

미끄럼 운동을 하는 Block-on-Ring 접촉형태에서의 접착형 MoS₂ 고체윤활 피막의 마찰 마모 특성

An Experimental Study on Friction and Wear of Solid Lubricating MoS₂ Bonded Films at a Block-on-Ring Typed Tribo-tester

한흥구, 공호성, 윤의성, 권오관
한국과학기술연구원 기전연구부

Abstract - Friction and wear behavior of MoS₂ bonded films were evaluated at a Block-on-Ring typed tribo-tester, and their properties were compared with those of Falex tester in terms of the wear life of the films. Test results showed that friction and wear properties were significantly affected by the test methods of different contact configuration, and the wear life at a Block-on-Ring type tribo-tester was mostly governed by the resin binder. To obtain long wear life of the films, various combinations of solid-resin-content ratio and chemical resin modification were attempted and evaluated. Adhesion properties of resin binders were also measured and compared by using a scratch tester.

Key Words: Friction, Wear, Wear Life, MoS₂ bonded film, LFW-1 Tester

1. 서 론

접착형 고체윤활 피막의 윤활특성은 기본적으로 사용된 고체윤활제(MoS₂, Graphite, WS₂ 등)의 종류, 순도, 크기, 그리고 이들 상호간의 조성비 등에 크게 의존하며 [1-6], 그 외에도 윤활제를 금속표면에 부착시켜 주는 바인더 성분의 종류, 고체윤활제 성분과 바인더의 혼합비, 보조 윤활첨가제 (Sb₂O₃, PbO, BN 등) 및 기타 첨가제들도 피막의 윤활특성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[7-10]. 최근 국내에서도 접착형 MoS₂ 윤활제와 관련하여 보조윤활제 및 첨가제들의 적절한 선택 및 복합에 의해 윤활제의 내하중성 및 내구수명을 향상시키기 위한 최적조성에 관한 연구[11] 및 이들의 동력전달 효율과 소음저감특성 등을 향상시키기 위한 응용연구가 진행된 바 있다[12]. 접착형 고체윤활제는 사용된 자기윤활성 고체 성분에 따라 그의 종류를 분류하기도 하지만 일반적으로 사용된 바인더의 종류 및 형태에 따라 구분하며 그만큼 바인더는 중요한 구성성분이 된다.

접착형 고체윤활 피막을 평가하기 위한 국제적 시험 방법으로는 Falex 시험기(ASTM D 2625, Pin & V-Block type)와 LFW-1 시험기(ASTM D 2714, Block-on-Ring type)를 주로 이용하고 있으며, 특히 미국방성에서는 Falex 시험기에 의해 제품의 성능을 평가하도록 규정하고 있다[13-14]. 그러나 저자들의 최근의 시험 결과에서 이 두 시험기에 의해서 평가된 시험결과

들이 서로 상반되는 결과를 나타내는 현상을 발견하였다. Falex 시험시 가장 우수한 내구수명을 나타냈던 고체윤활제 시료가 LFW-1 시험기에서는 상대적으로 저조한 내구수명의 결과를 나타내었다. 이와 같은 시험 결과의 차이는 평가방법에 따라 윤활제 성능이 다르게 나타날 수 있음을 보여주는 당연한 결과로서 경시할 수도 있지만, 사용목적에 가장 적합한 윤활제를 선정하여야 하는 사용자 측면에서는 윤활제의 최적 평가 방법 선정과 관련하여 매우 중요한 의미를 부여하고 있다.

따라서 본 논문에서는 시험 평가 방법 차이에 따른 접착형 고체윤활 피막의 마찰 및 마모 특성을 실험적으로 비교 고찰하고, LFW-1 시험시에 우수한 내구수명을 지니는 고체윤활 피막의 조성에 관하여 연구하였다. 특히 본 연구에서는 고체윤활 피막 조성의 변화중에서 바인더 측에 중점을 두고 그의 종류 및 고체 성분과의 구성비율 등을 변화시키고 이들에 따른 고체윤활 피막들의 마찰 및 마모특성에 관하여 시험하였으며, 아울러 상용화되어 있는 관련 제품중에서도 바인더와 고체윤활제의 성분비 별로 시료를 선정하여 비교 시험을 행하였다.

2. 윤활제의 제조 및 실험방법

2-1. 접착형 고체윤활제의 제조

시험 대상의 접착형 MoS₂ 고체윤활제는 본 연구 과

Table 1 Tested MoS₂ bonded film lubricants

Sample Name	Main Composition (Wt.%)	Remarks
MA25	MoS ₂ , Graphite + Epoxy/Phenol Resin(25%)	DGEBA/Phenol R.
MA40	MoS ₂ , Graphite + Epoxy/Phenol Resin(40%)	DGEBA/Phenol R.
RA40	MoS ₂ , Graphite + Epoxy Resin (40%)	Modified Epoxy ¹
RB40	MoS ₂ , Graphite + Epoxy Resin (40%)	Modified Epoxy ²
RC40	MoS ₂ , Graphite + Epoxy Resin (40%)	Modified Epoxy ³
RC25	MoS ₂ , Graphite + Epoxy Resin (25%)	Modified Epoxy ³
RC50	MoS ₂ , Graphite + Epoxy Resin (50%)	Modified Epoxy ³
A1	MoS ₂ , Sb ₂ O ₃ + Organic Resin (25%)	Commercial
A2	MoS ₂ + Organic Resin (40%)	Commercial
B1	MoS ₂ , Sb ₂ O ₃ + Organic Resin (25%)	Commercial
B2	MoS ₂ + Organic Resin (60%)	Commercial
C	MoS ₂ + Organic Resin (40%)	Commercial

Modified Epoxy¹: Silicon compound modified

Modified Epoxy²: Urethane compound modified

Modified Epoxy³: Amino compound modified

정에서 직접 합성시켜 제조한 윤활제 시료 7종과 상용화되어 있는 관련 제품 5종 등을 포함하여 모두 12종을 선정하여 실험하였다. Table 1은 이들 실험용 고체윤활제 시료들의 주요 성분을 나타내고 있다. 제조한 시료들의 고체윤활제 성분으로는 이황화몰리브데늄을 주성분으로 하고 흑연을 보조윤활제로 사용하였으며, 바인더 성분으로는 에폭시계와 에폭시-페놀 복합 수지(resin) 2가지 종류를 사용하였다. 에폭시 수지계의 경우는 2차 합성을 통해 실리콘, 우레탄, 아미노 화합물 등으로 변성시킨 것을 사용하였다. 그 외에도 고체윤활제 피막의 물리·화학적 특성을 향상시키기 위하여 산화 및 분산, 광안정제 등의 기타 첨가제들을 첨가하였다. 이황화몰리브데늄 입자는 순도가 98%, 평균입자 크기가 3~6 μm인 것 그리고 흑연 입자는 탄소 함량이 99% 이상, 평균입자 크기가 4~7 μm인 것을 사용하였다. 이러한 성분들을 셀룰로브아세테이트, 크실렌, 톨루엔, 메틸-에틸-케톤, 알코올 등의 용제중에서 사용된 수지의 종류에 따라 선택적으로 혼합시킨 용제에 넣고 Kady mill 형태의 호모제나이저를 이용하여 용제 내에 균일하게 분포시켜 제조하였다. 고체윤활제 및 바인더 성분인 고형분과 복합용제의 비는 30대 70이 되도록 원액을 제조하였고 시험시편 위에 도포할 때에는 피막의 두께를 고르게 맞추기 편리하도록 원액을 제차 일정한 비율로 동일 용제에 희석하여 사용하였다.

2-2. 시험 방법 및 시편

고체윤활제 피막의 마찰 마모시험 및 평가는 LFW-1 마찰 마모 시험기(ASTM D 2714-88) 및 Failex 시험기(ASTM D 2625)를 병행하여 사용하였다.

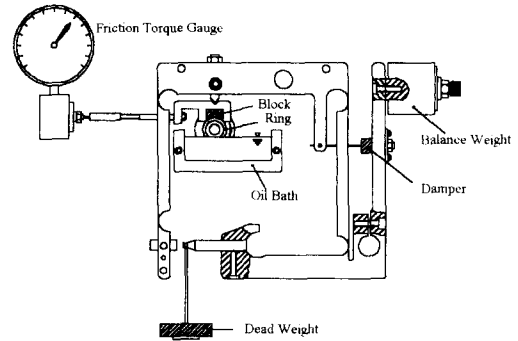


Fig. 1. LFW-1 Friction & Wear testing machine.

LFW-1 마찰 마모 시험기는 기본적으로 고정된 Block이 하중을 받으며 회전하고 있는 원통형의 Ring 과 미끄럼 접촉을 하는 형태의 시험기로서 (Fig. 1 참조), Ring 및 Block의 재질은 SM45C 강(steel)을 사용하였다. Ring은 외경이 약 35 mm이며 850℃에서 열처리한 후 유냉과정을 거쳐서 경도가 HRc 52~57 정도이고, 직육면체 형태의 Block은 길이가 약 6.3 mm로서 850℃에서 열처리한 후 수냉과정을 거쳐 경도를 HRc 45~47 정도가 되도록 하였다. 상기 시험재료들은 고체윤활제를 코팅하기 전에 초음파 세척기 내에서 TCE (Trichloro-ethylene) 와 n-Hexane 등의 용제를 이용하여 탈지 및 세척처리를 하였다. 고체윤활제를 도포시키는 Ring의 표면은 윤활제의 부착성을 향상시키기 위하여 전처리 작업으로 샌드-브라스트 처리를 행하였다. 샌드-브라스트는 평균 120 메쉬 크기의 알루미늄 입자를 사용하였으며, 작업 후의 표면 거칠기 크기는 약 1.0 μm 정도이었다. Ring과 미끄럼 접촉을 하는 Block의 접촉면은 샌드페이퍼(#320)를 이용하여 표면 거칠기가 약 0.3 μm (Ra)이 되도록 무방향으로 연마하였고, 윤활제를 표면에 도포하지 않았다. 고체윤활제의 도포는 침지(dipping) 법을 사용하였다. 윤활제가 도포된 시편은 상온의 대기분위기에서 약 2시간 이상 건조하여 용제를 휘발시킨 후 각각 사용된 바인더 수지의 종류에 따라 열처리로 내에서 150~170+5℃ 범위의 온도조건 하에서 약 1시간 정도 가열하고 서서히 냉각시키는 과정의 열경화 처리를 행하였다. 피막의 두께는 코팅하기 전후의 Ring의 외경 차이로써 측정하였으며, 열경화 처리를 끝낸 시험시편에서 코팅된 고체피막 윤활제의 두께가 약 15+5 μm 정도이었다.

LFW-1 시험 조건으로서 회전속도는 72 rpm, 미끄럼속도는 0.13 m/s 이었으며, 고체윤활 피막의 시험은 초기 1분동안 13.6kg (30lb) 에서 길들이기를 거친 후

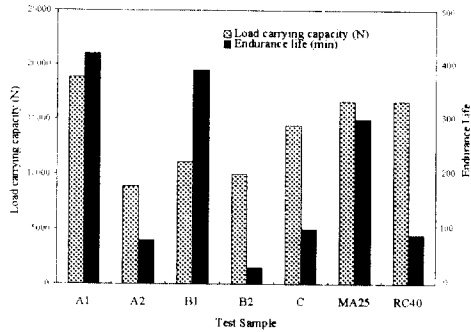


Fig. 2. Falex test results of various MoS₂ bonded films

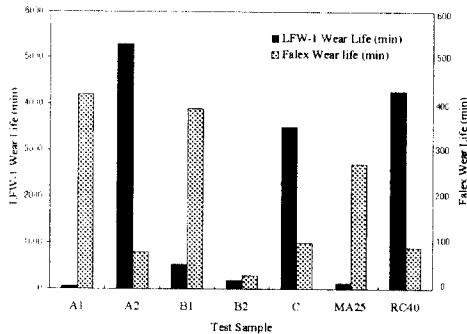


Fig. 3. LFW-1 & Falex test results of various MoS₂ bonded films.

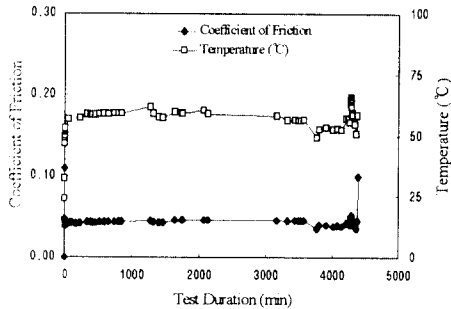


Fig. 4. A LFW-1 test result showing both coefficients of friction and surface temperatures of the block surface.

283 kg (630lb) 의 고정된 하중에서 피막이 파괴될 때까지 시험하였다. 윤활피막의 파괴는 마찰계수 값이 0.1 이상이 되었을 때를 기준으로 설정하였다. 시험중 표면온도의 측정은 비접촉식 적외선온도계(Kyence corp. 제품)

를 이용하여 측정하였으며, 온도의 측정 부위는 Block의 중앙 접촉부로부터 약 0.2 mm 떨어진 곳이었다. 사용된 적외선온도계는 측정거리가 54 mm이며 초점의 최소 구경은 0.2 mm, 측정온도 범위 0~500°C, 측정 정도가 0.1 °C 이었다. 실험은 실온의 대기조건하에서 행하였으며, 일정한 습도 조건 (상대습도 50±5 %) 을 유지하기 위하여 제습기 및 가습기를 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 Falex 시험에 의한 대표적인 고체윤활 피막들의 내구수명 (Endurance life) 및 내하중성 (Load carrying capacity) 측정 결과이다. 상기 시료들은 Table 1 중에서 고체윤활제 성분과 바인더 수지의 비가 크고 작은 것에 대하여 제조회사 (A, B, C) 별로 혹은 제조품 (MA25, RC40) 중에서 대표적인 것을 선택한 것이며, 시험방법 및 시편은 ASTM D 2625-60 규격에 의하였다. Fig. 2의 시험결과를 살펴보면 시료 종류에 상관없이 바인더의 함량이 상대적으로 낮은 시료들의 내구수명이 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 반면에 내하중력 시험결과에 있어서는 바인더의 함량과는 거의 무관한 결과를 보이고 있다. 이는 Falex 시험에서 나타난 고체윤활 피막의 내구수명은 바인더보다는 고체윤활제 성분들의 조합특성이 우위적으로 작용하고 있는 반면에, 내하중성은 바인더의 함량보다는 종류에 더 밀접한 관계가 있음을 보여주고 있다.

Fig. 3은 상기 Fig. 2에서와 동일한 시료들에 대하여 LFW-1 시험기를 이용하여 윤활제의 내구수명을 나타낸 결과로서 Falex 시험 결과와 비교하여 나타난 것이다. LFW-1 시험에서 제품 B2를 제외한 대부분 윤활제들의 결과에서 전반적으로 수지의 함량이 높은 것이 적은 시료에 비해 내구수명이 우수한 것으로 나타났다. 이와 같은 특징은 Falex 시험결과와 서로 상반되는 것으로서, 고체윤활 피막의 성능이 시험기 변화에 따라 가장 좋은 성능결과를 가질 수 있는 고체윤활제와 바인더 성분의 최적의 조성비율이 서로 다르다는 것을 알 수 있다.

LFW-1 시험 시에 나타난 고체윤활 피막의 마찰 및 마모거동들도 Falex 시험결과[8]와 큰 대조적으로 나타났다. Fig. 4는 LFW-1을 이용하여 A2 윤활제의 내구수명 시험결과 예로서, 시험시간에 따른 마찰계수 및 표면온도의 변화를 보이고 있다. Falex 시험시 접촉 표면의 온도가 약 100°C 정도로 높았고, 윤활 피막의 파손이 이와 같이 높은 마찰열에 의한 산화발생에 의한 반면에[8], LFW-1 시험시의 표면의 온도는 대략 50~60°C 정도로 상대적으로 낮게 측정되었으며 피막의 마모거동도 약간 다르게 발생하였다. 마찰계수는 초기 길들이기 과정에서

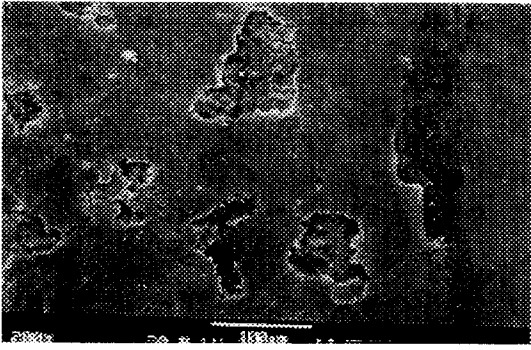


Fig. 5. A SEM micrograph of a worn film surface.

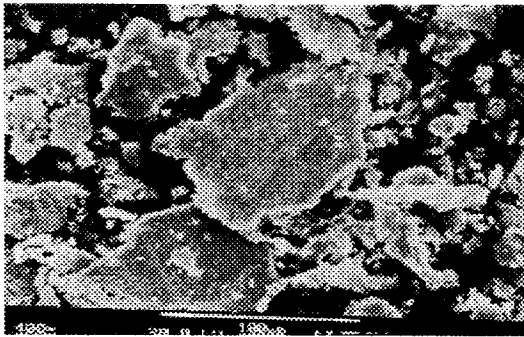


Fig. 6. A SEM micrograph of plate-like wear particles.

약 0.1 까지 상승했다가 피막이 매끄럽게 변하면서 급격히 감소하여 피막이 파괴되기 직전까지 안정구간에 걸쳐 약 0.01~0.05 정도를 유지하였다. 시험 종료 후 Ring의 표면의 모습은 Fig. 5와 같았다. 피막의 표면에 크랙이 발생되어 있으며 피막의 일부가 전형적인 피로마모의 결과로서 파손된 모습을 보이고 있다.

Fig. 6은 윤활피막으로 부터 발생된 마모입자의 특징적인 모습으로서, 시료 종류에 따라서 마모물의 발생은 사용된 바인더의 종류에 따라 큰 차이를 보였다. 즉 시료 MA, RA, A1, B1의 경우는 초기 길들이기 과정에서 약 절반 정도가 마모되는 반면에, 그 외의 시료들은 시험시간의 경과에 따라 마모가 선형적으로 증가되었다. 이러한 결과는 사용된 바인더 수지의 응착 특성 및 강도와 밀접하게 관계된 현상으로 추측된다. 마모입자의 발생은 비교적 시험 초기에서는 $5\mu\text{m}$ 이하의 작은 입자들이 마모되어 간헐적으로 발생되었으나, 후반부에는 마모가 증가되는 추세를 보이며 입자 크기도 커져서 100

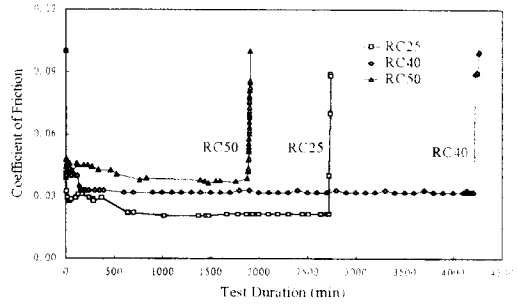


Fig. 7. LFW-1 test results showing coefficients of friction and wear life with respect to the resin contents.

μm 이상의 것도 존재하였다. 후반부에 발생한 입자들은 Fig. 6에서와 같이 표면이 매우 매끄러우며 판상으로 내부에 크랙(crack)이 존재하는 전형적인 피로마모입자의 형태로서 상기 파손된 피막의 표면 형상과 잘 일치되는 모습이었다.

Fig. 7은 Fig. 3의 LFW-1 시험 결과에서 우수한 내구수명 결과를 나타낸 시료 RC40을 대상으로 수지의 함량변화에 따른 LFW-1 시험기에서의 내구수명 시험과 마찰계수의 변화이다. 바인더의 함량을 25 %에서 40 %로 증가시켰을 때 내구수명이 약 2700 분에서 약 4200 분 정도로 증가되었으나, 50 %로 증가시켰을 때에는 오히려 감소하는 결과를 나타내었다. 상기의 결과는 바인더의 함량이 상대적으로 증가됨에 따라 상대적으로 윤활피막의 강도가 증가되고 고체윤활 피막의 접착력이 향상되나, 이의 비가 너무 높으면 고체윤활제 성분의 양이 상대적으로 줄어들어서 피막의 윤활성이 급격히 저하되는 결과로서 사료된다. 이와 유사한 결과는 Fig. 2에서도 볼 수 있었는데, 바인더를 60 % 함유하고 있는 B2 시료가 25 %의 B1 윤활제보다 짧은 내구수명을 나타내는 것도 같은 원인으로 생각된다. 따라서 수지 RC의 경우, LFW-1 시험기에서는 피막의 윤활성과 접착성 및 강도 등과 관련하여 최적의 고체윤활제와 수지 바인더 조성 비율이 Falex 시험 시에 비해 상대적으로 높으며 그 비는 대략 40 % 정도임을 알 수 있었다.

Fig. 8은 고체윤활 피막에 사용된 바인더의 종류(MA40, RA40, RB40, RC40)에 따른 LFW-1 시험기에서의 내구수명 및 평균 마찰계수의 크기를 비교한 결과이다. 내구수명의 결과는 아미노계(Amino) 화합물로 변성시킨 RC40의 경우가 가장 좋은 결과를 나타내었으며 그 다음으로 실리콘계 화합물로 변성시킨 RA40, 그리고 에폭시와 페놀 수지를 복합시킨 MA40 등의 순으로 낮게 나타났다. 수지 종류에 따른 윤활제의 평균 마찰계수

Table. 2. A Scratch test results of various resins

Sample	Coefficients of Friction	Critical Load (N)
MA	0.37	12.8
RA	0.25	13.3
RB	0.33	8.4
RC	0.27	12.4

의 결과는 MA40의 경우 길들이기가 끝난 후에도 안정화 되지 않고 지속적으로 증가하는 추세를 보였으며, RA40은 약 0.05, RB40 및 RC40은 약 0.03 정도로 매우 낮은 마찰계수가 측정되었다. 바인더 수치 변화에 따른 고체윤활 피막 시료들의 응착력 (adhesion force) 를 비교 평가하기 위하여 Scratch test 를 행하였으나, 피막 내 고체윤활제 입자들에 의한 복합적인 영향에 의하여 선명한 결과를 얻을 수 없었다.

따라서 상기 수치만을 강 표면에 코팅하여(두께: 약 15 μ m) Scratch test를 행하였으며 Table. 2의 결과를 얻을 수 있었다. 사용한 Scratch tester (CSEM Co. Revetest는 최대 수직하중 30 N, 미끄럼속도 0.20 mm/s, 하중부가 속도 0.79 N/s 의 조건으로 시험하였으며, 피착재의 재질 및 경도는 LFW-1 시험기용 Ring 시편과 동일하였다. 상기 결과에 의하면 평균 마찰계수의 경우는 수지의 종류에 따라 MA>RB>RC>RA 순으로 낮아졌으며 피막이 파괴되기 시작하는 임계하중 (critical load)은 RA>MA>RC>RB 순으로 나타났다. 이와 같은 수치 종류에 따른 임계하중의 차이는 수지의 가교밀도 (cross linking density) 와 밀접한 관계를 지니고 있는 것으로 사료된다. 즉 수지의 가교밀도를 예측하기 어려운 MA40 수치 (에폭시+페놀수지) 를 제외하고, 본 연구를 통하여 기본 에폭시 수지를 2차 합성에 의해 변성시킨 세 가지 수지의 경우는 이론적인 구조상 예측되는 가교밀도가 RA40> RC40>RB40 순이었다.

상기의 수지의 응착력 측정결과를 전술한 Fig. 8의 결과와 상호 대비하면 매우 흥미로운 점들을 발견할 수 있었다. 가교밀도가 상대적으로 높은 RA40의 경우는 초기 길들이기 단계에서 부서져 나오는 취성파괴 형태의 마모 양상을 보였으며 마찰계수도 비교적 높고 윤활피막의 내구수명도 낮은 특징을 나타내었다. 또한 수지의 가교밀도가 지나치게 높아서 고체윤활 피막 내의 고체윤활제들이 미끄럼 방향으로 재정렬 (reorientation) 하는 것에 대한 저항성이 높았을 것으로 사료된다. 반면에 RB40의 경우에는 마찰계수가 안정되기까지의 초기단계에서는 마모의 발생량도 극히 적고 마찰계수도 낮게 유지되었으나, RC40에 비교하여 내구수명이 낮은 결과를 보였는데, 이는 수지의 기계적 강도가 상대적으로 떨어

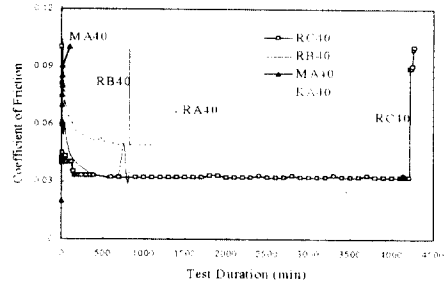


Fig. 8. LFW-1 test results showing coefficients of friction and wear life with respect to the resin types

지는 것에서 비롯된 결과로 사료된다. 상기 결과는 Falex 시험의 결과에서 RC40에 비해 내하중성이 낮았고, Scratch 시험에서도 가장 낮은 임계하중의 결과를 나타낸 것으로 확인할 수 있었다. Scratch 시험결과에 의하면 마찰계수가 낮고 임계하중이 높은 RA 수지가 고체윤활 피막으로 적합한 것으로 평가되었지만, LFW-1 시험기에서의 내구수명 결과는 RC 수지가 가장 좋은 결과를 나타내었다. 이러한 결과는 수지의 단순한 물리적 성질이 우수하다고 해서 이를 사용한 고체윤활 피막이 우수한 성능을 나타내는 것은 아니며, 고체윤활제 사용조건에 따라 윤활성과 집착성 및 강도 등과 관련하여 수치 종류를 최적으로 선정해서 사용해야 한다는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

- 1) 고체윤활 피막의 내구수명을 평가하도록 규정하고 있는 ASTM D2714와 ASTM D2625 규격에 의하여 MoS₂계 고체윤활제를 시험한 결과 각 규격에서의 시료들간의 평가순위가 서로 상반되게 나타났다.
- 2) 고체윤활 피막의 내구수명은 사용되는 집착조건에 따라 그를 구성하는 고체윤활제와 바인더 수지의 최적의 성분비가 존재하고, 사용된 수지의 종류에 따라 많은 차이가 있는 것으로 나타났으며, 특히 LFW-1 시험에서의 MoS₂계 고체윤활 피막의 마찰마모 특성은 Falex 시험에 비하여 바인더로 사용된 수치성분의 물성에 더 큰 영향을 받는다.
- 3) 마찰열의 발생이 비교적 낮은 LFW-1 시험기를 이용한 내구성시험에서는 고체윤활 피막의 바인더로서 에폭시/페놀 복합수지보다는 에폭시 수치계가 상대적으로

- 로 우수하게 평가되었다.
- 4) LFW-1 시험에서의 바인더 수지의 종류 및 함량에 따른 MoS₂ 계 고체윤활 피막의 내구수명 시험에서 야미노계 변성에폭시 수지를 40 % 사용한 윤활제가 가장 우수한 윤활특성을 나타내었다.

13. ASTM D 2625-69, "Standard Test Method for Endurance(wear) Life and Load-Carrying Capacity of Solid Film Lubricants".
14. ASTM D 2714-68, "Calibration and Operation of the Alpha Model LFW-1 Friction and Wear testing Machine".

참 고 문 헌

1. S.F. Calhoun, F.S. Meade, G.P. Murphy and R.L. Young, "Factors Affecting the Performance of Resin Bonded", Lub. Eng., March, pp. 97, 1965.
2. W.J. Bartz, "Some Investigation on the Influence of Particle Size on the Lubricating Effectiveness of Molybdenum Disulphide", ASLE Trans., 15, No. 3, pp. 207, 1972.
3. W.O. Winer, "Molybdenum Disulphide as a Lubricant: a Review of the Fundamental Knowledge", Wear, 10, pp. 422, 1967.
4. M.N. Gardos, "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. M. Matsunaga and T. Nakagawa, "Frictional Behavior of Various Kinds of Molybdenum Disulfide", Proc. 2nd Int. Conf. on Solid Lubr., ASLE SP-6, pp. 45-50, 1978.
6. F.G. Fischer, A.D. Cron and R.G. Huber, "Graphite and Molybdenum Disulphide Synergisms" NLGI, March pp. 1-18, 1982
7. Francis J. Clauss, Solid Lubricants and Self-Lubricating Solids, Academic Press Inc., 1972.
8. A.R. Lansdown, Molybdenum Disulphide Lubrication, European Space Agency Report ESA CR-764, 19768.
9. A.R. Lansdown, Molybdenum Disulphide Lubrication, European Space Agency Report ESA CR-2261/74, 19769.
10. Robert M. Gresham, "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 마찰마모 특성에 관한 실험적 고찰", 한국윤활학회지, 제12권, 제1호, pp. 15-21, 1996.
12. 윤의성, 공호성, 한홍구, 오재웅, "접착형 MoS₂ 고체 윤활피막이 코팅된 감속기의 동력전달효율과 소음 특성에 관한 실험적 고찰", 한국윤활학회지, 제12권, 제 3호, pp. 107-114, 1996.