

결합제 변화에 따른 상온 경화성 접착형 MoS₂ 고체윤활 피막의 마찰·마모 특성

한흥구·공호성·윤의성·권오관

한국과학기술연구원 트라이볼로지연구센터

An Experimental Study on Friction and Wear Characteristics of Air Curable MoS₂ Bonded Films with Polymeric Binder Materials

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

Tribology Research Center, KIST

Abstract—In this work, the effects of binder materials on the tribological behavior were experimentally evaluated for air curable MoS₂ bonded film lubricants. The binders tested were basically alkyd and acryl based resins, and also were modified by nitro-cellulose in various weight percentages. Effects on the binder ratio to solid lubricants and the molecular weight of binders were also investigated in all aspects of the tribological behavior. For the tests, LFW-1 and Falex tester were used to measure mainly the endurance life and load carrying capacity of bonded lubricants. Results showed that lubricants of methacrylic resin has the better performance than those of other resins, and also the properties of lubricants both of alkyd and acrylic resins could be improved by modification with nitro-cellulose. It was also shown that the optimum ratio of nitro-cellulose related closely to the binder material and the testing machine.

Key words—MoS₂ bonded film, friction, wear, air curable lubricant.

1. 서 론

접착형 고체 윤활피막제의 종류는 이황화 몰리브데늄, 흑연 등과 같이 사용된 고체윤활 성분에 따라 주로 구분되며, 경우에 따라서는 피막제의 경화 방법에 의해 가열 경화형과 상온 경화형으로 구분된다. 경화 방법은 사용된 결합제의 수지 종류에 따라 결정되는 것으로서, 보편적으로 소형이면서 내구성 및 내 화학성이 특별히 요구되는 경우에는 열 경화성 결합제를 이용하게 되며, 열 경화 처리가 난해할 정도로 규모가 크거나, 특성상 분해 작업이 어려운 기계요소 또는 현장에서 손쉽게 처리를 요구하는 경우에는 상온 경화를 사용하게 된다. 그러나 주로 상온 경화성 피막제에 이용되는 열 가소성 수지는 본질적으로 열 경화성 수

지에 비해 내열성 및 강도가 상대적으로 낮기 때문에 이를 이용한 상온 경화형 고체 윤활 피막제는 열 경화형 고체 윤활 피막제에 비해 성능이 다소 떨어지는 편이다. 따라서 상온 경화형 윤활피막의 경우는 이를 극복하기 위해서는 우선적으로 결합제의 특성을 보완하거나 개선하는 것이 보다 중요하다.

접착형 고체 윤활 피막의 윤활 특성에 영향을 미치는 요소로는 주성분인 고체 윤활제 성분과 보조 윤활 첨가제의 종류 및 구성비, 기타 안정화 첨가제들의 사용, 그리고 사용된 결합제(binder)의 기계 및 화학적 특성, 고체 윤활제 성분과의 구성비 등을 들 수 있다 [1-11]. 또한 저자들의 선행된 연구 결과들[11-13]에 의하여 고체 윤활제 성분과 결합제들은 실제로 사용되는 기계적 마찰·마모 기구의 차이에 따라 최적의

조성이 다를 뿐만 아니라 결합제의 경도, 인장강도, 접착성 등의 특성도 기계적 접촉 기구에 따라 서로 다른 최적 물성치가 존재함이 보고된 바 있다.

본 논문에서는 상온 경화형 고체 윤활 피막제에 대하여, 그를 구성하고 있는 성분 중에서 특히, 결합제의 변화에 따른 윤활 피막제의 성능 및 마찰·마모 특성을 중점적으로 고찰하였다. 기본적으로 결합제는 알키드(Alkyd)와 아크릴(Acryl)계 수지를 사용하였으며, 이들 수지들의 물리적 성질의 변화를 통한 윤활특성을 알아보기 위해 니트로 셀룰로오스(Nitro cellulose, NC)로 이들 수지들을 변성하여 사용하였다. 니트로 셀룰로오스는 본질적으로 천연섬유에 함유된 셀룰로오스 성분으로부터 얻어지는 것으로 경도(hardness, Sward; 90% of glass) 및 연화점이 높고 내마모성이 좋으며, 특히 건조성이 좋기 때문에 상온 경화형 락카 혹은 기타 코팅제로서 폭넓게 이용되고 있다. 그러나 이를 단독으로 사용하기에는 접착성이 나쁜 단점도 지니고 있는 것으로 알려져 있다[14,15]. 본 연구에서는 이를 알키드 및 아크릴계 수지들의 내열성과 경도, 내마모성을 높이고, 건조성을 향상시키기 위해 사용하였으며, 그의 변성 비율에 따른 마찰·마모특성을 분석하고, 기타 수지의 분자량, 고체 윤활제 성분과의 구성비 등에 따른 영향을 고찰하였다. 또한 두 가지 형태의 시험기를 이용하여 기계적 접촉 기구의 차이에 따른 각 조성물의 마찰·마모 특성도 비교 검토하였다. 본 연구의 결과로서 기본 수지들이 지니고 있는 초기의 물리적 특성에 의해 변성 효과가 다르며, 수지의 종류별로 최적의 변성 비율이 다르게 존재할 뿐만 아니라 시험기에 따라서는 차이가 있음을 알 수 있었다.

2. 고체 윤활 피막제의 제조

본 연구에 사용된 고체 윤활 피막제는 실험실적으로 직접 제조하여 이용하였으며, 제조된 시료에서 고체 윤활제 성분으로는 이황화몰리브덴을 주성분으로 하고 보조 윤활제로 흑연을 첨가하였다. 이황화몰리브덴 입자는 순도가 98%이고 평균입자 크기가 3~6 μm인 것, 그리고 흑연 입자는 탄소 함량이 99% 이상이며 평균 입자 크기는 4~7 μm인 것을 사용하였다. 그 외에도 고체 윤활 피막의 물리·화학적 특성을 향상시키기 위하여 산화 및 분산 안정제, 건조성 향상제 등의 첨가제들을 같은 비율로서 사용하였다. 결합

Table 1. Physical properties of used polymer resins

Materials	Physical properties ⁽¹⁾		
	Softening point, °C	Tensile strength, psi	Elongation at break, %
Alkyd	30 ⁽²⁾	-	-
Acrylic ester	45 ⁽²⁾	1000	750
Metacrylic ester	110	8000	4
Nitro cellulose	190	13000	8

⁽¹⁾Ref. [14,18], ⁽²⁾The measured in this work.

제로는 상온 경화형 도료에 흔히 사용되는 것으로 프탈산계 알키드 수지와 아크릴계 수지를 기본적으로 사용하였으며, 아크릴계 수지의 경우는 분자구조의 특성상 물리적 성상의 차이가 많은 아크릴릭 에스테르 수지와 메타아크릴릭 에스테르 수지를 각각 구별하여 사용하였다. 또한 변성용 수지는 연화점과 경도, 인장강도 등이 이들보다 높은 니트로 셀룰로오스 수지를 사용하였으며, 사용된 수지들의 일반적인 물리적 성상은 Table 1에 나타낸 바와 같다. 수지의 변성 방법은 톨루엔과 메틸-에틸-케톤 등의 복합용제에 일정량 용해시킨 두 수지 용액을 상온에서 혼합하여 제조하였으며, 각 수지에 대한 니트로 셀룰로오스 수지의 변성 비율은 무게비로서 15, 25, 35%가 되도록 하였다. 고체 윤활제 성분과 결합제의 구성비에 관한 시험 시료는 9:1, 8:2, 7:3으로 변화시켰으며 이들의 특성도 고찰하였다. 피막제의 제조는 고체 윤활제 성분과 첨가제 및 결합제 성분을 메틸-에틸-케톤, 크실렌, 셀룰로부 아세테이트, 알코올 등의 유기 용제 중에서 사용된 수지의 종류에 따라 알맞게 선택적으로 혼합시킨 용제에 넣고 Kady mill 형태의 호모게나이저를 이용하여 용제 내에 균일하게 분산시켜 제조하였다. 고체 윤활제 및 결합제 성분으로 이루어진 전체 고형분과 복합 용제의 비는 4:6이 되도록 원액을 제조하였으며 시험 시편 위에 도포할 때에는 피막의 두께를 고르게 맞추기 편리하도록 원액을 재차 일정한 비율로 동일한 용제에 희석하여 사용하였다.

3. 시험방법 및 시편

접착형 고체 윤활 피막제의 윤활 특성을 평가하기 위한 국제적 시험 방법으로는 LFW-1 시험기(ASTM D-2714)와 Fallex 시험기(ASTM D-2625)를 주로 이용하고 있으며, 본 연구에서도 두 가지 방법을 병행하여

사용하였다. 내구수명의 측정은 LFW-1 시험의 경우 하중이 630 lb(max. herz contact stress: 950 MPa), 접촉면에서의 미끄럼 속도가 약 0.13 m/s로 하였으며, Falex 시험에서는 하중이 1000 lb(max. herz contact stress: 1460 MPa), 접촉면에서의 미끄럼 속도가 약 0.1 m/s인 조건에서 시험하였다. LFW-1 및 Falex 시험에서 시편의 재질 및 시험 방법 등은 선행된 연구와 동일하게 행하였다[12,16,17].

LFW-1 시험에서 고체 윤활 피막제를 도포 시키는 Ring의 표면은 부착성을 향상시키기 위하여 전처리 작업으로 샌드-브라스트 처리를 행하였다. 샌드-브라스트는 평균 120메쉬 크기의 알루미늄 입자를 사용하였으며, 작업 후의 표면 거칠기 크기는 약 $1.0 \mu\text{m}(\text{Ra})$ 정도로 나타났다. Ring과 미끄럼 접촉을 하는 Block의 접촉면은 샌드페이퍼(#320)를 이용하여 표면 거칠기가 약 $0.3 \mu\text{m}(\text{Ra})$ 이 되도록 무방향으로 연마하였으며, 윤활 피막제는 도포하지 않았다. 고체 윤활 피막의 도포는 침지(dipping)법을 사용하였으며, 도포된 시편은 상온의 대기 분위기에서 약 1시간 이상 건조하여 1차 유기 용제를 휘발시킨 후 대기 조건(온도 및 습도)에 따른 경화 차이를 최소화하기 위하여 2차로 강제 대류형 건조 오븐 내에서 약 30°C 의 온도 조건으로 24시간 동안 경화 과정을 행하였다. 피막의 두께는 코팅하기 전후의 Ring의 외경 차이 및 Kett사 제품(model: LE-200C)의 도막 두께 측정기를 이용하여 측정하였으며 경화 처리가 완성된 시편의 고체 윤활 피막의 두께는 약 $15 \pm 5 \mu\text{m}$ 정도로 균일하였다.

Falex 시험에서 각 시편들의 세정 및 전처리, 피막 코팅 등은 LFW-1 시험에서와 동일한 방법으로 하였으나, 이 경우는 Pin과 Block 시편 모두를 샌드-브라스트 처리를 행하고 윤활 피막제를 도포 하였다.

시험중 표면 온도의 측정은 비접촉식 적외선 온도계(Kyence corp. 제품)를 이용하여 측정하였다. LFW-1 시험에서 온도 측정 부위는 Block의 중앙 접촉부로부터 약 0.2 mm 떨어진 곳을 그리고 Falex 시험에서는 회전하는 Pin의 중앙 부위의 온도를 측정하였다. 사용된 적외선 온도계는 측정 거리가 54 mm이며 초점의 최소 구경은 0.2 mm, 측정 온도 범위 $0\sim 500^\circ\text{C}$, 측정 정도가 0.1°C 이었다. 시험은 실온의 대기 조건하에서 행하였으며, 일정한 습도 조건(상대 습도 $50 \pm 5\%$)을 유지하기 위하여 제습기 및 가습기를 병행하여 사용하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 1은 실험 대상의 상온 경화형 고체 윤활 피막제의 고체 윤활제 성분과 결합제 성분의 최적 구성비를 알아보기 위하여 행한 실험 중 메타아크릴릭 에스테르 수지를 대상으로 LFW-1과 Falex 시험기에서 내구 수명을 실험한 결과로서 ASTM 규격에 의하여 4회 시험한 값을 평균한 결과이다. LFW-1 시험에서는 일반적으로 결합제 성분의 비율이 높아질수록 내구 수명이 다소 떨어지는 경향을 보였으며, 10%인 것이 3400분으로 가장 좋은 결과를 나타내었다. 그러나 Falex 시험의 경우는 이와는 달리 20%일 때 180분으로 가장 긴 수명을 나타내었다. 이는 결합제 비율이 약 40%일 때 가장 좋은 결과를 나타낸 열경화성 고체 윤활 피막제에서의 결과[12]와는 대조를 이루는 결과이다. 이러한 결과는 열가소성 수지가 비교적 내열성이 낮고, 특히 마찰열에 따른 강도 변화가 심하기 때문에 상대적으로 고체 윤활제 성분에 대한 최적의 구성 비율이 열경화성에 비해 낮게 존재하는 것으로 판단된다. 다른 열가소성 수지들의 경우에서도 동일하게 최적의 구성비가 낮게 나타났으며, 따라서 이후의 실험에서 시료로 사용된 각 윤활 피막제에서 고체 윤활제 성분과 결합제의 구성비를 8:2로 고정하였다.

Table 2는 결합제 변화에 따른 모든 고체윤활 피막제 시료에 대하여 LFW-1과 Falex 시험기에서 실시한 내구 수명 및 내하중성 실험 결과를 나타낸 것이다. 니트로 셀룰로오스로 변성시키지 않은 수지들의 경우는 모든 실험 결과에서 메타아크릴릭 에스테르 수지를 이용한 것이 가장 좋은 것으로 나타났다. 마찰열의 발생이 Falex 시험기보다 낮은($50\sim 60^\circ\text{C}$) LFW-1 시험기에서의 내구 수명 실험 결과에서는 세 가지 수지가

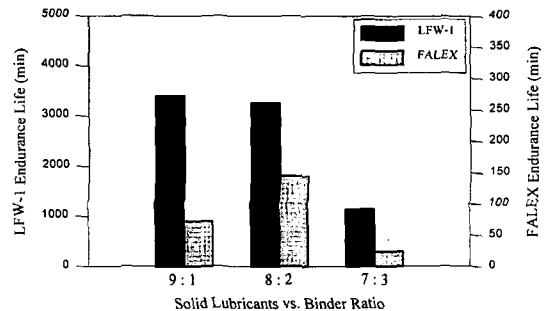


Fig. 1. LFW-1 & Falex test results with the solid lubricant to binder ratio.

Table 2. LFW-1 & Falex test results

Test item	Materials	Test results			
		Base	NC Modification ratio (wt.%)		
			15	25	35
LFW-1 test (ASTM D-2714)	Alkyd	1540	3000	3060	2700
Endurance life (min)	Acrylic ester	2400	2700	2250	2160
	Methacrylic ester	3260	2900	3000	2730
Falex test (ASTM D-2625)	Alkyd	60	90	120	280
Endurance life (min)	Acrylic ester	60	170	200	140
	Methacrylic ester	180	140	160	100
Falex test (ASTM D-2625)	Alkyd	1750	2250	3000	2750
Load carrying capacity (lb)	Acrylic ester	2500	3250	3750	3250
	Methacrylic ester	>4500	4000	>4500	>4500

비교적 큰 차이가 있었으며, 메타아크릴릭 에스테르>아크릴릭 에스테르>알키드 수지 등의 순으로 나타났다. 이는 상기 Table 1의 물성을 고려하면 수지의 연화점 및 인장강도가 높을수록 고체윤활제의 내구 수명이 좋은 결과를 나타내고 있음을 알 수 있었다. Falex 시험기에서도 유사한 관점에 의해 내구 수명 결과가 나타나는 것으로 보여지며 내하중성 실험 결과 역시 이와 비슷한 경향을 보이고 있다.

상기의 기본 수지들의 실험 결과, 피막제의 윤활 특성이 결합제의 내열성 및 인장강도 등의 특성과 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다. 따라서 이들 수지보다 연화점 및 인장 강도가 높은 니트로 셀룰로오스를 복합 변성시키므로써 고체윤활 피막제의 윤활특성을 향상시키고자 하였으며, 그 결과 수지의 종류에 따라 흥미 있는 변화들을 발견할 수 있었다. 즉, 알키드 및 아크릴릭 에스테르 수지를 변성시킨 경우에는 윤활제의 성능이 현저하게 향상되는 결과를 나타내었으며, 특히 알키드 수지의 경우는 내구 수명 두 시험기에서 모두 가장 크게 향상되는 결과를 보였다. 이는 변성에 의해 수지의 물리적 성상이 고체 윤활 피막제의 결합제 특성에 맞도록 향상된 결과로 생각된다. 그러나 메타아크릴릭 에스테르 수지의 경우는 두 수지와는 달리 변성에 의해 전반적으로 본래의 수지보다도 오히려 성능이 낮아지는 결과를 나타내었다. 이는 기존의 메타아크릴릭 에스테르 수지의 고유 물성이 고체 윤활 피막제의 결합제로서의 최적의 물성에 이미 접근되어 있어서, 니트로 셀룰로오스 수지에 의해 변성시킬 경우 필요 이상으로 경도가 높아져 피막의 취성이 오히려 증가하거나 혹은 모재와의 접착성이 불량하게

되는 것으로 사료된다. 이와 같은 결과는 고체윤활 피막제의 우수한 윤활 성능을 위한 결합제로서의 최적의 물리적 성상 범위가 일정한 범위내에서 존재하는 것을 제시하는 결과로서 사료된다.

니트로 셀룰로오스의 최적 변성율은 수지의 종류에 따라 다르게 나타났다. 즉, 알키드 수지의 경우는 내구수명성이 LFW-1 시험에서 25%, 그리고 Falex 시험에서는 35% 복합시킨 것이 가장 좋았고, Falex 시험에서의 내하중성은 25%인 것이 가장 좋은 것으로 나타났다. 반면에 아크릴릭 에스테르 수지의 경우는 LFW-1 시험에서 15%, Falex 시험에서는 25%에서 내구수명성과 내하중성이 가장 좋은 결과를 보였다. 35% 이상을 복합시킨 경우는 일반적으로 윤활성능이 떨어지는 결과를 보이고 있는데, 이것 역시 과도한 양(35% 이상)으로 니트로 셀룰로오스가 복합되면서 윤활 피막제의 취성이 증가하고 금속 표면에 대한 결합력이 약화되기 때문인 것으로 생각된다. 이와 같이 기본 수지들이 지니고 있는 물리적 특성 차이에 의해 변성 효과가 다르게 나타나고 있으며, 수지의 종류별로 최적의 변성 비율이 다르게 존재할 뿐만 아니라 시험기에 따라서도 차이가 있음을 알 수 있었다. 또한, 니트로 셀룰로오스를 알키드 및 아크릴 에스테르 수지에 부분적으로 복합 변성시킴으로써 메타아크릴릭 에스테르 수지에 비교할 만한 결합제의 성능을 지니게 할 수 있었으며, 두 수지의 가격이 상대적으로 낮기 때문에 경제적 측면에서도 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

결합제의 분자량 크기에 따른 고체 윤활 피막제의 성능의 변화를 알아보기 위하여 메타아크릴릭 에스테

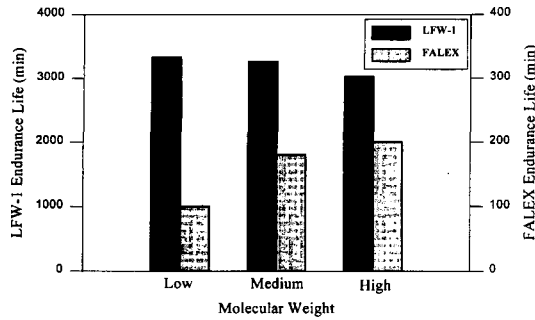


Fig. 2. LFW-1 & Falex test results with the molecular weight of binder material.

르 수지를 대상으로 실험하였으며, LFW-1 및 Falex 시험기에서의 내구 수명 실험 결과를 Fig. 2에 나타내었다. LFW-1 시험기에서는 분자량의 크기에 따라 뚜렷한 차이를 보이지 않는 반면, Falex 시험기에서는 분자량이 클수록 좋은 결과를 나타내었다. 일반적으로 고분자 수지는 분자량이 클수록 기계적인 물성과 내열성이 높은 것으로 알려져 있는데[16], 두 시험기의 비교를 통해 고려해 보면, 초기의 접촉응력(Hertz contact stress)이 높은 Falex 시험기[12]에서는 이러한 일반적 특성과 일치되는 결과를 나타내는 반면, 상대적으로 접촉응력이 낮은 LFW-1 시험기에서는 밀접한 관계가 없는 경향을 보이고 있다. 이는 Falex 시험에서의 내구 수명은 수지의 내열 강도에 더욱 영향을 받는다는 결론을 도출할 수 있으며, Falex 시험의 경우 마찰이 안정된 구간에서도 시편의 표면 온도가 높은(90~100°C) 것이 이를 입증해 주고 있다. 결국 기계적인 접촉 조건에 따라 분자량 크기에 따른 피막제의 성능이 서로 다른 경향으로 나타날 수 있으며, 접촉응력이 높을수록 분자량이 큰 것이 내구 수명이 좋은 것으로 나타났다.

결합제의 종류별로 니트로 셀룰로오스의 변성 비율에 따른 고체 윤활 피막제의 마찰 특성의 변화를 관찰하였으며, Fig. 3은 LFW-1 시험에서 마찰이 안정된 구간에서의 마찰계수 값을 평균치로서 도시한 것이다. 변성 전의 수지들의 마찰계수는 메타아크릴릭 에스테르>아크릴릭 에스테르>알키드 수지 등의 순으로 높은 값을 나타냈으며, 이들 수지들을 니트로 셀룰로오스로 변성시켰을 때의 마찰계수 값들이 서로 다른 변화를 보였다. 즉, 알키드 수지는 변성 비율에 따라 마찰계수 값이 점차적으로 상승되는 경향을 보이는데 반하여 나머지 두 아크릴계 수지는 큰 변화가 없는 것

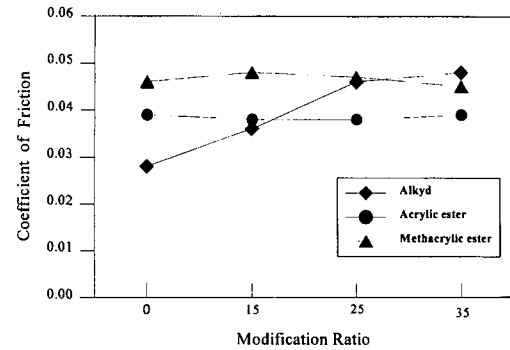


Fig. 3. Average coefficients of friction of the various types of lubricants for LFW-1 test.

으로 나타났다. 이는 기계적 강도에 대한 니트로 셀룰로오스의 변성 효과가 알키드 수지를 결합제로 사용한 윤활 피막제에서 가장 큰 것으로 보이며, 이에 따라 전단 강도가 증가하면서 마찰계수 값이 높아진 것으로 사료된다.

두 시험기에 따른 상온 경화형 고체윤활 피막제의 마모 형태는 열 경화형의 경우[11-13]와 유사한 거동을 보였다. LFW-1 시험의 경우, 윤활피막은 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 주로 블리스터(blisters) 생성에 의해 마모가 발생하는 것으로 나타났으며, 코팅을 하지 않은 상대 시편(Block)에는 Fig. 5와 같이 윤활막이 전이 형성되면서 보다 효과적으로 윤활 작용이 이루어지는 것을 알 수 있었다. 사용된 결합제의 종류에 따라 마모입자 발생의 차이를 나타내었다. 즉, 아크릴계 수지는 초기 길들이기 과정에서 피막 두께의 약 절반 정도가 마모되고 난 후 마찰이 안정된 구간에서는 정상 마모에 의한 매우 작은 입자가 고르게 발생하는 반면,

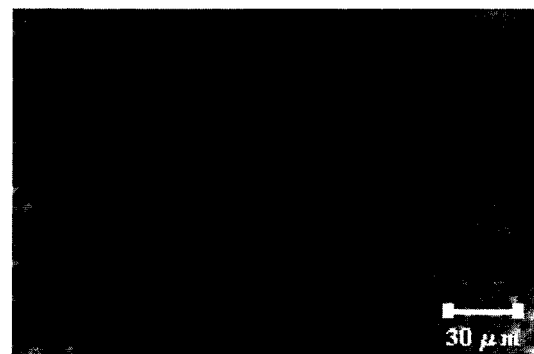


Fig. 4. An Optical-micrograph showing of transferred film formation on the block surface for LFW-1 test.

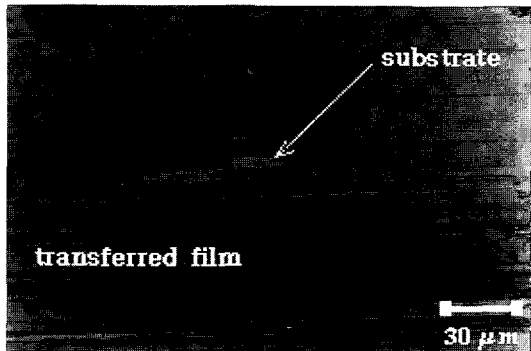


Fig. 5. An Optical-micrograph showing of transferred film formation on the block surface for LFW-1 test.

알키드 수지는 길들이기 과정에서의 마모량이 매우 적었으며 시험시간 전반에 걸쳐 정상 마모 형태로서 고르게 발생하는 경향을 나타내었다. 이들 수지를 니트로 셀룰로오즈로 변성한 경우에는 초기 길들이기 과정에서의 마모량이 증가하는 추세를 나타냈으며 특히, 알키드 수지의 경우에는 변성 비율이 높아질수록 초기 길들이기 과정에서의 마모량이 현저하게 증가되는 변화를 보였다. 이는 변성량에 따라 비교적 접착성 (cohesion)이 떨어지고 경도가 높아지면서 피막의 취성이 증가하기 때문에 초기에 기공성(pore)이 높은 피막이 압축되는 과정에서 그만큼 마모 입자가 많이 발생하는 것으로 사료된다. 이 경우에도 마찰이 안정화된 후에는 마모량이 급격히 감소되고 변성 전의 기본 수지들과 동일한 마모 거동을 나타내었다.

5. 결 론

1. 기본 수지만을 결합제로 사용한 고체 윤활 피막제의 내하중성 및 내구 수명 LFW-1 및 Falex 시험 모두에서 메타아크릴릭 에스테르 수지가 가장 우수하였으며, 다음으로 아크릴릭 에스테르 수지, 알키드 수지 순으로 나타났다.

2. 니트로 셀룰로오즈에 의해 기본 수지들을 복합 변성시켰을 경우 알키드 및 아크릴릭 에스테르 수지는 성능이 크게 증가되는 반면 메타아크릴릭 에스테르 수지는 오히려 감소하는 결과를 나타내었다.

3. 고체 윤활 피막제에서 메타아크릴릭 수지의 분자량 크기에 따른 내구 수명 실험의 경우 LFW-1 시험에서는 분자량이 적은 것이 성능이 좋았던 반면, 비교적 접촉 조건이 가혹한 Falex 시험에서는 분자량이

큰 것이 좋은 것으로 나타났다.

4. LFW-1 시험에서 니트로 셀룰로오즈 변성에 따른 마찰계수의 변화는 아크릴계 수지의 경우는 큰 차이가 없는데 반해서 알키드 수지는 변성량에 따라 증가되는 경향을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. Calhoun, S. F., Meade, F. S., Murphy, G. P. and Young, R. L., "Factors Affecting the Performance of Resin Bonded," Lub. Eng., March, pp. 97, 1965.
2. Bartz, W. J., "Some Investigation on the Influence of Particle Size on the Lubricating Effectiveness of Molybdenum Disulphide," ASLE Trans., 15, No. 3, pp. 207, 1972.
3. Winer, W. O., "Molybdenum Disulphide as a Lubricant: a Review of the Fundamental Knowledge," Wear, 10, pp. 422, 1967.
4. Gardos, M. N., "The Synergistic Effects of Graphite on the Friction and Wear of MoS₂ Films in Air," STLE, Vol. 31, No. 2, pp. 214-227, 1987.
5. Matsunaga, M. and Nakagawa, T., "Frictional Behavior of Various Kinds of Molybdenum Disulfide," Proc. 2nd Int. Conf. on Solid Lubr., ASLE SP-6, pp. 45-50, 1978.
6. Fischer, F. G., Cron, A. D. and Huber, R. G., "Graphite and Molybdenum Disulphide Synergisms," NLGI, March pp. 1-18, 1982.
7. Clauss, Francis J., Solid Lubricants and Self-Lubricating Solids, Academic Press Inc., 1972.
8. Lansdown, A. R., Molybdenum Disulphide Lubrication, European Space Agency Report ESA CR-764, 1976.
9. Lansdown, A. R., Molybdenum Disulphide Lubrication, European Space Agency Report ESA CR-2261/74, 1976.
10. Gresham, Robert M., "Solid-Film Lubricants: Unique Products for Unique Lubrication," J. of STLE, Feb. pp. 142-145, 1988.
11. 공호성, 윤의성, 한홍구, 권오관, "고체윤활용 MoS₂ Bonded Film의 마찰·마모 특성에 관한 실험적 고찰," 한국윤활학회지, 제12권, 제1호, pp. 15-21, 1996.
12. Han, H.-G., Kong, H., Kwon, O.-K. and Myshkin, N. K., "Wear Life of MoS₂-Bonded Films for Tribotesters with Different Contact Configuration," J. of Friction and Wear, Vol. 18, No. 4, pp. 46-52, 1997.

13. Kong, H., Han, H.-G., Yoon, E.-S., Kwon, O.-K. and Myshkin, N. K., "Evaluation of the wear life of MoS₂-bonded-films in tribo-testers with different contact configuration," *Wear*, Vol. 215, pp. 25-33, 1998.
14. Payne, H. F., *Organic coating technology* (1), John Willy & Sons, Inc., 1954.
15. Bogan, R. T. and Brewer, R. J., *Encyclopedia of polymer science and engineering*, Willy Interscience, Vol. 3, pp. 139-181, 1985.
16. ASTM D 2625-69, "Standard Test Method for Endurance (wear) Life and Load-Carrying Capacity of Solid Film Lubricants".
17. ASTM D 2714-68, "Calibration and Operation of the Alpha Model LFW-1 Friction and Wear testing Machine".
18. Kine, Benjamin B. and Novak, Ronald W., *Encyclopedia of polymer science and engineering*, Willy Interscience, Vol. 1, pp. 234-299, 1985.