.3

Table 2. The mechanical properties of specimens used for Falex tester

Falex tester	Pin	V-block
Material type	AISI 4130	AISI 4130
Hardness	87-91 (HRb)	20-24 (HRC)
Size, mm	6.35 (O.D.)	V-notch : 96.1°
Roughness (Ra) after Sand-blast	0.9-1.1	0.9-1.1

온하에서 최소 2시간 정도 이상 건조시킴으로서 코팅된 부위외의 솔벤트를 충분히 제거시킨 후 열경화(Heat curing)하였다. 코팅 후 피막의 두께는 Micrometer로 측정하였으며, 이때 코팅 두께의 일관성을 유지하기 위해 코팅 전과 후의 모재의 무게 차이가 20-30 mg일 때 즉 코팅 두께가 10-20  $\mu\text{m}$  정도가 유지 되도록 하였다. 그리고 선행 연구자들[4]에 의해 ASTM D 2625와 ASTM D 2714에 의한 실험 결과, LFW-1 시험기에서 우수한 내구수명을 갖는 반면에 Falex 시험기에서는 내구수명의 결과가 그렇지 않은 윤활제 시료 A와 B, 그리고 Falex 시험기에서는 우수한 내구수명을 갖는 반면 LFW-1 시험기에서 내구수명의 결과가 그렇지 않은 윤활제 시료 C를 본 연구의 시험 대상 시료로 선정하였고 각 시료의 조성은 Table 3에 나타내었다. 고체윤활제와 수지의 질량비를 살펴 보면 시료 A, B는 시료 C의 경우에 비해 상대적으로 수지의 비가 많다.

마찰열의 발생 정도가 상이하게 다른 두 시험기에 대해 마찰열의 관점에서 두 접촉 조건에 따른 접촉형 이황화몰리브덴 피막의 마찰 마모 특성을 파악하기 위해 실험 조건을 변화시켰다. 두 시험기의 마찰열의 발생 정도가 서로 유사하게 되는 조건을 이론적으로 예측하기 위해 Ashby[7-10] 등에 의해 연구 개발된 온도예측 모델과 소프트웨어인 T-MAPS version 4.0을 기본으로 하여, 본 연구에서 이용한 LFW-1 시험기에 대한 온도 모델은 Ashby 등에 의해 제안된 Pin-on-Disk 형태의 온도모델을 사용하여 온도 예측을 행하였으며, Falex 시험기에 대한 온도 모델은 Ashby 등에 의해 제안된 Four-Ball 시험기의 모델과 유사한 방법으로 모델링을 행한 후 T-MAPS version 4.0을 모델식에 맞추어 추가 및 수정하여 시험 조건에 따른 온도 예측을 행하였다[11]. T-MAPS를 이용한 온도 예측에 있어서 가장 중요한 요소는 상대 접촉하는 두 물체들의 기계적, 열적 물성 값을 정확하게 사용하는 일이라 할 수 있다. 본 연구에서 사용한 윤활제 시료 A인 접

**Table 3. The composition of the tested MoS<sub>2</sub> bonded film lubricants**

Sample name	Composition (weight %)
A	MoS <sub>2</sub> , Graphite+Epoxy resin (40%)
B	MoS <sub>2</sub> +Organic resin (40%)
C	MoS <sub>2</sub> , Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Organic resin (25%)

**Table 4. The standard test results for LFW-1 life test and Falex life test**

	Mean Pressure, MPa	Avg. Friction Coefficient	Avg. Temp., °C	Nominal contact radius, mm
LFW-1 test	170	0.034	53	2.0
Falex test	170	0.019	93	2.0

착형 이황화몰리브덴 피막의 경도를 실제로 측정된 결과 평균 280 MPa 정도로 측정되었다. 접촉형 이황화몰리브덴 피막은 다공성(porosity)이 있기 때문에 피막 자체의 밀도 값을 직접적으로 측정하기는 곤란하여, MoS<sub>2</sub> 입자의 밀도와 Epoxy 수지의 밀도를 구한 후, 각각의 중량 비를 이들의 가중치로 하여 선형적으로 구하였다. 그 외의 기계적, 열적 물성 값들은 측정하기가 거의 불가능하여, 이들 각각의 알려진 두 개의 물성치를 기준으로 하고 일차적으로 그 값들을 가정한 후에 두 시험기에서의 표준 실험 결과(Table 4 참조)들과 상호 비교하였다. 상기 비교 결과 후에 이론적 온도 계산과 실험 결과의 차이가 많을 경우에는 재료 물성값들을 이차적으로 수정하는 방법을 사용하였다. 상기의 결과로서 온도 예측시 사용된 물성치들을 Table 5에 나타내었다.

Table 5에서와 같이 유추된 이황화몰리브덴 피막의 기계적 물성 값들을 사용하여 LFW-1 표준 시험 시의 표면 온도(bulk temperature)를 예측한 결과를 Fig. 3에, Falex 표준 시험 시의 표면 온도를 예측한 결과를 Fig. 4에 각각 나타내었으며, 실선은 표면온도, 점선은 실제 접촉 부위에서의 온도(flash temperature)이다.

Fig. 3에 표기된 기호(▲)는 ASTM D 2714에 규정된 LFW-1 표준 시험 조건하에서 피막의 내구수명 시험을 행한 후 얻어진 시험 후의 접촉 압력(170 MPa)

**Table 5. Material properties of MoS<sub>2</sub> powder, Epoxy resin and MoS<sub>2</sub> bonded film**

Material Properties	Epoxy resin	MoS <sub>2</sub> Powder	MoS <sub>2</sub> bonded film
Hardness, MPa	200	314	280**
Solid density, kg/m <sup>3</sup>	1200	4800	2640*
Melting Point (Glass temperature), K	(420)		2648
Thermal Conductivity, W/mK	0.30	0.13	0.29
Thermal capacity, J/kgK	1800		6000***

\*Assumed data, \*\*Measured data, \*\*\*Calibrated data

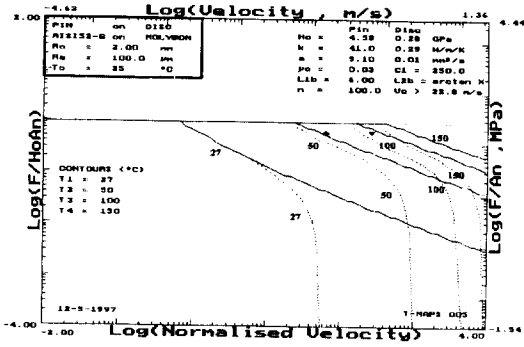


Fig. 3. T-MAPS results for LFW-1 test (▲: velocity 0.132 m/s, pressure 170 MPa; ▼: velocity 0.560 m/s and pressure 170 MPa).

과 미끄럼 속도(0.132 m/s)에 해당하는 지점으로서 대략적으로 표면 온도가 약 50-55°C 정도임을 보여 주고 있다. 상기의 예측 결과는 Table 4에서 실제적으로 측정된 온도 측정 결과와 매우 근접한 결과임을 보여 주고 있다. 그리고 Fig. 4에 표기된 기호(▼)는 ASTM D 2625에 규정된 Falex 표준 시험 조건하에서 피막의 내구수명 시험을 행한 후 얻어진 시험 후의 접촉 압력 (170 MPa)과 미끄럼 속도(0.096 m/s)에 해당하는 지점으로서 대략적으로 표면 온도가 약 93°C 정도임을 보여 주고 있다. 역시 이론적 예측 결과와 측정 결과가 매우 근접함을 알 수 있어서 유추된 이황화몰리브덴 피막의 기계적, 열적 물성 값들을 이용한 온도 예측 결과들이 매우 합리적으로 되었음을 확인할 수 있었다.

Fig. 3에 나타난 온도예측 결과에서 표기된 기호(▼)는 LFW-1 시험 시에 같은 접촉 압력을 유지한 상

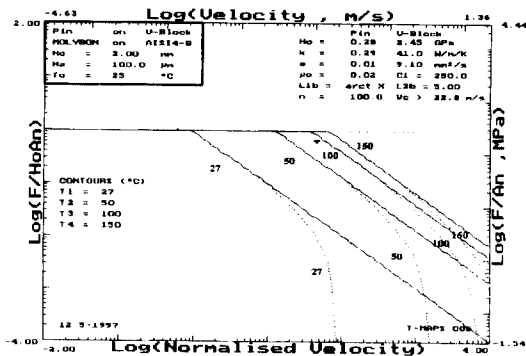


Fig. 4. T-MAPS results for Falex test (▼: velocity 0.096 m/s and pressure 170 MPa).

태에서 미끄럼 속도가 약 0.60 m/s 정도가 되면 표면 온도가 Falex 표준 시험에서와 같이 93°C 정도가 됨을 예측할 수 있다. 실제적으로 LFW-1 시험 시 미끄럼 속도를 0.132 m/s인 표준 시험 조건에서 0.560 m/s (306 rpm)로 증가시킨 결과 마찰열의 증가로 인하여 표면 온도가 90-95°C 정도임을 확인할 수 있었다. 그래서 LFW-1 시험기에서의 미끄럼 속도는 0.132 m/s, 0.362 m/s, 0.560 m/s로 선정하여 실험을 행하였으며, 하중은 1210 N, 1980 N, 2800 N으로 선정하여 실험을 행하였다.

### 3. 실험 결과

동일한 윤활제 시료들에 대하여 ASTM D 2714와 ASTM D 2625에 규정된 실험 방법에 따른 내구수명 실험 결과 전체적으로 수지의 함량이 많은 윤활제 시료가 수지함량이 적은 것에 비해 LFW-1 실험에서 내구수명이 우수한 반면 Falex 실험에서는 수지의 함량이 적은 윤활제 시료가 수지함량이 많은 것에 비해 내구수명이 우수하며, 이와 같은 결과는 고체 피막 윤활제가 두 시험기에 따라 가장 우수한 내구수명 결과를 가질 수 있는 고체윤활제와 바인더 시료의 최적의 조성점이 서로 다르다는 연구 결과가 보고된 바 있다[4]. 고체 피막 윤활제가 이와 같이 두 시험기에서 내구수명 결과가 서로 다르게 나타나는 본질적인 이유는 고체윤활제와 바인더 성분의 구성비를 포함해서 접촉메카니즘, 길들이기 정도, 마찰열에 의한 온도 영향 등 여러가지를 예측할 수 있었으며, 이에 관하여 다음과 같은 실험을 통해 그 영향들을 살펴 보았다.

#### 3-1. Falex 시험기와 LFW-1 시험기의 표준 내구수명 실험 결과

시료 A, B, C에 대하여 ASTM D 2714와 ASTM D 2625에 규정된 실험 방법에 따른 내구수명 실험 결과를 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 LFW-1 시험기에서는 시료 B, A, C의 순으로 시료 B의 내구수명이 가장 우수한 반면, Falex 시험기에서는 시료 C, A, B의 순으로 시료 C의 내구수명이 가장 우수하게 나타났다.

일반적으로 Falex 시험에서의 접착형 이황화몰리브덴 피막의 파괴는 MoS<sub>2</sub> 입자의 산화 현상에 기인되는 것으로 알려져 있으며[1], 이황화몰리브덴 피막의 산

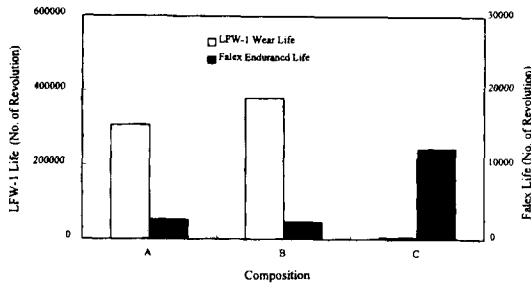


Fig. 5. Falex and LFW-1 life test results of composition A, B, C lubricant according to ASTM D 2625 and ASTM D 2714.

화는 약 80°C 이상의 온도에서부터 발생한다고 보고된 바 있다[11]. Table 4에 나타난 바와 같이 ASTM D 2714에 의거한 LFW-1 내구수명 실험 결과에서는 접촉면 전반에 걸친 평균온도(bulk temperature)가 55°C 이하이므로 본 연구에서는 상기 실험 후 표면 분석을 행하지 않은 반면 접촉면 전반에 걸친 평균 온도가 80°C 이상으로 측정된 Falex 내구수명 실험 후에는 접촉형 이황화몰리브덴 피막의 산화 여부를 파악하고자 핀 표면의 상태 분석을 행하였다. 표면 분석 방법은 금속의 표면 상태나 부식 상태, 오염 물질 및 표면 흡착 가스 등의 파악이 가능한 분석 방법인 XPS 분석법을 이용하였으며, 그 원리는 일반적으로 원자의 화학 결합 상태에 따라 결합 에너지에 차이가 존재하는데, XPS 분석 방법은 이러한 결합 에너지를 파악함으로써 표면의 상태 분석을 가능하게 한다. MoS<sub>2</sub>의 결합 에너지는 228.8 eV, Mo의 결합 에너지는 227 eV, MoO<sub>3</sub>의 결합 에너지는 232.5 eV 정도로 알려져 있으며, intensity가 높은 지점에서의 결합 에너지를 파악함으로써 표면의 상태 분석을 할 수 있다. Fig. 6은 분석 결과로서, 이 그림에서 X축은 결합 에너지(eV)이며, Y축은 intensity로써 그림에 나타난 바와 같이 intensity가

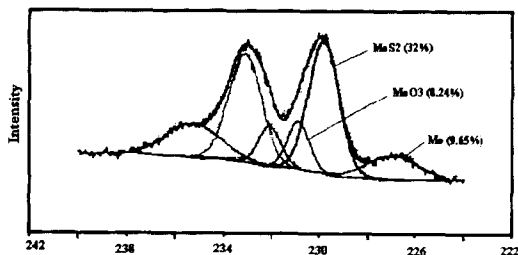


Fig. 6. XPS spectra of a Falex pin surface after the endurance life test according to ASTM D 2625.



Fig. 7. An optical microscopic view showing a worn surface for a Falex test.

큰 지점의 결합 에너지는 상태 분석의 결과, MoS<sub>2</sub> 물질이 약 32%, Mo가 9.65%, MoO<sub>3</sub>가 약 8.24% 정도가 검출되었다. 이러한 결과는 이황화몰리브덴 입자가 고온 산화되어 표면 위에 산화물인 MoO<sub>3</sub>가 일부 형성되었음을 보여주고 있다. XPS 분석을 통해 MoS<sub>2</sub> 입자들이 산화됨에 따라서 MoO<sub>3</sub>가 형성되었음을 알 수 있었으며, 이러한 MoO<sub>3</sub>의 형성에 의해 피막의 취성이 강하게 되어 그로 인해 피막의 운환성을 급속하게 감소시키며, 피막이 쉽게 부서러지게 되어 마모가 급속하게 진행되면서 피막의 파괴가 발생하였다. 실험 후 핀 표면부위를 광학 현미경으로 관찰한 결과 Fig. 7에 보는 바와 같이 피막에 크랙이 발생하였음을 살펴볼 수 있었으며, Fig. 8에 나타난 바와 같이 피막에 크랙이 진전된 후 마모되었음을 관찰할 수 있었다.

반면 LFW-1 표준 시험 후 링 표면을 관찰한 결과 선행 연구자들의 결과와 동일하게 피로 마모에 의해 피막의 파괴가 발생하였음을 살펴볼 수 있었다[4].



Fig. 8. A SEM micrograph of film surface after failure from a LFW-1 test.

**3-2. 미끄럼 속도 및 하중 변화에 따른 LFW-1 시험 결과**

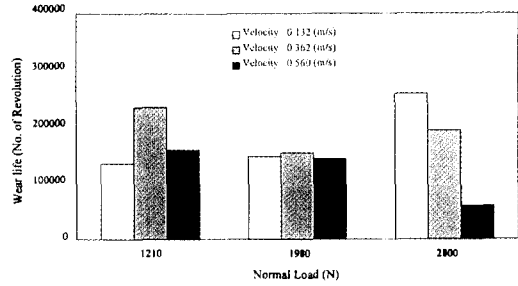
Table 6에 시료 A의 내구수명 실험 결과, 마찰계수와 마찰 온도의 결과에서처럼 수직 하중이 각각 1210 N, 1980 N, 2800 N인 경우, 속도 증가에 따라 접촉형 이황화몰리브덴 피막의 마찰계수는 감소하며, 블록의 평균 온도는 증가하는 것을 살펴볼 수 있다. 이러한 결과는 실제 피막 표면 주변의 습도가 낮아짐으로써 마찰계수가 감소한 효과로 사료된다. 이 결과는 Barry 등의 연구 결과와 동일하며 특히 속도가 증가하는 경우 측정된 블록의 표면 온도가 증가함을 볼 수 있다 [13]. 속도 변화에 따른 피막의 마찰 거동은 저하중 (1210 N) 조건하에서 속도 증가에 따라 크게 감소하는 특성을 보였으며, 고하중(2800 N)인 경우에는 속도가 0.132 m/s에서 0.560 m/s로 증가함에 따라 마찰계수는 일정한 값을 가지지만 온도는 45°C에서 93°C로 크게 증가함을 알 수 있었다. 시료 A에 대한 속도 변화에 따른 내구수명 결과는 Fig. 9에 나타난 바와 같이 저하중(1210 N)인 경우 속도 0.132 m/s에서 0.362 m/s로 증가하는 경우 마찰계수는 크게 감소하며 내구수명은 크게 증가하였으나, 고하중(2800 N)인 경우 속도 0.132 m/s에서 0.560 m/s로 증가하는 경우 내구수명이 회전수 258030에서 58930으로 급격하게 감소하며, 아울러 마찰 온도가 44.9°C에서 92.8°C로 높아짐을 살펴볼 수 있다. 이는 마찰열의 발생에 의해 내구수명이 크게 감소한 것임을 알 수 있다.

Table 6에 나타난 바와 같이 속도 0.132 m/s인 경우 하중 증가에 따라 마찰계수는 0.082에서 0.040으로 크게 감소한 반면 속도 0.362, 0.560 m/s인 경우 하중 증

**Table 6. The frictional characteristics of composition A lubricant according to the various ranges of velocity and normal load for LFW-1 tester**

Velocity, m/s	Normal load, N	Avg. friction coefficient	Avg. Temp., °C	Wear Life (No. of Rev.)
0.132*	1210	0.082	45.9	133890
	1980	0.039	43.8	146330
	2800*	0.040	44.9	258030
0.362	1210	0.048	63.5	234240
	1980	0.039	68.7	153260
0.560	1210	0.046	75.8	158160
	1980	0.039	78.1	64560
	2800	0.040	92.8	58930

\*LFW-1 wear life test according to ASTM D 2714

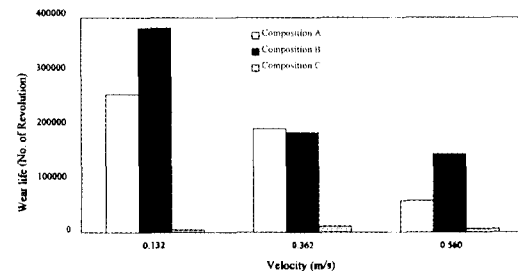


**Fig. 9. Wear life results of composition A lubricant with the sliding velocity for a LFW-1 test.**

가에 따라 마찰계수가 약간씩 감소함을 볼 수 있다. 이는 하중 증가에 따른 마찰계수의 감소는 피막의 배열이 하중 증가에 따라 미끄러지기 쉽도록 배열되어 있기 때문으로 사료된다. 하중 변화에 따른 시료 A의 내구수명은 저속도(0.132 m/s)인 경우 하중이 증가함에 따라 내구수명이 오히려 증가하는 것은, 하중이 증가함에 따라 마찰계수가 감소한 결과에 기인된 것으로 사료된다. 그러나, 고속도(0.560 m/s)인 경우 하중 증가에 따른 내구수명은 저하중(1210 N)인 경우 회전수 158000에서 고하중(2800 N)인 경우에 58930 정도로 크게 감소하였다.

Falex 시험기와 LFW-1 시험기에서의 마찰열의 발생 정도가 유사하게 되는 실험 조건(하중 2800 N, 속도 0.560 m/s)하에서 시료 A, B, C에 대한 내구수명 실험 결과는 Fig. 10에 나타난 바와 같이 내구수명은 시료 B, A, C의 순으로 시료 B의 내구수명이 가장 우수하였다.

상기의 결과들을 통해 LFW-1 시험기에서 마찰열의 발생 정도가 접촉형 이황화몰리브덴 피막의 내구수명에 미치는 영향을 살펴본 결과, 시료 A에 대해 마찰열의 발생 정도가 증가하는 경우 즉 Table 6에 나타난



**Fig. 10. The wear life test results at the normal load 2800 N with the sliding velocity for a LFW-1 test.**

바와 같이 고하중(2800 N)인 경우 속도증가에 따라 내구수명이 크게 감소함을 알 수 있었으나, Falex 시험기에서와 유사한 마찰열을 발생하는 LFW-1 시험기에 대한 시험조건(수직하중 2800 N, 속도 0.560 m/s)하에서 시료 A, B, C에 대해 내구수명 실험을 행한 결과, Falex 표준 시험방법에 의거한 내구수명 결과의 순위와 일치하지 않았다.

### 3-3. 접촉 압력 변화에 따른 LFW-1 시험 결과

Hertz 이론[14]에 의해 Falex 시험기의 표준 실험 조건하에서의 최대 접촉 압력은 1460 MPa 정도이며 LFW-1 시험기의 표준 실험 조건하의 최대 접촉 압력은 950 MPa 정도로서, ASTM에 규정된 두 표준 실험 방법의 경우 Falex 실험기의 경우가 더 높은 접촉 압력을 갖는데, 이와 같이 두 시험기에서의 접촉 압력의 차이가 피막의 마찰 특성 및 내구수명에 미치는 영향을 살펴보기 위해 Falex 시험기와의 접촉 압력이 동일하게 되도록 LFW-1 시험편의 폭 길이가 2.68 mm 되도록 가공하여 추가적인 실험을 행하였다.

시료 B에 대해 하중 2800 N인 경우, 비표준 블록시편의 경우 속도 변화에 따른 내구수명 실험 결과는 Fig. 11에서 처럼 비표준 블록에 대한 내구수명 실험 결과 마찰계수는 상대적으로 감소하고, 마찰 온도도 표준 블록의 경우보다 다소 낮다는 점을 알 수 있으며, Fig. 12에 나타난 바와 같이 표준 블록의 실험 결과에 비하여 비표준 블록의 경우에서의 피막의 내구수명이 크게 감소함을 볼 수 있다.

비표준 블록 시편의 경우에 높아진 접촉 압력 조건에 의하여 피막의 마찰계수가 상대적으로 감소하는 현상은 그동안의 실험 결과들을 감안해 볼 때 예측 가능한 결과이었으나, 내구수명이 감소되는 결과는 예

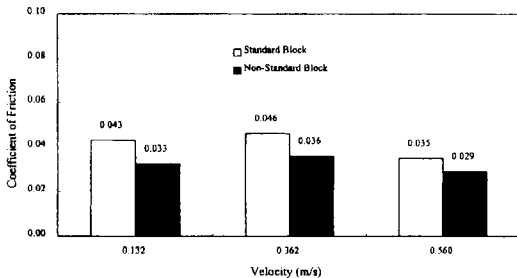


Fig. 11. Friction coefficient of both standard block and non-standard block specimens of LFW-1 test (the block width of non-standard specimen is 2.68 mm).

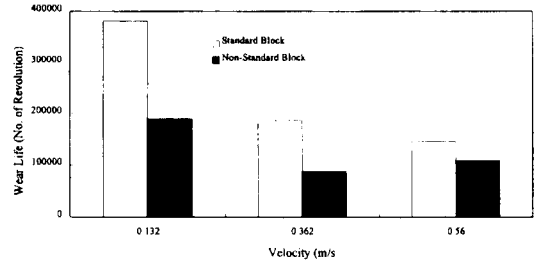


Fig. 12. Wear life results of both standard block and non-standard block specimens of LFW-1 test.

상치 못했던 것이었다. 실험 후 파손된 링 표면을 관찰한 결과, 접촉면의 폭이 상대적으로 좁은 비표준 시편의 실험시 블록의 양 경계면과 접촉한 부분의 링 표면의 피막이 파손된 현상을 발견할 수 있었는데, 이러한 결과들이 낮은 마찰계수에도 불구하고 피막의 짧은 내구수명 실험 결과를 초래한 것으로 사료된다.

## 4. 결 론

고체윤활제로서 대표적으로 알려져 있는 이황화몰리브덴을 수지형 바인더에 혼합한 접착형 이황화몰리브덴 피막을 연구 대상으로 하여, 서로 상이한 접촉 조건을 지니고 있는 Falex 시험기(Pin-on-Vee Block)와 LFW-1(Block-on-Ring) 시험기를 이용하고 각 시험기 조건하에서의 시험 접촉 압력, 미끄럼 속도 등의 접촉 조건 변화에 따른 접착형 MoS<sub>2</sub> 피막의 마찰 마모 특성 변화를 비교 파악한 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 접착형 이황화몰리브덴 피막의 내구수명을 평가 하도록 규정된 ASTM D 2714(LFW-1 시험기) 및 ASTM D 2625(Falex 시험기) 규격에 의한 시험 결과 각 규격에서 시료들 간의 평가 순위가 서로 상반되게 측정되었다.

2. 접착형 이황화몰리브덴 피막의 내구수명은 접촉 조건 변화에 따라서 고체윤활제와 바인더의 최적 조성 비가 존재하고, 특히 LFW-1 시험에서는 Falex 시험보다 사용된 바인더 성분의 불순에 더 큰 영향을 받는다.

3. 마찰열의 발생이 상대적으로 낮은 LFW-1 표준 시험 방법에서의 접착형 이황화몰리브덴 피막의 마모는 주로 피로 파괴 마모 및 피막 표면의 blistering의 형성 및 파괴에 의하여 발생하나, Falex 시험 방법에서는 높은 마찰열 발생에 의한 피막의 산화에 의하여

피막의 파괴가 발생한다.

4. Falex 시험시 발생하는 마찰열 발생 조건과 유사하게 LFW-1 시험 조건의 미끄럼 속도를 증가하고 접촉 압력을 증가시켜 실험한 결과, Falex 실험시와 유사한 표면 온도가 발생함에도 불구하고 윤활제 시료들 간의 평가순위는 Falex 내구수명 실험 결과와 일치하지 않았다.

5. 접촉형 이황화몰리브덴 피막의 내구수명은 마찰열 조건 외에도 시편 상호간의 부합도의 차이 및 시험 방법에 따른 피막의 길들이기 정도의 차이 등에 의하여 서로 다르게 평가될 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. Francis, J. Clauss, "Solid Lubricants and Self-Lubricating Solids," Academic Press Inc., 1972.
2. 윤의성, 공호성, 한홍구, 오재응, "접착형 MoS<sub>2</sub> 고체 윤활 피막이 코팅된 감속기의 동력전달효율과 소음 특성에 관한 실험적 고찰," 한국윤활학회지, 제12권, 제3호, pp.107-114, 1996.
3. 공호성, 윤의성, 한홍구, 권오관, "고체윤활용 MoS<sub>2</sub> Bonded Film의 마찰마모 특성에 관한 실험적 고찰," 한국윤활학회지, 제12권, 제1호, pp.15-21, 1996.
4. 한홍구, 공호성, 윤의성, 오재응, "미끄럼 운동을 하는 Block-on-Ring 접촉형태에서의 접촉형 MoS<sub>2</sub> 고체 윤활 피막의 마찰마모 특성," 한국윤활학회, 제24회 춘계학술대회, 1996.
5. ASTM D 2714-68, "Calibration and Operation of the

- Alpha Model LFW-1 Friction and Wear testing Machine".
6. ASTM D 2625-69, "Standard Test Method for Endurance(wear) Life and Load-Carrying Capacity of Solid Film Lubricants".
7. Ashby, M. F., Abulawi, J. and Kong, H., "Temperature maps for frictional heating in dry sliding," STLE Tribology Trans., Vol. 34, pp.577-587, 1991.
8. Kong, H. and Ashby, M. F., "Wear mechanisms in brittle solids," Acta Metall. Mater., Vol.40, pp.2907-2920, 1992.
9. Ashby, M. F., Kong, H. and Abulawi, J., T-MAPS User Manual, Version 2.0, Engineering Dept., Cambridge, U.K., 1990.
10. Ashby, M. F., Kong, H. and Abulawi, J., T-MAPS Background Reading, Version 4.0, Engineering Dept., Cambridge, U.K., 1992.
11. 배일, "접촉조건에 따른 접촉형 이황화몰리브덴 피막의 마찰마모 특성평가," 연세대학교 석사학위 논문, 1997.
12. Winer, W. O., "Molybdenum disulfide as a lubricant: a review of the fundamental knowledge," Wear, Vol. 10, pp.422-452, 1967.
13. Barry, H. F., "Factors relating to the performance of MoS<sub>2</sub> as a lubricant," Lubrication engineering, Vol. 33, pp.475-480, 1977.
14. Johnson. K. L., Contact Mechanics, Cambridge University Press, Cambridge, 1987.