

방청 및 내마모 특성이 향상된 자동차 휠 조인트용 MoS₂계 고체 피막 윤활제

한흥구 · 공호성 · 윤의성 · 권오관

한국과학기술연구원 트라이볼로지 연구센터

An Experimental Study on the Anti-corrosion and Anti-wear Characteristics of MoS₂ Bonded Films for Automotive Wheel Joints

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

Tribology Research Center, KIST

Abstract – Friction, wear and corrosion characteristics of various MoS₂ bonded film lubricants were investigated to apply them to automotive wheel joints. MoS₂ bonded film lubricants were formulated by combinations of several additives and binders, and they were coated onto the pre-treated surfaces of specimens. Friction and wear characteristics were evaluated with Falex pin & vee-block test and LFW-1 block-on-ring test. For the corrosion resistant characteristics of the films, salt solution spray corrosion tests were performed. Results showed that MoS₂ bonded films containing both inorganic and organic corrosion-resistant additives yielded a synergy effect on anti-corrosion resistance. Also, binders having the better water-proof and thermal stability showed the lower friction and higher corrosion resistance.

Key words – anti-corrosion, anti-wear, bonded film, friction, wear.

1. 서 론

이황화몰리브덴(MoS₂) 재료 자체가 지니고 있는 우수한 자기윤활성 때문에 기계요소의 내마모성을 향상시키기 위한 여러 가지 형태의 윤활제로 이용되어 왔다. 그러나 MoS₂는 기본적으로 황(sulfur)을 분자구조 내에 함유하고 있기 때문에 사용되는 분위기에 따라 간혹 금속의 부식을 가속화시키는 단점이 있는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 MoS₂ 고체피막윤활제의 부식성과 관련된 연구는 1960년도 초반에 미국에서 미사일 발사대에 고체피막 윤활제를 적용한 부분에서 부식 문제가 발견되면서부터 시작된 이후로 현재까지 광범위하게 많은 연구가 진행되고 있다[1-6].

고분자 수지를 결합체로 사용하는 피막접착형(bonded film) 고체윤활제는 기본적으로 내 부식성이 높으며, 바인더의 함량을 증가시킴으로서 내부식성을 증가시킬 수 있으나[5], 재료의 보호 및 장식을 목적으로 하

는 일반 페인트 도료에 비해서는 윤활제 성분인 MoS₂의 구성비율이 높을 뿐 아니라, 최적의 윤활 성능을 나타내기 위한 도막두께가 도료의 경우(50-200 μm)보다 매우 얇기(5-15 μm) 때문에 기본적으로 우수한 내부식성을 지니기에는 어려움이 수반된다[1]. 따라서, 이를 해결하기 위하여 산화아연(ZnO)을 비롯해서 인산아연(Zn₃(PO₄)₂), 산화안티몬(Sb₂O₃), 인산납(PbO), 기타 방청제 등을 첨가제로 사용하여 내부식성을 향상시킨 연구결과들을 볼 수 있다[7,8].

최근 들어 피막접착형 고체윤활제는 자동차를 비롯해서 주요 산업기계 전반에 걸쳐 폭넓게 이용되면서 그의 이용목적에 따라 우수한 윤활특성 뿐만 아니라 내부식성을 요구하는 경우가 많아지고 있다. 예를 들어 교량의 체결용으로 이용되는 특수 볼트-넛트 혹은 자동차의 휠 부분의 동력전달용 볼-스터드(ball-studs) 등과 같은 요소는 항상 외부로부터 수분을 포함한 각종 오염물질의 유입이 용이한 곳에서 사용되기 때문

에 우수한 윤활성과 아울러 특히 방청성이 함께 요구된다. 참고적으로 미국의 G사에서는 휠 조인트의 프레팅 마모(fretting wear)개선 및 방청을 목적으로 사용하는 피막접착형 고체윤활제의 요구성능으로서, 마모 내구수명의 경우 Falex 시험에서 1000 파운드(lb) 하중에서 최소 200분 이상이어야 하며, 염수분무 시험에서는 최소 336 시간동안 부식의 발생이 없어야 할 것을 제시하고 있다. 이와 같이 부식성 환경 분위기에서 사용되는 피막접착형 윤활제의 경우는 기존의 윤활만을 목적으로 하는 윤활제의 조성과는 달리 방청첨가제에 커다란 영향을 받게 된다.

최근 저자들은 피막접착형 고체윤활제를 자동차의 휠 조인트 부품에 프레팅 마모개선 및 방청을 목적으로 적용하기 위한 연구에서, 방청첨가제 성분에 의하여 피막의 윤활성이 급격히 감소되는 것을 발견하였다. 또한 윤활특성을 저해하지 않는 범위에서 방청성을 효과적으로 부여하기 위해서는, 적절한 결합제의 선택을 비롯해서 피막윤활제 조성의 구성 및 윤활성의 저하를 최소화하기 위한 최적의 방청 첨가제의 적용 등이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

따라서 본 논문에서는 자동차의 휠 조인트 부품을 대상으로 우수한 방청성을 지닌 피막접착형 고체윤활제의 개발을 위하여, 방청첨가제 및 결합제의 종류에 따른 고체피막 윤활제의 윤활성 및 방청성의 관계, 그리고 금속표면의 전처리 방법에 따른 고체피막 윤활제의 방청성의 변화 등에 대하여 연구하였다.

2. 피막접착형 고체윤활제의 제조

시험 대상의 피막접착형 고체윤활제는 본 연구에서 직접 합성하여 사용하였다. 시료제조에 이용된 고체윤활제 성분은 MoS_2 를 주성분으로 하고 보조윤활제로서 산화안티몬(Sb_2O_3)과 플루오르화-탄화수소(fluorinated hydrocarbon)를 사용하였다. 결합제 성분으로는 열경화성 에폭시수지를 기본 성분으로 하고 여기에 페놀수지를 복합시킨 것과 아미노화합물 및 실리콘화합물 등을 각각 반응시켜 변성한 수지들을 사용하였다. 방청첨가제의 경우는 무기 및 유기물의 첨가제를 공동으로 이용하였으며, 무기물 첨가제로서는 기존의 도료산업에서 방청제로 가장 폭넓게 사용하는 스트론튬크로메이트(SrCrO_4)를 비롯해서 산화아연과 인산아연의 혼합물, 인산납(lead phosphite) 등을, 유기물 첨가제로서는 역시 기존의 도료에 널리 사용

되는 소수성 설펜산의 아연염(hydrophobic zincsulfonate)을 비롯해서 하이드록시페놀 화합물(hydroxy phenol compound) 및 부틸하이드록시톨루엔(butyl hydroxy toluene) 등을 이용하였다. 그 외에도 고체윤활피막의 물리·화학적 특성을 향상시키기 위하여 산화 및 분산 안정제, 커플링제 등의 첨가제들을 일정 비율로서 사용하였다. MoS_2 입자는 순도가 98%, 평균입자 크기가 3-6 μm 인 것 그리고 보조 윤활제를 비롯한 각종 방청첨가제 등은 99% 이상의 시약을 사용하였으며, 그의 입자크기는 5 μm 이하의 것을 사용하였다. 시료의 제조는 결합제인 수지의 종류에 따라 크실렌(xylene), 톨루엔(toluene), 메틸에틸케톤(methyl ethylketone), 메틸이소부틸케톤(methyl isobutyl ketone), 셀룰로브아세테이트(cellosolve acetate), 부틸알코올(buthyl alcohol) 등의 용제 중에서 선택적으로 일정 비율로 혼합용제 속에 수지를 용해시킨 후 상기의 성분들을 순차적으로 넣고 캐디밀(kady mill) 형태의 호모게나이저를 이용하여 균일하게 분산시켜 완성하였다. 건조피막 내의 결합제 성분은 같은 목적으로 사용되고 있는 상용화 된 제품과 동일하게 건조 고형분 비율로 중량비 45%가 되도록 하였으며, 시료용액에서 고체윤활제 및 결합제, 방청제 등의 고형분과 용제의 중량비가 40대 60이 되도록 원액을 제조하였고, 시험시편 위에 도포 할 때에는 피막의 두께를 고르게 맞추기 편리하도록 원액을 일정한 비율로 동일 용제에 희석시켜 사용하였다.

3. 시험방법 및 시편

3-1. 윤활 시험

피막접착형 고체윤활제의 윤활 특성의 평가는 LFW-1 시험기(ASTM D-2714)와 Falex 시험기(ASTM D-2625)를 국제적인 표준 시험기로 이용하고 있는데, 본 연구에서도 두 가지 시험기를 병행하여 사용하였다[9,10]. 내구수명의 측정은 LFW-1 시험의 경우 하중이 630 lb(max. Hertz contact stress: 950 MPa), 접촉면에서의 미끄럼 속도가 약 0.13 m/s로 하였으며, Falex 시험에서는 하중이 1000 lb(max. Hertz contact stress: 1460 MPa), 접촉면에서의 미끄럼 속도가 약 0.1 m/s인 조건에서 각각 시험하였다. LFW-1 및 Falex 시험에서 시편의 재질 및 시험 방법 등은 선행된 연구와 동일하게 행하였다[11,13].

LFW-1 시험에서 링(ring)의 표면은 윤활제와의 부

착성을 향상시키기 위하여 전처리 작업으로 샌드브라스트 처리를 행하였으며, 샌드브라스트는 평균 120 메쉬 크기의 알루미나 입자를 사용하였고, 작업 후의 표면 거칠기 크기는 약 1.0 μm(Ra) 정도였다. 링과 미끄럼 접촉을 하는 블록(block)의 접촉면은 샌드페이퍼(#320)를 이용하여 표면 거칠기가 약 0.3 μm(Ra)이 되도록 무방향으로 연마하였으며, 고체윤활제는 도포하지 않았다. 고체윤활제 시료의 도포는 침지(dipping)법을 사용하였으며, 도포된 시편은 상온의 대기 분위기에서 약 2시간 이상 건조하여 유기 용제를 휘발시킨 후 각각 사용된 결합제 수지의 종류에 따라 강제 대류형 오븐에서 150-170°C의 온도 조건으로 1시간 동안 가열하고 서서히 상온까지 냉각시키는 과정의 열경화 처리를 행하였다. 피막의 두께는 도막 두께 측정기(Kett사 제품, model: LE-200C)를 이용하여 측정하였으며, 경화 처리가 완성된 시편의 고체 윤활 피막의 두께는 약 15±5 μm 정도로 균일하였다.

Falex 시험에 있어서는 각 시편들의 세정 및 전처리, 피막 코팅 등은 LFW-1 시험에서와 동일한 방법으로 하였으나, 이 경우는 핀(pin)과 블록 시편 모두를 샌드-브라스트 처리를 행하고 윤활제를 도포하였다.

시험중 표면온도의 측정은 비접촉식 적외선 온도계를 이용하여 측정하였다. LFW-1 시험에서는 시편 블록의 중앙 접촉부로부터 약 0.2 mm 떨어진 곳을, Falex 시험에서는 회전하는 시편 핀의 중앙 부위의 온도를 각각 측정하였다. 사용된 적외선 온도계(Kyence사 제품)는 측정 거리가 54 mm이며 초점의 최소

구경은 0.2 mm, 측정 온도 범위 0~500°C, 측정 정도가 0.1°C이었다. 실험은 실온의 대기 조건하에서 행하였으며, 일정한 습도 조건 (상대 습도 50±5%)을 유지하기 위하여 제습기 및 가습기를 병행하여 사용하였다.

고체윤활피막의 수명평가는 LFW-1 시험의 경우 마찰계수 값이 0.1 이상을 넘어서는 시점까지의 시험시간을 기준으로 하였으며, 초기의 값이 0.1을 넘는 경우는 0.15를 기준으로 하였다. 그리고 Falex 시험에서는 마찰토크의 크기가 1.13 N·m 이상으로 급격히 상승하거나 Seizure의 발생으로 구동모터가 정지하는 점을 기준으로 하여 내구수명 혹은 내 하중성의 한계로 설정하였다.

3-2. 방청 시험

고체윤활제의 방청성 평가는 금속재료 또는 도금, 무기피막, 유기피막 등을 코팅한 금속재료들에 관해 내식성을 평가하도록 규정된 KS D-9502 '염수 분무 시험 방법'에 의하여 시험하였다[14]. 염수 분무 시험 장치는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 분무장치를 비롯해서 시험용 염용액 탱크, 시험편 유지기, 분무액 채취용기, 온도조절 장치 등으로 구성되어 있으며, 일정한 온도 조건에서 규정 농도의 염수를 분무실 내에 연속적으로 분무하면서 시편의 방청 상태를 주기적으로 검사하는 시험기이다. 본 연구에서 사용된 시편은 60×80×1.0 mm 크기의 KS-SM 45C 강판 및 실제 자동차의 휠 조인트 부품인 볼-스터드 두 가지 모두를 이용하였으며, 시편의 표면은 상기 윤활성 시험에서와 같은 목적으로 샌드브라스트 처리

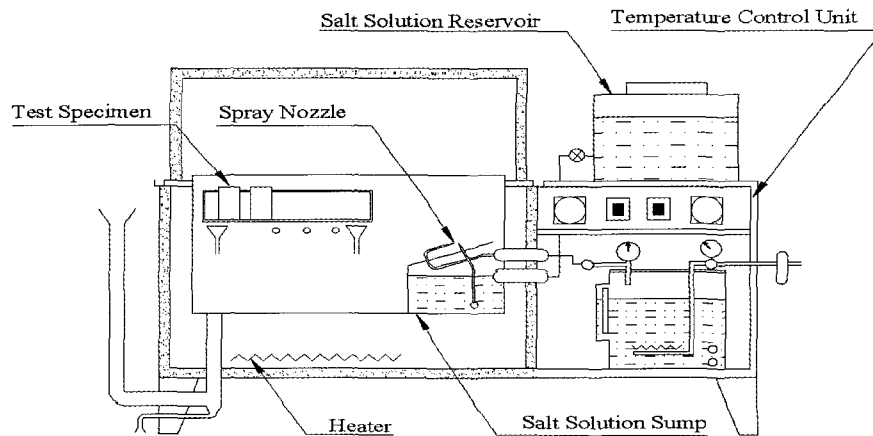


Fig. 1. A view of salt solution spray corrosion tester.

를 하여 동일한 표면상태가 되도록 하였다. 고체윤활제의 코팅은 분사법(spray)을 이용하였으며, 윤활피막의 두께 및 시편의 건조와 열처리 등은 윤활성 시험의 시편과 동일하게 하였다.

또한 표면 처리 방법에 따른 방청효과 시험은 샌드블라스트 처리만을 한 것을 비롯해서 인산아연피막 처리를 한 것, 에치프라이머(etch primer-1, 국산 S사 제품)처리를 한 것 등에 대하여 시료인 고체윤활제를 코팅한 후 시험하였다.

시험용 염수용액은 증류수에 5%(w/v) 농도로 조정하였으며, 이때의 비중은 약 1.031 정도였다. 염수의 분무를 위한 공기압력은 약 1.5 kg/cm²이 되도록 하였으며, 분무실의 온도는 약 35°C로 유지된 상태에서 시험하였다.

고체윤활 피막의 방청성능 평가는 시편 위의 검사면적 범위 내에 발청이 시작될 때까지의 경과 시간을 기준으로 하였다.

4. 시험결과 및 고찰

Fig. 2는 단일 에폭시수지를 결합제로 사용하고 MoS₂와 산화안티몬을 고체윤활제의 기본 성분으로 사용한 윤활제 조성에서 무기물 방청첨가제의 종류에 따라 피막윤활제의 윤활성 및 방청성의 변화를 시험한 결과로서, Fig. 2 (a)는 Falex 및 LFW-1 시험에 의한 내하중성(load carrying capacity) 및 내구수명(endurance life) 측정 결과 그리고 Fig. 2 (b)는 염수분무시험에 의한 방청성 시험결과를 각각 나타낸 것이다. 내하중성 및 내구수명을 시험한 윤활성의 시험은 ASTM 시험방법에 따라 4회의 시험결과에 대한 평균값을 나타낸 결과이며, 방청성 시험의 경우는 코팅된 시편표면에 발청이 시작되는 시점까지의 경과 시간을 나타낸 것이다.

시료 A는 방청첨가제를 사용하지 않은 경우이며, 시료 B는 산 수용체(acid acceptor) 기능의 첨가제인 이염기성 아인산납염(dibasic lead phosphite), 시료 C는 비산화성 부동태화제(nonoxidizing passivator) 기능의 스트론튬크롬산염(strontium chromate), 시료 D는 역시 산 수용체 기능의 산화아연과 인산아연염의 혼합물(2:8)을 방청첨가제로서 사용했을 때의 결과를 나타낸 것이다. 상기 결과에 의하면 윤활성 시험의 경우, 방청첨가제를 첨가함에 따라 상대적으로 내하중성 및 내구수명이 현저히 감소되는 추세를 보이고

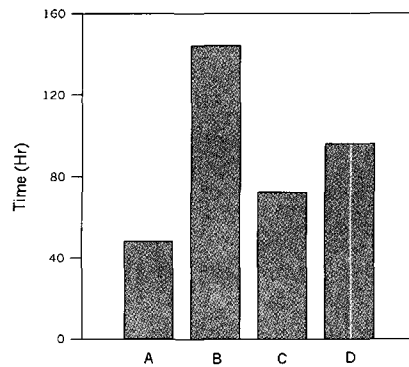
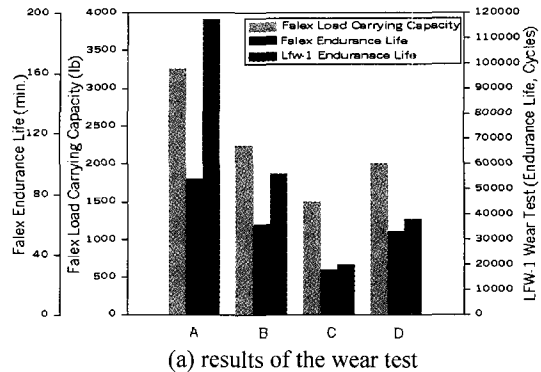


Fig. 2. The results of wear and salt solution spray corrosion test for the MoS₂ bonded-film lubricants of inorganic anti-corrosion additives (A: none, B: dibasic lead phosphite compound, C: strontium chromate, D: zinc oxide and zinc phosphate complex).

있으며, 스트론튬크롬산염>산화아연과 인산아연의 혼합물>아인산납염 등의 방청첨가제 순으로 감소폭이 큰 것으로 나타났다. 윤활제의 조성에 방청첨가제가 혼합됨에 따라 고체윤활제 성분의 양이 상대적으로 줄어들면서 피막의 윤활성이 어느 정도 감소되는 것은 예측된 결과이나 상기 결과에서는 윤활성 감소의 폭이 매우 큼을 알 수 있다. 방청시험의 결과에서는 아인산납염을 사용한 윤활제가 가장 방청성이 좋았으며 다음으로 산화아연과 인산아연의 혼합물, 그리고 스트론튬크롬산염 등의 순으로 나타났으며, 대체로 산 수용체 기능의 방청첨가제가 부동태화제 기능의 첨가제보다 좋은 결과를 보였다. 이 결과는 일반적인 페인트 도료의 경우 부동태화제 기능의 스트론튬크롬산염이 우수한 방청성을 나타내는 것으로 알려져 있는 사항과 상이한 점이다. 피막윤활제의 경우는 MoS₂ 성분이 수분의 존재 하에서 분해되면서 발

생되는 산 성분을 수용할 수 있는 기능의 방청첨가제가 보다 우수한 성능을 나타내는 것으로 사료된다. 사용된 무기물 방청첨가제 중에서는 이염기성 아인산납염이 윤활 성능과 방청성에서 모두 좋은 결과를 나타내었다. 이와 같은 결과는 Gabel의 연구[7]에서도 유사한 결과가 나타난 바 있는데, 산 수용체 기능의 방청 첨가제와 비산화성 부동태화제 기능의 방청첨가제를 함께 사용함으로써 방청성에 관한 시너지 효과가 극대화된 것으로 보여진다.

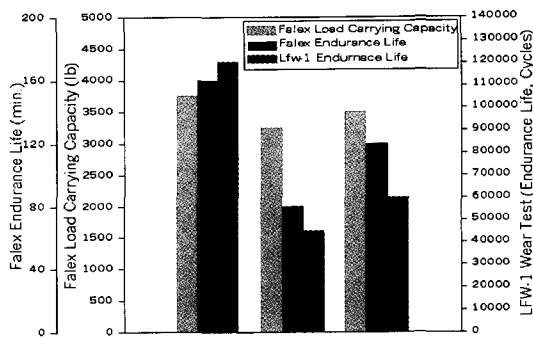
상기 시험결과를 바탕으로 이염기성 아인산납 화합물을 주된 방청첨가제로 사용하고 이에 유기물 방청첨가제의 첨가에 따른 윤활 특성의 변화 및 방청성의 시너지 효과에 관하여 시험하였다. 시험 결과는 Fig. 3과 같다.

상기 시험에서의 윤활제는 실리콘화합물로 변성된

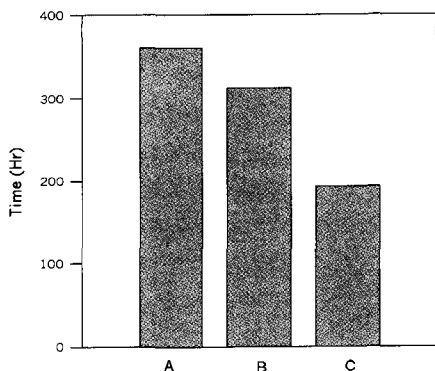
에폭시수지를 결합제로 사용하고 고체윤활제 성분으로는 MoS₂와 산화안티몬 및 플루오르화-탄화수소 화합물들이 사용되었다. 무기물 방청첨가제인 이염기성 아인산납 화합물이 기본적으로 첨가된 윤활제에 유기물 방청첨가제로서 시료 A에는 트리히드록시벤젠 화합물(고체상), B는 소수성 설펜산의 아연염 화합물(액상) 그리고 C는 부틸히드록시톨루엔 화합물(고체상) 등을 각각 첨가하였다. 윤활성 시험의 경우 Fig. 3 (a), 트리히드록시벤젠 화합물이 가장 안정적인 윤활성능을 나타내고 있으며, 다음으로 부틸히드록시톨루엔 화합물, 소수성 설펜산의 아연염 화합물 등의 순으로 나타났다. 이러한 결과들의 해석은 여러 가지 물리화학적인 요인이 복합적으로 작용하므로 매우 어려우나, 사용된 유기물 첨가제들이 모두 유기용매에 용해된 형태로 이용되는 점을 고려하면 윤활제에 사용된 결합제의 물리화학적 특성, 즉 접착력이나 화학적인 안정도, 가교밀도 등과 같은 특성들에 영향을 미치지 때문에 나타나는 결과인 것으로 사료된다. 유기물 첨가제들 중 소수성 설펜산의 아연염 화합물에서 가장 낮은 윤활 성능을 보이고 있는 것도 이 화합물이 결합제의 물리적 특성에 변화를 주는 영향력이 다른 것에 비해 높기 때문인 것으로 보여진다. 반면에 윤활성에서 가장 우수한 성능이 나타난 트리히드록시벤젠 화합물은 일반적으로 오일이나 왁스, 지방, 수지 등의 탄화수소화합물의 고온 산화 안정성을 높이기 위해 많이 사용되는 물질로서, 본 연구에서 산화안정제로 사용된 프로필렌레이트 물질과 매우 유사한 화학적인 구조를 이루고 있다[15]. 따라서 트리히드록시벤젠 화합물이 우수한 윤활 성능을 나타내는 것은 이와 같은 화합물의 구조적 특성과 밀접한 관련이 있는 것으로 사료된다. 방청성 시험 결과 Fig. 3 (b)에서도 트리히드록시벤젠 화합물을 첨가한 경우가 무기물 방청제인 이염기성 아인산납 화합물과의 시너지효과가 가장 높게 나타났으며, 다음으로 소수성 설펜산의 아연염 화합물, 부틸히드록시톨루엔 화합물 등의 순으로 나타났다.

결합제 변화에 따른 방청성의 차이를 알아보기 위하여 저자들이 선행연구[12,13]에서 사용하였던 결합제를 대상으로 결합제 성분만을 고체 피막윤활제와 동일한 두께로 시편에 코팅하여 방청시험을 행하였으며 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

상기 시험결과에서 페놀 화합물로 변성된 에폭시 결합제가 가장 높은 방청성을 지니고 있는 것으로



(a) results of the wear test



(b) results of the salt solution spray corrosion test

Fig. 3. The results of wear and salt solution spray corrosion tests for the MoS₂ bonded-film lubricants (mainly of dibasic lead phosphite additive) with organic anti-corrosion additives. (A: tri-hydroxy benzene compound, B: hydro-phobic zinc salt of sulfonic acid compound, C: butylated hydroxy toluene compound).

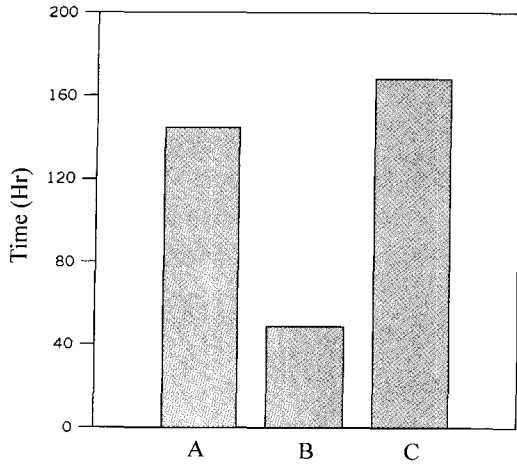
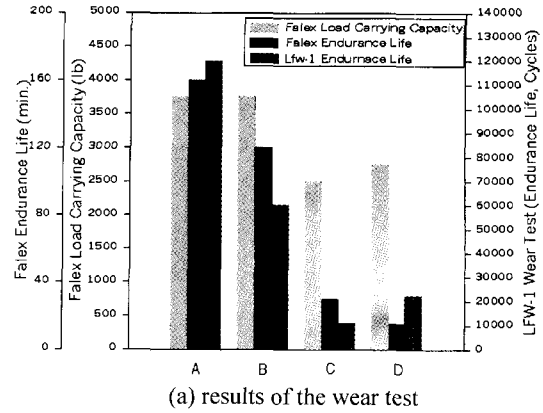


Fig. 4. The results of salt solution spray corrosion test for the specimens with various types of binder resins (A: silicone compound modified epoxy resin, B: amino compound modified epoxy resin, C: phenol compound modified epoxy resin).

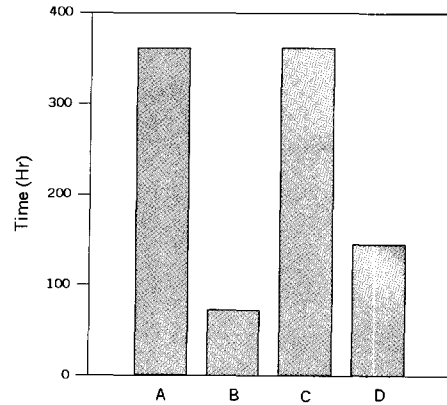
나타났으며, 실리콘 화합물로 변성된 에폭시 역시 양호한 방청성을 보였다. 그러나 아미노 화합물로 변성된 에폭시의 경우는 다른 결합제에 비해 큰 폭으로 방청성이 떨어지는 결과를 나타내고 있다. 이는 결합제가 시편 표면에 형성하는 도막의 강도[13] 및 형태 특성에서 비롯되는 수분에 대한 침투방지 능력이 직접적으로 작용하는 것으로 보여진다. 상기의 결과는 결합제가 고체피막윤활제 조성에서 방청성을 좌우하는 주요 성분임을 잘 나타내고 있다.

Fig. 5는 Fig. 4의 A, B, C 결합제들에 의하여 각각 제조된 고체피막윤활제의 윤활 및 방청성 시험결과들이다. 시료 D는 상용제품으로서 비교 시험한 것이다. 윤활제의 조성은 고체윤활제 성분으로는 MoS₂와 산화안티몬 및 플루오르화-탄화수소 화합물을 사용하였으며, 방청첨가제의 경우는 상기 Fig. 3에서 시너지 효과가 가장 좋게 나타난 이염기성 아인산납 화합물과 트리히드록시벤젠화합물을 사용하였다.

Fig. 5 (a)의 윤활성 시험 결과에 의하면 실리콘 화합물로 변성된 에폭시 결합제를 사용한 피막 윤활제가 가장 좋은 윤활성을 보였으며, 다음으로 아미노 화합물로 변성된 에폭시, 페놀 변성 에폭시수지 등의 순으로 나타났다. 이 결과는 동일한 결합제들로 시험했던 선행 연구[12,13]에서 아미노 화합물로 변성된 에폭시 결합제의 경우가 전체적으로 윤활성이



(a) results of the wear test



(b) results of the salt solution spray corrosion test

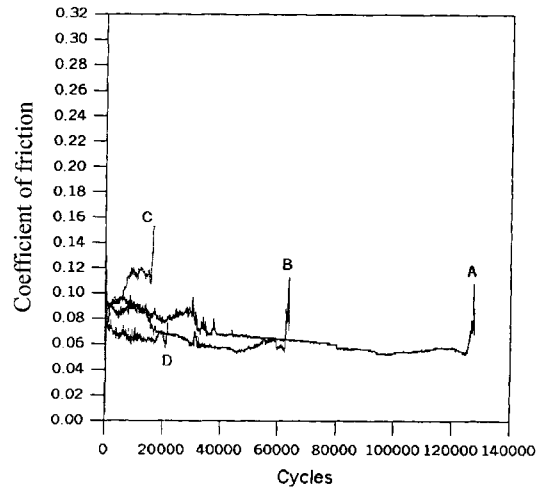
Fig. 5. The results of wear and salt solution spray corrosion test for the MoS₂ bonded film lubricants with different binder resins (A: silicone compound modified epoxy resin, B: amino compound modified epoxy resin, C: phenol compound modified epoxy resin, D: commercial product).

가장 좋게 나타난 결과와는 다른 양상을 보이고 있는데, 이는 전체 윤활제 조성 중 결합제와 방청첨가제의 함량이 증가되면서 상대적으로 윤활성이 저하됨에 따라 높은 열안정성과 접착력을 지니고 있는 실리콘 화합물 변성 에폭시수지가 오히려 윤활성이 좋게 나타나는 것으로 사료된다. 방청성 시험 Fig. 5 (b)의 경우는 Fig. 4에서의 결합제 성분에 대한 방청 시험 결과와 동일한 경향을 보이고 있다. 이는 피막 윤활제의 방청성이 결합제 성분에 보다 크게 의존된다는 것을 단적으로 나타내는 결과이다. 특히 아미노 화합물로 변성된 에폭시수지를 결합제로 사용한 경우에서 방청성이 상대적으로 큰 폭으로 낮게 나타나고 있는 결과는 기본적으로 수지 피막의 내수성이

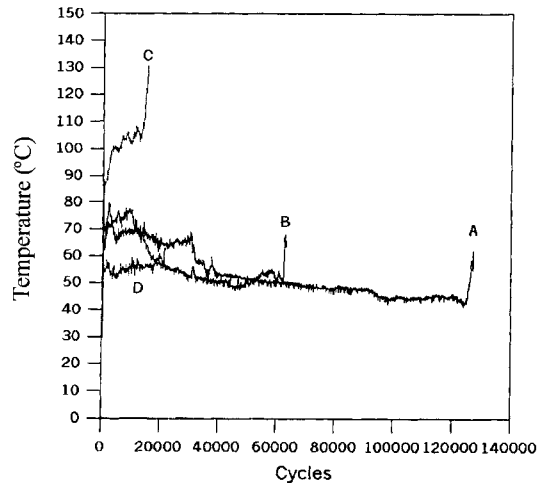
크게 떨어지는 것에 원인이 있는 것으로 사료된다. 상기의 결과들에서 윤활성과 방청성을 동시에 만족하는 피막윤활제는 실리콘 화합물로 변성된 에폭시 수지를 결합제로 사용한 것으로 나타났다. 페놀 화합물로 변성된 에폭시를 결합제로 이용한 경우는 방청성은 좋지만 상대적으로 윤활성이 크게 떨어지는 결과를 보였다. 아울러 자동차 휠 조인트 볼-스터드 용으로 사용되고 있는 상용제품의 시험 결과는 본 연구에서 시험한 시료 A보다 윤활성과 방청성에서 모두 낮은 성능을 지니고 있는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 상기 Fig. 5의 시료들에 대하여 LFW-1 시험기에 의한 내구수명 시험에서의 평균 마찰계수 및 마찰온도를 비교하여 나타낸 것이다. 전체적인 마찰계수 및 마찰온도 값의 경향은 페놀 화합물 변성 >실리콘 화합물 변성>아미노 화합물 변성>제품 D 등의 순으로 나타났다. 실리콘 및 아미노 화합물로 변성된 에폭시수지를 결합제로 사용한 시료 A 및 B의 경우는 초기 길들이기 과정에서의 마찰계수 값이 약 0.08-0.1, 마찰온도가 60-80°C 범위로 비교적 높게 나타났으나, 접촉 회전수가 증가함에 따라 점차적으로 감소하면서 안정화된 구간에서는 마찰계수 값이 약 0.06-0.07, 마찰온도가 50-60°C 정도를 유지하는 모습을 보였다. 반면에 페놀화합물로 변성시킨 에폭시수지를 결합제로 이용한 경우는 초기의 마찰계수 값이 약 0.11 이상으로 상대적으로 높을 뿐만 아니라 마찰온도도 100°C 이상으로 급격히 상승되며 접촉 회전수가 증가할수록 모두 지속적으로 증가되는 추세를 나타내었다. 전술한 Fig. 5의 결과에서 페놀 화합물로 변성된 에폭시의 경우 윤활성이 가장 낮게 나타난 것도 이러한 마찰특성에 기인된 것으로 보여진다.

Fig. 7은 본 연구에서 윤활성 및 방청성이 가장 우수한 것으로 나타난 시료 A(Fig. 5) 및 상용제품을 대상으로 냉간 압연 강판 시편에 대하여 표면 전처리에 따른 방청성 시험결과를 사진으로 나타낸 것이다. Fig. 7 (a)는 샌드브라스트 처리만 한 것이고, Fig. 7 (b)는 샌드브라스트 후 인산아연 처리한 것, 그리고 Fig. 7 (c)는 샌드브라스트 후 방청 및 도료의 부착력을 향상시키기 위해 사용되는 에치프라이머 처리를 한 것으로서 모두 시료 A를 코팅한 것이며, Fig. 7 (d)는 샌드브라스트 처리 후에 상용 제품을 코팅한 후 시험한 것이다. 결과에 의하면 시료 A의 윤활제를 코팅한 것 중 샌드브라스트 후 인산아



(a) coefficient of friction vs. test cycles



(b) surface temperature vs. test cycles

Fig. 6. Coefficients of friction and surface temperatures for various types of resins in LFW-1 test (A: silicone compound modified epoxy resin, B: amino compound modified epoxy resin, C: phenol compound modified epoxy resin, D: commercial product).

연 처리를 한 Fig. 7 (b)의 경우가 360 시간까지 발청 현상이 전혀 없이 깨끗한 표면 상태를 유지하는 것으로 나타났으며, Fig. 7 (a)와 Fig. 7 (b) 시편의 경우도 1-2개의 점(spot)부식만 발생되었을 뿐 양호한 상태를 보이고 있다. 반면에 상용제품인 Fig. 7 (d)의 경우는 144 시간이 경과했을 때부터 발청이 시작되었고, 190 시간을 경과했을 때에는 사진에서 보이는 바와 같이 거의 100%가 부식된 결과를 보였다. 이는 동일한 표면 처리를 한 Fig. 7 (a)와 비교할

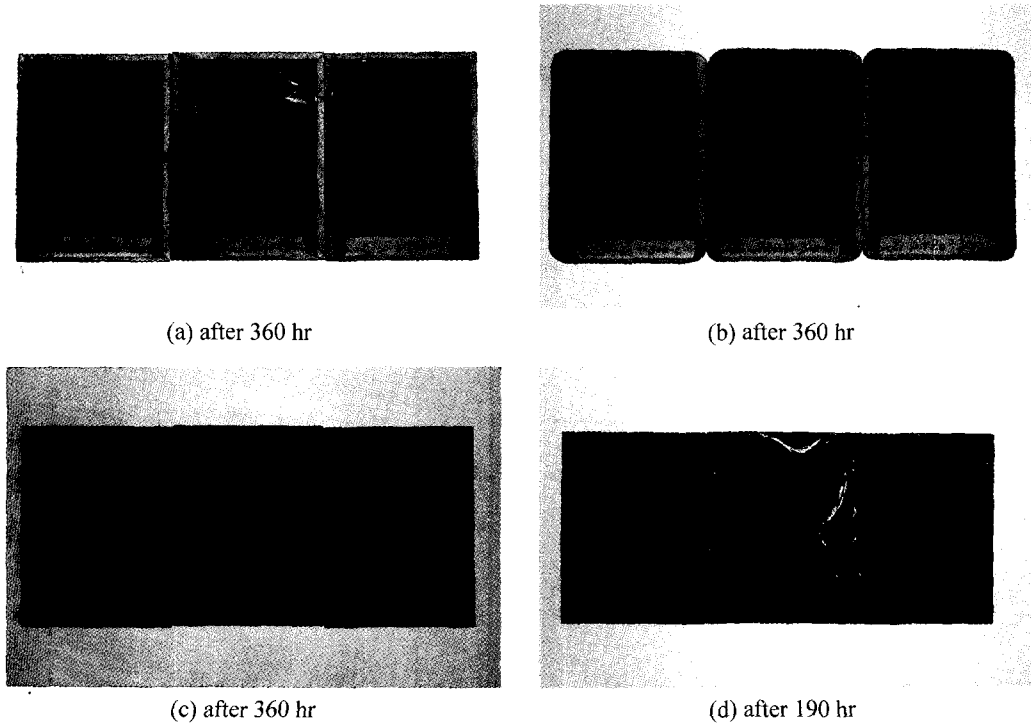


Fig. 7. The view of test specimen surfaces after salt solution spray corrosion test: (a) coated by the bonded-film A after sand blasting, (b) coated by the bonded-film A after both sand blasting and Zn-phosphating, (c) coated by the bonded-film A after both sand blasting and etch primer treatment, (d) coated by a commercial product after sand blasting.

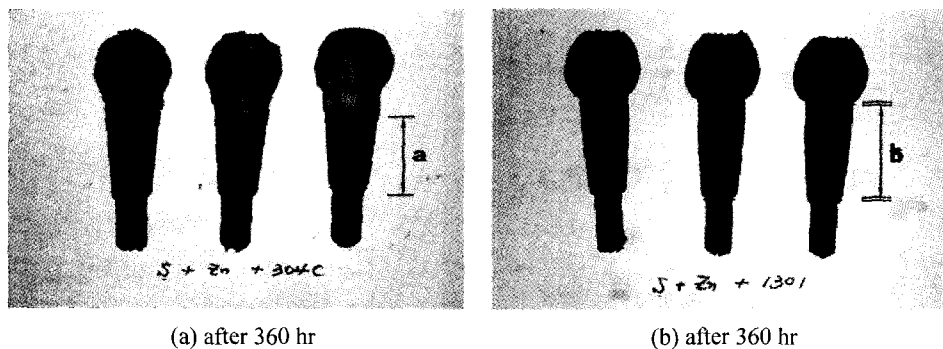


Fig. 8. The view of ball-studs for automotive wheel joints after salt solution spray corrosion test: (a) coated by the bonded-film A, (b) coated by a commercial product.

때 방청성이 크게 떨어지는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 실제 자동차의 휠 조인트 부품인 볼-스터드 표면을 샌드브라스트 및 인산아연 처리 후 동일한 시료 윤활제를 코팅한 후 방청성을 시험한 결과로서 시료 A를 코팅한 볼-스터드 시편의 경우(Fig. 8 (a))는 360 시간을 경과한 후에도 깨끗한 표면을 유지하고 있는데 반해서, 상용제품 D를 코팅한 경우

(Fig. 8 (b))는 발청이 많이 진전된 결과를 나타내고 있다.

상기의 시험결과, 피막윤활제의 방청성의 향상은, 무기물의 방청첨가제를 기본적인 첨가제로 사용하고 이를 보완할 수 있는 유기물 방청첨가제를 공동으로 사용함으로써 시너지 효과에 의한 우수한 방청성을 얻을 수 있었으며, 결합제의 경우도 수분에 대한 안

정성과 내열성이 높은 것일수록 방청성과 윤활성을 동시에 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다. 특히 무기물 방청첨가제 성분은 본질적으로 윤활성을 지닌 물질을 사용함으로써 윤활성의 저하를 최소화 할 수 있었다.

5. 결 론

자동차의 휠 조인트 부품 용도로서 방청성을 겸비한 피막접착형 고체윤활제의 개발을 위하여 방청첨가제 및 결합제의 종류에 따른 고체피막 윤활제의 윤활성 및 방청성의 관계, 그리고 금속표면의 전처리방법에 따른 고체피막 윤활제의 방청성의 변화 등에 관한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 산 수용체(acid acceptor) 기능의 첨가제인 이염기성 아인산납염(dibasic lead phosphite) 및 산화아연과 인산아연염의 혼합물, 그리고 비산화성 부동태화제(nonoxidizing passivator) 기능의 스트론튬크롬산염(strontium chromate) 등의 무기물 방청 첨가제를 대상으로 시험한 결과, 산 수용체(acid acceptor) 기능의 첨가제인 이염기성 아인산납염이 윤활성의 저하를 최소화하며 방청성이 가장 좋게 나타났다.

2. 무기물 방청제인 이염기성 아인산납 화합물에 대하여 트리히드록시벤젠화합물 및 설펡산의 아연염 화합물, 그리고 부틸히드록시톨루엔 화합물 등의 유기물 방청 첨가제의 첨가에 따른 시험결과에서 트리히드록시벤젠 화합물이 윤활성의 저하를 최소화하며 방청성의 시너지효과가 가장 좋게 나타났다.

3. 실리콘 화합물로 변성된 에폭시수지, 아미노 화합물로 변성된 에폭시수지, 페놀 변성 에폭시수지 등을 고체피막윤활제의 결합제로 사용한 경우의 방청성 및 윤활성을 시험한 결과, 윤활성과 방청성이 동시에 우수한 결합제는 실리콘 화합물로 변성된 에폭시수지로 나타났다.

4. 샌드브라스트와 에치프라이머 코팅, 인산아연처리 등의 물리·화학적인 표면 전처리에 따른 고체피막윤활제의 방청성 시험결과, 샌드브라스트 후 인산아연 처리를 한 경우가 가장 좋게 나타났다.

후 기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사

업중 중점연구개발사업(기계설비요소기계개발)으로 지원되어 수행하였습니다.

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 Solid Film Lubricants," *Lubr. Eng.* Vol. 21, pp. 97-103, 1965.
2. E. Kay, "The Corrosion of Steel in Contact with Molybdenum Disulphide," RAE Technical Report No. 65219, Oct. 1965.
3. A. J. Groszek and R. E. Witheridge, "Surface Properties and Lubricating Action of Graphite and MoS₂," *ASLE Trans.*, Vol. 14, pp. 254, 1971.
4. A. J. Halter and C. S. Oliver, "Chemical Atmosphere Effects on Frictional Behaviour of Molybdenum Disulphide," *American Chem. Soc., Discussion of Pet. Chem. Preprint* 3, No. 4A, pp. 77-84, 1958.
5. R. M. Gresham, "Solid-Film Lubricants: Unique Products for Unique Lubrication," *Lubr. Eng.*, Vol. 24, pp. 143-145, 1988.
6. M. K. Gabel and M. B. Peterson, "A Study of Parameters Which Affect Corrosion Between Solid Film Lubricants and Aircraft Alloys," *ASLE Preprint* No. 76-AM-6C-2, 1976.
7. M. K. Gabel, "Corrosion and Solid Film Lubricants," *Lubr. Eng.*, Vol. 29, No. 10, pp. 442-448, 1973.
8. A. R. Lansdown, 'Molybdenum Disulphide Lubrication,' Elsevier Press, U.K, 1999.
9. ASTM D-2625, 'Standard Test Method for Endurance(wear) Life and Load Carrying Capacity of Solid Film Lubricants'.
10. ASTM D-2714, 'Calibration and Operation of the Alpha Model LFW-1 Friction and Wear Testing Machine'.
11. 공호성, 윤의성, 한홍구, 권오관, "고체윤활용 MoS₂ Bonded Film의 마찰마모 특성에 관한 실험적 고찰," *한국윤활학회지*, 제12권, 제1호, pp. 15-21, 1995.
12. 한홍구, 공호성, 윤의성, 권오관, "미끄럼 운동을 하는 Block-on-Ring 접촉형태에서의 접촉형 MoS₂ 고체윤활 피막의 마찰마모 특성," *한국윤활학회*, 제24회 추계학술대회, pp. 35-40, 1996.
13. Hosung Kong, Hung-Gu Han, Eui-Sung Yoon, Oh-Kwan Kwon and N. K. Myshkin, "Evaluation of the Wear Life of MoS₂-Bonded Films in Tribotesters with Different Contact Configuration," *Wear*, Vol. 215, pp. 25-33, 1998.
14. KS D-9502, '염수 분무 시험 방법'.
15. R. J. Lewis, 'Condensed Chemical Dictionary,' Van Nostrand Reinhold Co. New York, pp. 972, 1993.