

## 고체윤활용 MoS<sub>2</sub> Bonded Film의 마찰마모 특성에 관한 실험적 고찰

공호성 · 윤의성 · 한흥구 · 권오관

한국과학기술연구원 기전연구부

### Experimental Studies on Friction and Wear of the Solid Lubricating MoS<sub>2</sub> Bonded Films

Hosung Kong, Eui-Sung Yoon, Hung-Gu Han and Oh Kwan Kwon

Division of Mechanical Control Systems, KIST

**Abstract**—Friction and wear properties of MoS<sub>2</sub> bonded films were studied using the Falex testing machine, and their properties were evaluated in terms of the life and the load carrying capacity of the films. MoS<sub>2</sub> bonded films were formulated from the mixtures of MoS<sub>2</sub> solid particles and epoxy-phenol resin, and they were applied onto AISI 4130 steel surface by dipping method to form lubricating bonded films. The results of the life and the load carrying capacity of the films showed that films were mainly affected by the surface temperature arisen from the frictional heat at the contact surface. To obtain enhanced tribological properties of the films, various combinations of solid lubricants and additives with a basic polymer resin were attempted and evaluated. The effects of surface pretreatment, such as sand blast or Zn-phosphating, were also investigated.

**Key Words:** Friction, Wear, MoS<sub>2</sub> lubrication, Bonded Films, Falex Test

#### 1. 서 론

고체윤활피막은 일반적으로 유체윤활을 적용하기 어렵거나, 고온, 고진공 등 특수환경에서와 같이 건조윤활이 요구되는 윤활조건에서 적용되는 특수한 윤활 방법이다. 이의 존재와 이용의 역사가 역사적으로 아주 오래된 반면에, 이에 의한 윤활작용을 과학적인 측면에서 연구하고 개량된 모습으로 활용하려 했던 시도들은 근세에 들어서 시작되었음을 알 수 있다[1-2]. 최초의 과학적인 연구는 미국의 Westinghouse Electric Co. (1938)에 의하여 시도되었다고 알려져 있는데, 그들은 진공 내에서 회전하는 Anode X-ray tube의 베어링 표면에서의 효과적인 윤활을 위하여 이황화-몰리브데늄(molybdenum disulfide) 코팅방법을 적용하였다. 현재에 이르기까지 고체윤활제 중에 대표적인 물질로 알려져 있는 이황화-몰리브데늄을 사용하

여 윤활에 적용하는 방법을 개발하는데 가장 커다란 진보를 보인 곳은 미국의 우주항공연구소인 NASA를 들 수 있으며, 이 후 2차세계대전을 전후하여 군사장비와 연관된 산업들과 관련하여 활발하게 연구되었음을 볼 수 있다. 최근에 들어서는 항공산업 및 우주항공산업이외에도 일반 산업기계와 관련된 요소부품들의 극한환경(고진공, 저온/고온, 무윤활)에서의 윤활 방법으로서 많은 연구결과들을 보이고 있다[3-10].

재료표면에 고체윤활피막을 적용하는 방법은 고체윤활제 입자를 용제 내에 분산시켜 사용하거나, 재료표면에 분지름 등의 기계적 힘을 가하는 방법(burnishing), electro-plating, ion plating, sputtering 방법 적용에 의해 sputtered films을 형성시키는 방법, 혹은 그리이스 및 오일 등의 유체윤활유 내에 분산하는 방법과 본 논문의 대상인 Bonded film에 의한 방법들에 의하여 윤활피막을 형성할 수 있다. 상기 방법들의 선

정 및 적용은 기계요소부위의 사용요구조건 및 환경분위기 등에 의해서 선정되는데, 이들 방법 중 Bonded films에 의한 윤활적용방법은 상대적으로 간단하고 경제적으로 우수한 윤활피막을 얻을 수 있는 장점이 있어서, 기어류 및 금형 등 접촉표면의 마찰마모 특성을 증가시키기 위하여 많이 적용되고 있다[11].

Bonded film을 형성시키기 위한 대표적인 고체윤활제들로는 이황화-몰리브데늄, 이황화-텅스텐( $WS_2$ ), 보론-나이트라이드(BN), 흑연(Graphite) 등을 들 수 있으며, 이들 고체윤활제를 표면에 효과적으로 부착시키기 위하여 사용되는 수지류는 페놀 및 에폭시계 수지 등이 사용되고 있다. Bonded film의 마찰마모특성은 이와 같이 피막 내에 첨가된 고체윤활제 및 수지의 종류, 고체윤활 입자들의 크기 및 순도[12-13], 그리고 이들 상호간의 배합비율 등에 의하여 크게 좌우되며, 아울러 피막 내에 소량으로 첨가될 수 있는 여러 가지 보조첨가제들에 의해서도 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다[11]. 고체윤활제 성분들의 조성과 더불어, 재료표면의 물리·화학적 전처리 조건도 매우 중요한 요인이 될 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 윤활피막내 고체윤활제들의 배합, 고체윤활피막의 표면전처리 방법들을 변화하고 이들에 따른 상기 고체윤활피막들의 마찰 및 마모 특성에 관하여 시험을 행하였다.

## 2. 고체윤활피막의 제조 및 적용

고체윤활제 피막을 적용한 시험재료는 Falex 시험기용 [ANSI/ASTM D 2625-69] Pin 및 V-Blocks인 AISI 4130 (SCM 2) 강(steel)들이다. 시험재료는 윤활피막을 코팅하기 전에 N-Hexane 등의 비극성용제들을 사용하여 초음파-세척기에서 표면의 탈지 및 세척을 행하였으며, 이후에 피막과 모재와의 부착력을 증

가시키기 위하여 표면의 전처리 작업을 행하였다. 표면의 전처리는 시험목적에 따라서 샌드-블라스트 및 화학피막처리(chemical conversion) 방법을 선택적으로 적용하였다. 샌드-블라스트는 평균 120 메쉬 크기의 알루미늄 입자를 사용하였으며, 작업 후의 표면거칠기 크기가 약 0.9-1.1  $\mu\text{m}$  정도가 되도록 하였다. 표면의 화학처리는 철강재료 표면들에 일반적으로 적용되는 인산-아연염(zinc-phosphate) 처리를 선정하였으며, 처리공정은 MIL-P-16232 D 방법[14]에 규정된 바에 의하여 행하였다.

Table 1은 본 시험에서 제조한 고체윤활제 시료들의 주요 성분을 나타내고 있다. 고체윤활제는 기본적으로 이황화몰리브데늄 입자, 산화안티몬, 산화납, 보론-나이트라이드 등의 자기윤활효과가 우수한 고체입자들과 에폭시-페놀 복합수지, 그리고 보조 고체윤활제 및 고온 산화안정제, 분산항상제, 수지안정제 등의 기타 첨가제들로서 구성이 되었으며, 이들을 용제에 혼합하고 호모게나이저를 이용하여 용제 내에 균일하게 분포하도록 하였다. 사용된 이황화몰리브데늄 입자는 순도가 98%, 평균입자 크기가 3-6  $\mu\text{m}$  이다. 사용된 용제는 톨루엔, 메틸-에틸-케톤, 에틸-알콜 등을 사용하였다. 윤활제는 고용분(고체윤활제, 수지류 등)과 복합용제의 비가 약 40대 60인 희석된 분산액 상태로 원액을 제조하였으며, 재료표면 위에 적용할 때는 상기 원액을 재차 희석하여 도포되는 피막의 두께를 조절하였다. 재료 표면 위의 윤활제의 도포는 재료를 윤활제액 속에 단순히 침지(dipping)시키는 방법에 의해서 행하였으며, 침지하는 횟수 및 분산액의 희석비를 조절하여 피막의 두께를 조절하였다. 적절한 두께로 윤활막이 도포가 된 시편은 상온의 대기 분위기 내에서 약 2시간 이상 건조한 이후에  $150 \pm 5^\circ\text{C}$ 의 온도 하의 열처리로 내에서 약 2시간 정도 가열하고 서서히 냉각하여 열경화하였다. 열경화 시킨 후에 시

Table 1. Various types of  $MoS_2$  bonded films with different composition

Specimen	Main Composition (Weight Percentage)
1	Epoxy/Phenol Resin(25%)+ $MoS_2$ (75%)
2	Epoxy/Phenol Resin (25%)+Graphite (75%)
3	Epoxy/Phenol Resin (25%)+ $MoS_2$ (55%)+ $Sb_2O_3$ (15%)+Graphite (5%)
4	Epoxy/Phenol Resin (25%)+ $MoS_2$ + $Sb_2O_3$ +Graphite+PbO+Magnesium Phosphate
5	Epoxy/Phenol Resin (25%)+ $MoS_2$ + $Sb_2O_3$ +Graphite+PbO+Magnesium Phosphate+BN
6	Epoxy/Phenol Resin (25%)+ $MoS_2$ + $Sb_2O_3$ +Graphite+PbO+Magnesium Phosphate+BN+Wax+Pb-Naphtenate+Fluoro-Silan

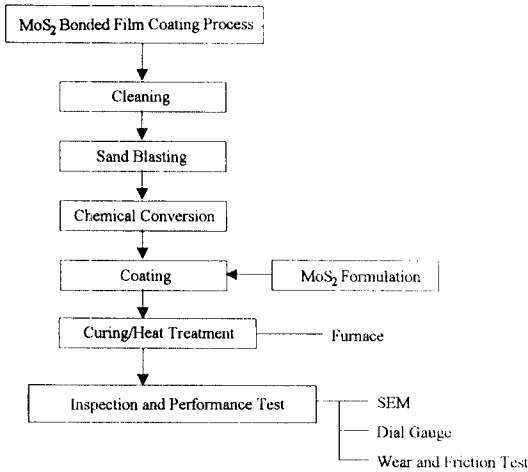


Fig. 1. Overall process for Bonded film coatings.

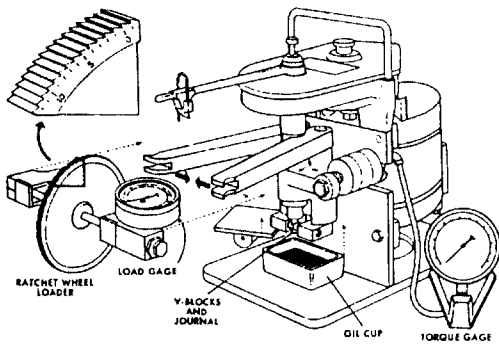


Fig. 2 Falex lubricant testing machine

험평가에 적용된 피막의 두께는 약 10-30 μm 정도로 하였으며, 윤활피막 표면에 어떠한 균열 및 부풀어오름 현상등은 발견할 수 없었다.

피막의 두께는 코팅작업 전에 재료표면 일부에 테이프를 부착하고 코팅 후 이를 제거하여 코팅층의 두께를 측정하였다. Fig. 1은 고체윤활제 Bonded film을 재료표면에 적용하는 전체적인 공정도를 나타내고 있다.

고체윤활피막의 마찰마모시험은 Falex lubricant testing machine (Faville-LeVally Corp. 제작) 을 사용하였다. Falex tester (Fig. 2)는 고체윤활피막의 내하중성 등을 측정하는(ANSI/ASTM D 2625-96) 마찰마모 시험기로서, 기본적으로 실린더형 pin (외경 6.35 mm; 길이 31.75 mm; 열처리된 AISI 4130 steel; 경도 HRB 87-91) 이 하중을 받으며 두개의 Vee-shaped bearing

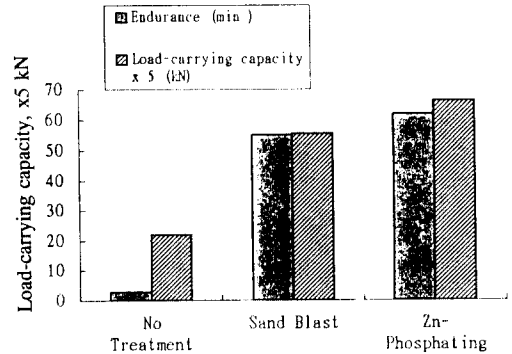


Fig. 3. Falex test results for various surface pre-treatment methods.

blocks (96±1°, 열처리된 AISI 4130 steel; 경도 HRC 20-24) 사이에서 회전하여 미끄럼운동을 하는 형태의 시험기이다. 시험기의 회전속도는 290 rpm으로 접촉면에서의 미끄럼속도는 약 0.1 m/s 이었다. Falex 시험에 사용된 시편들의 표면코팅은 dipping 방법에 의하여 행하였으며, 시험 핀 및 블록표면 양쪽에 약 10-30 μm 두께로 코팅을 행하였다. Seizure의 발생은 시험기의 구동모터가 정지하거나, 혹은 마찰토크의 크기가 1.13 N.m 이상으로 급격하게 상승하는 것을 기준으로 설정하였다[15].

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 Falex 시험기를 사용하여 코팅면의 전처리 조건(Sand Blast, Zn-Phosphating)에 따른 윤활피막의 내구수명(Method A) 및 내하중지지성(Method B)을 측정하여 비교한 결과이다. 시험 및 평가는 ANSI/ASTM D 2625-69 시험평가 방법에 의하여 행하였으며, 전처리는 시험 핀 및 V 블록 표면 양쪽에 모두 행하였다. 사용된 고체윤활제는 Table 1의 시료 1종류의 고체윤활제로서, 시험 핀 및 블록 표면에 윤활피막을 dipping에 의하여 도포하였다. 전처리를 행하지 않은 시편에서는 시험방법의 예비단계에서 모두 Seizure가 발생하였으나, 상호비교를 위하여 내구수명 및 내하중지지성 측정결과를 각각 시험의 예비단계치인 3분 및 1000 lb (453 N)으로 설정하였다. 전처리를 행한 시험에서의 수명 및 극압성 결과들이 전처리를 행하지 않은 것들에 비하여 각각 수배 이상의 증가를 나타내었으며, Zn-Phosphating 전처리만을 행하였을 때의

결과들이 Sand Blast한 결과들에 비하여 상대적으로 향상된 결과를 나타내었다. Sand Blast 전처리(약 1.0  $\mu\text{m}$ )를 행하였을 때는 거칠어진 표면에 의하여 윤활피

막과 시편표면과의 물리적 결합력이 증가한 반면에, 인산염 처리를 행한 전처리에서는 인산염처리에 따른 재료표면의 다공질화(표면조도: 약 0.5  $\mu\text{m}$ ) 및 표면경도의 증가 등 물리적 특성변화 및 윤활제와 모재 사이의 화학적 친화력이 향상된 복합적 효과들의 결과에 의한 것으로 사료된다. Fig. 4는 Sand Blast 전처리된 시험 핀 표면에 코팅된 윤활피막의 단면을 나타내고 있다.

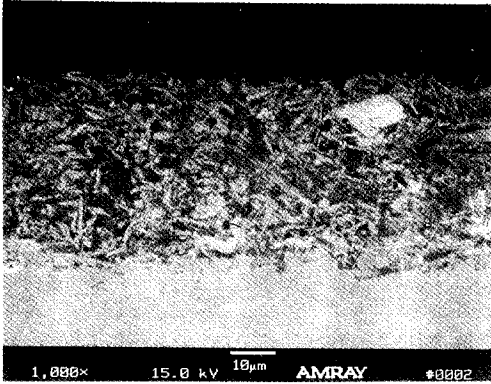


Fig. 4. A SEM micrograph showing a sectional view of resin bonded MoS<sub>2</sub> coated surface.

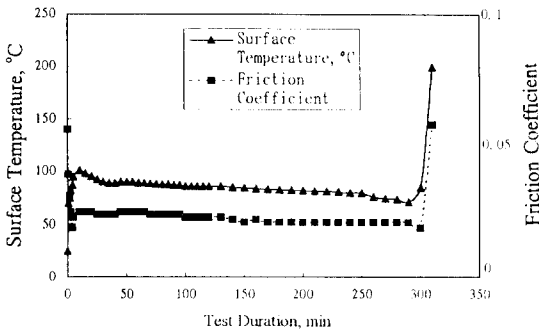


Fig. 5. A Falex test result showing both coefficients of friction and surface temperatures of the test pin surface.

Fig. 5는 도포된 윤활피막의 내구수명 시험결과 (Endurance test)의 한 예로써 시료 6종류의 윤활제를 각기 도포하고 시험시간에 따라 측정된 마찰계수 및 시험 핀 표면에서의 발생온도들의 변화를 나타내고 있다. 시험핀 표면의 온도는 비접촉식 적외선 온도계를 사용하여 측정하였으며[16], 시험 핀 표면의 중앙 부위의 온도를 측정하였다. 고체윤활피막은 초기 단계의 running-in 단계를 거치면서 피막의 외피가 점차 탈착하면서 외부로 방출되었으며, 이에 따라 피막 표면이 광택이 나고 점차 마찰계수가 급격하게 감소됨을 나타내었다. 또한 마찰열의 발생이 감소하여 시험 핀 표면에서의 온도가 감소됨을 보이고 있다. 이와 같이 낮은 마찰온도 및 마찰계수를 보이는 안정화 구간에서의 윤활피막의 두께는 초기값에 비하여 상대적으로 감소되고, Fig. 6에서와 같이 매우 매끄러운 접촉 표면을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 시료 6의 고체윤활피막과 비교하여 내구수명이 뒤떨어지는 시험결과(시료 1 및 5)를 나타낸 윤활피막에서의 시험결과와의 예로서, 상대적으로 짧은 시간에 표면온도가 급증하면서 윤활피막이 파괴되는 결과를 나타냈다. 일반적으로 MoS<sub>2</sub> bonded film 윤활

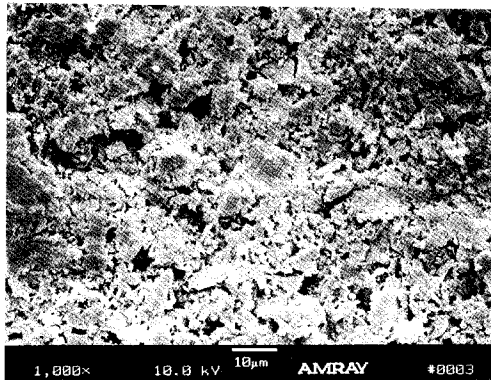


Fig. 6. A SEM micrograph showing a run-in film surface on the right hand; and an initial rough film surface on the left hand.

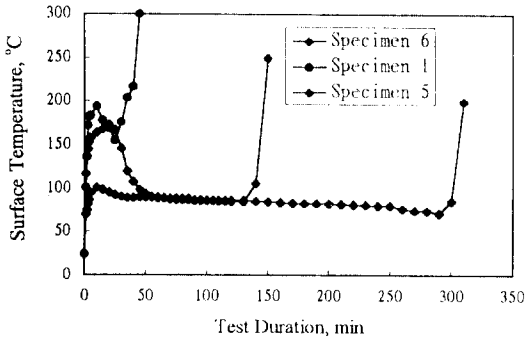


Fig. 7. A Falex test result showing surface temperatures of various types of solid lubricants.

피막의 파괴는 MoS<sub>2</sub> 입자의 산화현상에 기인되는 것으로 알려져 있다. MoS<sub>2</sub> 입자들이 산화됨에 따라서 MoO<sub>3</sub> (혹은 MoO, MoO<sub>2</sub>, MoOx)가 형성되면 윤활특성이 급속하게 감소하고 취성이 강하여 쉽게 부서러지게 되어 마모가 급속하게 진행된다[5,17]. 산화의 발생 및 산화물의 크기는 온도증가와 가장 밀접하게 관계가 있는 현상이므로, 따라서 MoS<sub>2</sub> bonded film의 수명을 증가시키기 위하여는 미끄럼 접촉운동 시에 발생하는 마찰열을 최대한 억제하는 보조적인 고체윤활제 및 수지류의 배합이 핵심적인 기술사항이 된다. 마찰열을 감소시키기 위하여는 Graphite 및 PTFE 등과 같은 마찰계수가 작은 보조 윤활제들을 첨가함으로써 효과를 거둘 수 있으며, 아울러 고온 분위기 내에서 MoS<sub>2</sub> 입자의 산화발생을 억제할 수 있는 보조적인 고체윤활제(예; Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, PbO 등) 및 산화방지 첨가제 등을 복합하여 효과를 기대할 수 있을 것이다. 윤활피막에 사용된 수지의 종류에 의해서도 윤활피막의 성능이 크게 좌우되나, 이와 같은 수지변화에 따른 내마모 특성변화 결과는 추후에 별도로 발표될 예정이다.

다음 Table 2는 상기 Table 1에서의 고체윤활제 시료들의 Falex 마모시험 결과를 나타낸 것이다. 시험결과들은 ANSI/ASTM D 2625-69 시험방법 및 결과산출법을 기준으로 하였으며, 동 시험방법의 결과값인 고체윤활피막의 내구수명 및 내하중지지성을 각각 측정하였다. Table 2에서 참고로 표시한 MIL-L-46010B 규격[18]은 열경화 처리하는 내부식성용 및 윤활제용 고체윤활 피막에 관한 미국 국방성 규격으로서, 상기 규격 중 본 연구와 관련이 있는 종류 I의 150±3°C 열경화용 윤활피막의 내구수명 및 내하중지지성의 요구

Table 2. Endurance and load-carrying capacity

Specimen	Endurance (min)	Load-carrying capacity (N)
1	55	11,100
2	2	<4,440
3	46	8,880
4	90	9,990
5	155	13,320
6	300	16,650
MIL-L-46010B	>250	>11,120

성능을 참고로 비교하여 나타낸 것이다.

상기와 같은 시료를 통하여 고체윤활제 혼합에 따른 고체윤활피막의 내구수명 및 내하중지지성의 변화가 다음과 같은 특징으로 나타남을 발견할 수 있었다. 시료 1 결과는 MoS<sub>2</sub> 입자만을 수지에 혼합시킨 결과로서, 높은 접촉하중 조건 하에서도 자기윤활효과가 우수한 것으로 널리 알려져 있는 MoS<sub>2</sub> 입자의 탁월한 극압성에 의하여 상대적으로 우수한 내하중지지성의 결과를 나타내었다. 그러나, 일정한 하중조건 하(4,440 N)에서 지속적으로 시험을 행하는 내구수명 값은 MIL-L-46010B와 같은 관련규격에서 요구하는 값에 비하여 훨씬 뒤떨어짐을 알 수 있다. 따라서 고체윤활피막의 내마모특성을 증가시키기 위하여는 무엇보다도 마찰열의 발생을 최대한 억제하여 상기 입자들이 산화되는 현상을 방지하는 효과적인 윤활제 성분 및 첨가제들의 복합이 관건이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 마찰열의 발생 및 산화발생을 억제하기 위한 방법으로서 여러 시료들을 통하여 마찰계수를 감소시키기 위한 보조 첨가제들의 복합, 고온 하에서 MoS<sub>2</sub> 산화발생을 억제시키는 고온산화안정제의 첨가, 수지 안정제의 첨가 및 기타 첨가제들의 복합을 선택적으로 시도하였다. 시료 2는 MoS<sub>2</sub> 대신에 그래파이트를 복합한 결과로서 내마모특성이 모두 뒤떨어짐을 볼 수 있다. 그래파이트는 이와 같이 높은 하중의 접촉조건 하에서는 내마모특성이 MoS<sub>2</sub>에 비하여 상대적으로 크게 떨어지나, MoS<sub>2</sub>과 복합하여 사용할 경우에는 고체윤활피막의 마찰계수를 감소시키는 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 시료 3은 시료 1 조성에 마찰계수의 감소 및 고온산화안정성의 목적으로 Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 소량의 Graphite 입자를 첨가한 결과인데, 오히려 시료 1의 결과보다 뒤떨어지는 결과가 나타났다. 이와 같은 현상은 보조적인 고체윤활제의 첨가로

인한 MoS<sub>2</sub> 함량의 상대적인 감소에 의한 결과로 사료된다. 시료 4는 시료 3에서와 같은 조성물에 PbO 및 마그네슘인산염을 추가한 결과로서 보조적인 고체윤활제 및 산화안정제의 역할에 의하여 시료 3의 경우보다 향상된 내마모특성 결과를 얻을 수 있었다. 시료 5는 시료 4와 같은 조성물에 추가로 보론-나이트라이드를 첨가한 결과로서 보다 향상된 내마모특성을 얻을 수 있었다. 그러나 시료 5의 결과 역시 MIL-L-46010B와 같은 관련규격에서 요구하는 값과 비교해 보면 내하중지지성의 결과에서는 훨씬 우수한 결과를 나타내고 있지만, 내구수명 결과에서는 요구 값에 훨씬 못미치는 결과를 나타내고 있다. 고체윤활피막의 내구수명을 보다 향상시키는 문제는 내마모성이 우수한 고체윤활제들을 단순하게 복합하는 방법으로는 한계가 있음을 제시하는 결과라 할 수 있다. 장기간의 접촉운동 조건하에서 시험되는 고체윤활피막의 내구수명을 결정하는 주요인자는 무엇보다도 고온 하에서의 보다 우수한 산화안정성 및 열안정성과 최대한 마찰계수를 감소시켜서 마찰열의 발생을 보다 억제하고 또한 고체윤활피막 내의 고체윤활제들의 분산을 고르게 분포시키며 수지와 금속표면과의 접착력 혹은 유기물과 무기물 상호간의 친화력 등을 보다 향상시키는 첨가제들의 추가적인 선정이 필수적임을 알 수 있었다. 시료 6은 이와 같은 측면에서 시료 5와 같은 조성에 다수의 보조적인 첨가제들을 복합한 결과로서 MIL-L-46010B 규격에서 요구하는 내마모특성 값들을 상대적으로 능가하는 우수한 내마모특성을 얻을 수 있었다.

#### 4. 결 론

1) 고체윤활용 MoS<sub>2</sub> Bonded film의 마찰마모 특성은 윤활제 제조에 사용된 고체윤활제 종류 및 함량에 따라서 주로 결정되나, 이외에도 윤활제에 소량으로 추가되는 산화안정제, 열안정성 첨가제, 분산제 및 기타 첨가제들의 역할에 의해서도 크게 좌우될 수 있다.

2) 고체윤활피막의 내구수명 및 내하중지지성은 미끄럼접촉운동 시 발생하는 마찰열에 의하여 발생하는 접촉면에서의 온도증가에 의하여 크게 영향을 받으며, 접촉면의 온도가 증가함에 따라 고체윤활제 등의 산화가 가속화되어 윤활피막이 파괴되는 것으로 사료

된다.

3) 고체윤활피막의 내마모특성을 증가시키기 위하여는 마찰열의 증가를 억제하거나 고온 하에서의 산화안정성을 향상시키기 위한 효과적인 보조적인 고체윤활제 및 산화방지 첨가제들의 복합이 필요하다.

4) 고체윤활용 MoS<sub>2</sub> Bonded film의 제조 실시예들 중 Epoxy/Phenol Resin(25%) 수지 내에 MoS<sub>2</sub>, Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Graphite, PbO, Magnesium Phosphate, BN, Wax, Pb-Naphtenate, Fluoro-Silan 등을 복합한 경우에 가장 우수한 내마모특성을 얻었다.

#### 후 기

이 연구는 국민은행 지원으로 (주)상원기계와 공동으로 수행된 "고체윤활용 MoS<sub>2</sub> Bonded Film 및 피막 코팅기의 개발" 연구의 일부이며 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. R.L. Johnson, "A Review of the Early Uses of Molybdenum Disulphide as a Lubricant", NLGI Spokeman, 32 (8), pp.298-305 (1968).
2. W.O. Winer, "Molybdenum Disulphide as a Lubricant: a Review of the Fundamental Knowledge", Wear, 10, p.422 (1967).
3. G.R. Smith, and C.E. Vest, "Lubrication of a Spacecraft Mechanism using the Transfer Film Technique", Lubrication Eng., p.422 (1971).
4. P.A. Grattan, and J.K. Lancaster, "Abrasion by Lamellar Solid Lubricants", Wear, 10, p.453 (1967).
5. A.W.J. De Gee, G. Salomon, and J.H. Zaat, "On the Mechanisms of MoS<sub>2</sub>-Film Failure in Sliding Friction", ASLE Trans., 8, p.156 (1965).
6. V.R. Johnson, and G.W. Vaugan, "Investigation of the Mechanism of MoS<sub>2</sub> Lubrication in Vacuum", J. Appl. Phys., 27, No. 10, p.1173 (1956).
7. R.R.M. Johnston, and A.J.W. Moore, "The Bur-nishing of Molybdenum Disulphide on to Metal Sur-faces", Wear, 7, p.498 (1964).
8. J.K. Lancaster, "The Influence of Substrate Hardness on the Formation and Endurance of Molybdenum Disulphide Films", Wear, 10, p.103 (1967).
9. V. Hopkins, and M. Campbell, "Film Thickness Ef-

- fect on the Wear Life of a Bonded Solid Lubricant Film", *Lubr. Engr.*, 25, p.15 (1969).
10. F.P. Bowden, and D. Tabor, "The Friction and Lubrication of Solids", Part 1, Chapter 5, Oxford University, London, 1954.
  11. Francis J. Clauss, "Solid Lubricants and Self-Lubricating Solids", Academic Press, Inc., 1972.
  12. J.P. Giltrow, and J.K. Lancaster, "The Role of Impurities in the Abrasiveness of MoS<sub>2</sub>", *Wear*, 20, p.137 (1972).
  13. W.J. Bartz, "Some Investigation on the Influence of Particle Size on the Lubricating Effectiveness of Molybdenum Disulphide", *ASLE Trans.*, 15, No. 3, p. 207 (1972).
  14. MIL-P-50002B, MIL. Spec. "Phosphate Coating Compounds, For Phosphating Ferrous Metals".
  15. ANSI/ASTM D 2625-69, "Standard Test Method for Endurance (wear) Life and Load-Carrying Capacity of Solid Film Lubricants", p.570-575.
  16. H. Kong, E-S Yoon, K-S Chun and G-H Song, "An Experimental Analysis on the Maximum Allowable PV Value of Oilless Composite Bearing Materials", *KSTLE*, Vol. 11, No. 1, pp.27-36, (1995).
  17. M. Arita, Y. Yasuda, K. Kishi, N. Ohmae and Y. Shichi, "Investigation of the Degradation of MoS<sub>2</sub> Solid Lubricants Exposed to Atomic Oxygen", presented at '95 ITC Conference, Yokohama, 1995.
  18. MIL-L-46010B, MIL. Spec. "Lubricant, Solid Film, Heat Cured, Corrosion Inhibiting".