

윤활실제



윤활과 마모

공군사관학교교수
강석춘

1. 서론

윤활제의 주요기능은 마찰, 마모와 상대면의 돌출부와의 고체간 접촉방지에 의한 일반적인 표면손상을 감소시키는 것이다. 마찰표면이 금속일 경우 윤활유는 점착(adhesive) 마모를 야기시키는 강한 금속간의 접촉현상을 억제해야만 한다. 정의에 의하면 가스(기체), 액체 또는 고체가 마찰표면에 도달되어 돌출부와의 접촉을 분리시킬수 있는한 윤활제로의 역할을 하는 것이다. 액체 윤활제는 마모입자를 제거해주고 마찰면으로부터 열을 제거한다. 따라서 작동온도를 낮추고 결과적으로 두꺼운 윤활막을 형성하게 한다. 마모 입자의 제거는 연마(abrasive) 마모를 야기하는 입자의 변형경화나 큰 입자로 형성되는 것을 방지하고 표면온도 상승과 표면에 형성된 마모방지 피막의 기계적인 손상을 예방해 준다.

2. 점착(粘着)마모

점착(adhesive)마모는 정수압 혹은 EHL 피막이 너무 얇아서 피달으로 양쪽 마찰면을 분리시킬수 없는 윤활상태에서 일어난다. 두개의 마찰면에 윤활유가 있음에도 불구하고 높은 하중은 금속을 탄성적으로 변형하고 매우 얇은 경계 윤활층이 각 표면사이에 있을때까지 윤활유를 밀어낸다. 따라서 돌출부의 접촉면은 금속의 높은 수직 혹은 전단응력에 의해 증가되고 같은 경계윤활막이 파괴될때까지 늘어나서 금속간의 점착성이 생기게되고 금속결합을 허용하게 된다. 윤활상태에서의 마모에 대한 수학적 공식으로 다음과 같이 만들수 있다.

$$\frac{V}{d} = KmAm = KmaA = Kma \frac{W}{H} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 V는 마모체적, d는 마찰거리, Km은 오

염물질이 없는 두 물체간의 무차원 점착마모 계수이고, Am은 진 접촉면적, W는 하중이고 H는 경도, a는 표면 피막의 비이다.

보통 건조마찰에서도 표면에 흡착가스나 산화막이 어느정도 윤활기능을 하므로 a Km은 대략 $1 \times 10^{-3} Km$ 정도이고 대부분 금속의 경우 km은 0.1-0.2정도이다. 에너지는 표면의 윤활분자 효과에 매우 중요하다. 이때 상수 a는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$a = \frac{X}{U t_0} e^{-E/RTS} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 X는 흡착되는 윤활유 분자와 결합되는 면적이고 to는 흡착상태에서 분자의 진동시간, U는 마찰속도, E는 흡착에너지, Ts는 표면온도이며 R은 가스상수이다. 따라서 식 1은 다음과 같이 된다.

$$\frac{V}{d} = Km \frac{X}{toH} \cdot \frac{W}{U} \cdot e^{-E/RTS} \dots\dots\dots (3)$$

가스에 의해 마모에 대한 윤활관계 공식의 변형은 변화되는 기체압력에서 탄화수소 기체속에 있는 흑연 때문이고 주어진 마모율에 대한 기체압력은 탄화수소, 알콜, 카본사염화물및 수증기의 흡수열에 관계된다.

다음식은 기유에 감마 첨가제를 넣을 경우에 대해 유도된 것이다.

$$\left(\frac{V}{d}\right)_c = \frac{e^{-\frac{\Delta E}{RT_s}}}{e^{\frac{\Delta S^\circ}{R}}} \left[\frac{\left(\frac{V}{d}\right)_b - \left(\frac{V}{d}\right)_c}{C} \right] + \left(\frac{V}{d}\right)_b \frac{e^{-\frac{\Delta E}{RT_s}}}{to'} \dots\dots\dots (4)$$

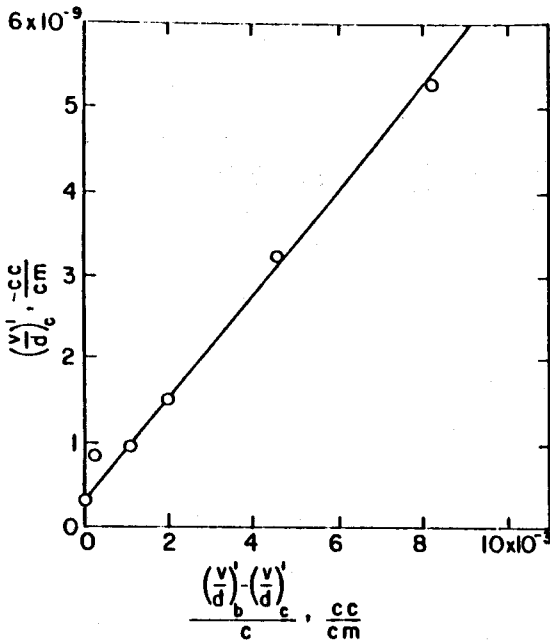


그림 1. 77°C에서 스테릭산농도의 함수로써 구리핀의 마모율관계

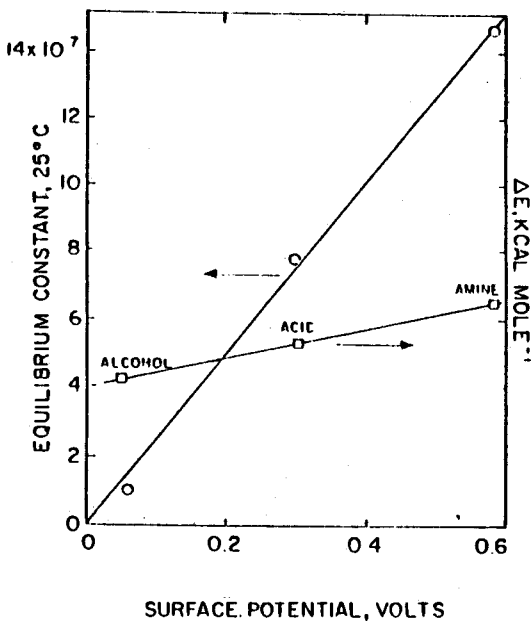


그림 2. 철표면에서 표면포텐셜 측정값과 마모시험에서 계산된 흡착상수와와의 상호관계

여기서 $(\frac{V}{d})_c$ 와 $(\frac{V}{d})_b$ 는 첨가제농도와 기유

에 대한 마모율이고 ΔS° 는 계의 엔트로피 변화이며 t_0 는 표면에서 첨가제와 솔벤트의 진동 시간의 비이다.

그림 1은 77°C에서 스테릭산 용액에 대한 식 4의 괄호안에 있는 값에 대해 구리핀의 강철에 대한 마모율의 그림이다. 경사도와 절편으로부터 접착-응착 평형상수 K는 다음과 같이 표시된다.

$$K = e^{4s^\circ/R} e^{\Delta E/RTS} \dots\dots\dots (5)$$

그림 2는 마모실험에서의 평형상수와 ΔE ($\Delta E = E_a - E_b$)에 대한 계산값에 대한 것이다. pin-on-disk 머신에서 AISI 1020을 사용 하였을 경우 아민>산>알콜의 순서는 단일층의 마찰 측정과 금속에서 4-ball마모 결과와 n-hexadecane의 흡착막의 접착성 측정이 4-ball의 마모시험 결과와 잘 일치한다.

결론적으로 이들 결과는 긴 연쇄 극성화합물의 흡착 표면막이 점착마모를 감소시키고 흡착 에너지의 크기가 지배인자라는 결과를 지지 한다.

금속과 화학반응에 의해 기능을 갖는 감마첨가제에 의해서 반응물은 반응 물질의 탈착과 비교 되어 지고 반응 물질의 탈착 에너지는 조절되어 지기때문에 이 모델이 적용 가능하다.

3. 부식 화학적 마모 (CORROSIVE CHEMICAL WEAR)

감마제나 극압 첨가제는 일반적으로 표면과 화학반응으로 인해서 작용한다. 예를 들면 유기 이산화황은 정상 상태하에서 강철 표면과 작용하여 iron mercaptide를 형성하고 더 심한 상태에서는 황화철을 형성한다.

마찬가지로 트리크리실린과 같은 유기인은 정상상태에서 유기인 철을 만들기 위해서 철표면과 작용하고 높은 하중과 높은 표면온도 같이 심한 조건에서는 인화철을 형성한다. 표면끼리 상호 운동하는 동안 어떤 반응물질은 화학적 마모를 일으키면서 전단이나 혹은 기계적인 행위에 의해 잃어 버린다. 일반적으로 부식마모라는 어휘는 화학적 마모가 마모를 지배하고 점착 마모를 억제하는데 요구되어지는 양보다 10:1의 큰 마진을 갖는 경우에 사용된다.

정상상태에서 어쨌든 부식마모의 양은 감마제나 혹은 EP 첨가제가 들어있지 않는 경우에

생기는 점착마모에 비하여 매우 작은 값에 지나지 않는다. 부식마모는 오일속에 녹아있는 반응물질에 의해서 베어링 합금속에 있는 한 성분과 선택적 화학반응에 의해서 일어날 수 있다. 예를 들면, 유연연료로부터 생기는 할로젠 배기가스에 의해서 구리 대신 납으로 만든 컨벡팅로드에 있는 납을 선택적으로 마모하는 경우이다.

부식이 문제가 되는 곳에서 첨가제는 오일의 산화를 방지하거나 혹은 비반응 물질의 표면점착에 의해서 화학반응을 방지하도록 오일속에 첨가되어야 한다.

4. 점착마모와 화학마모와의 균형

점착마모와 화학적마모의 균형은 최적상태에서 점착마모와 화학적마모 사이에서 이루어져야 한다. 윤활유의 화학반응이 매우 약한 상태에서 작동하는 경우에는 점착마모 과정이 지배할 것이고 반대로 화학적반응이 심한 경우에는 부식마모가 지배될 것이다. 최적균형은 첨가제 농도를 변경함으로써 얻어질 수 있다. 그림-3은 n-hexadecane에서 O-diisopropyl-phosphorodithioate이 들어있는 곳에서 구리핀의 마모율을 보여준다. 극히 낮은 첨가제 농도에서 표면은 단지 부분적으로 보호되어지고 점착마모가 지배한다. 높은 첨가제 농도에서는 매우 두꺼운 화학 반응막이 마찰하는 동안에 형성되고 마모된다. 더 심한 마찰조건에서는 더 많은 화학반응이나 더 높은 첨가제 농도가 점착 및 화학마모 사이에 최적균형을 얻기 위해 요구된다. 따라서 그림 3에 있는 곡선은 그림 4에서와 같이 오른쪽으로 이동될 것이다. 반응도 A에 대한 마모는 가혹상태 I에 대한 화학적마모에 의해 지

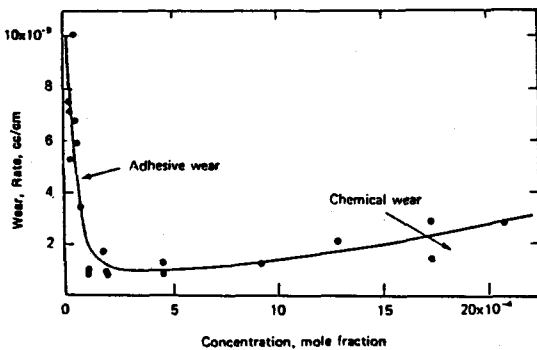


그림 3. 세탄과 Zinc O, O-diisopropylphosphorodithioate 첨가제가 있는 경우 구리핀의 마모율과 농도와의 관계

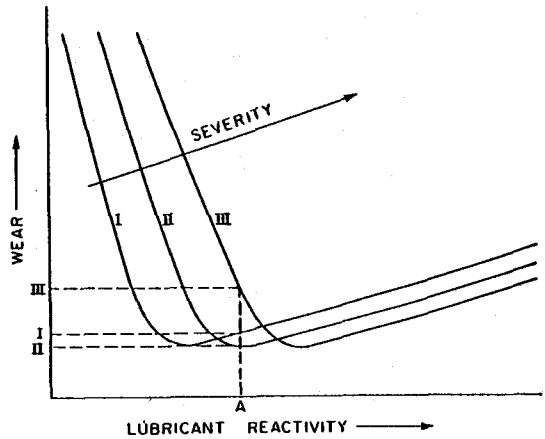


그림 4. 점착화학적 마모균형에서 마찰 가혹성의 효과에 대한 도식적 관계.

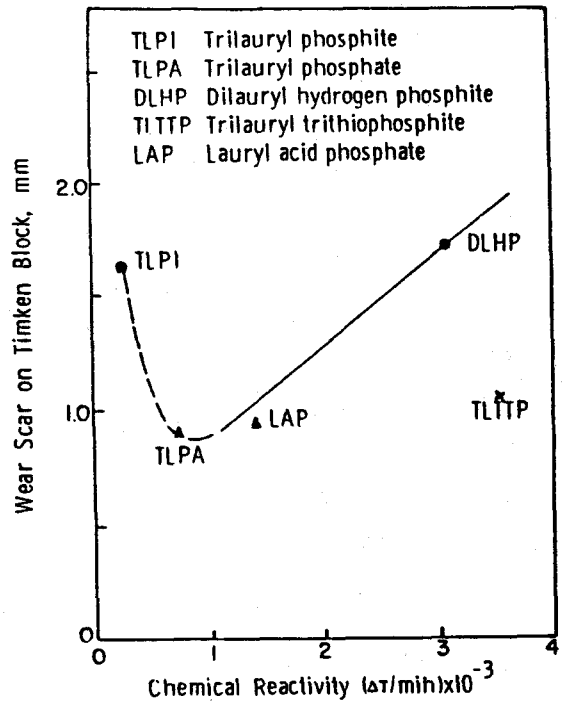


그림 5. 인 혼합물에 대한 마모와 화학적 반응성과의 관계.

배를 받을 것이고 II에서는 점착 및 화학적마모의 최적균형 그리고 III에서는 점착마모에 의해 지배될 것이다. 이 그림은 여러 종류의 벤치마모시험에서 감마 첨가제를 고려하는데의 어려움을 보여주고 마찰 상호면에서 가혹성의 변화로 빚어지는 현상응용의 어려움도 나타낸다. 금속 표면에서 화학반응성의 정의와 측정은 반응을

이 정상 대기중에서 극히 낮기 때문에 곤란하다. 그림 5는 순수한 정제 윤활유에서 여러 종류의 유기인산과 인산에 대해 전기적으로 가열된 철선은 마모와 부식율에 대한 그림이다. 그림 6은 두개 형태의 EP첨가제에 의한 고열선 방법에 의해 측정된 화학 반응성과 EP첨가제를 첨가한 것과 첨가하지 않은 것에 대한 평균 접촉 하중의 비로 표시된 하중부하 능력에 관한 관계를 그린 것이다. 화학반응도는 EP첨가제를 첨가시킨 경우와 첨가시키지 않은 경우에 대한 비례상수 K로써 표시된다. 그리고 K는 전기 가열된 선의 직경 변화율이다. 황과 염소를 포함한 혼합물의 두 곡선은 표면 반응성의 효과가 중요한 변수라는 것을 보여준다. 불행히도 최대 마모 수명을 갖기 위한 자세한 지침은 다음과 같은 여러 변수의 이해부족 때문에 가능하지 않은 경우가 많다.

1. 국부적 표면온도 및 압력
2. 변형된 금속과 새로 형성되는 표면의 촉매 특성
3. 첨가제와 금속사이의 화학적 반응성
4. 화학 반응에서 산소의 역할
5. 표면반응 및 확산운동
6. 접촉 구역에서의 윤활유 잔류시간
7. 최대 감마반응을 위한 최적 표면막 두께

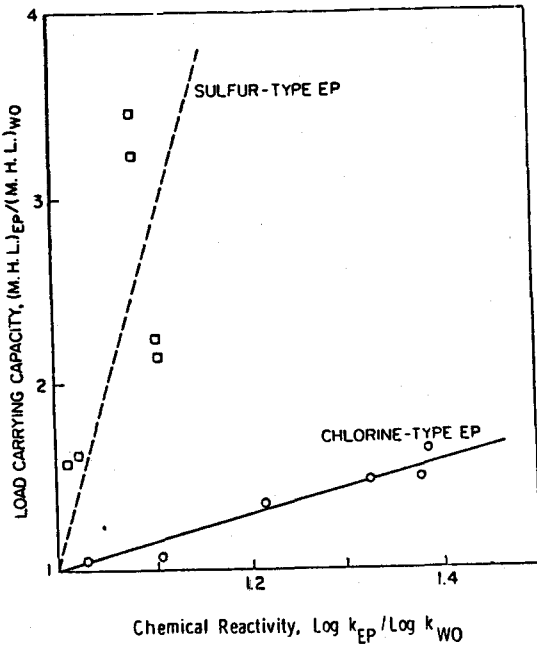


그림 6. 화학적반응성과 하중부하능력과의 관계

8. 금속에 대한 유동성 전단 강도 및 접착성을 지배하는 표면막의 특성

완전히 조제된 윤활제에서 첨가제의 상호작용은 경계막을 구성하기 위해 금속표면과 경쟁적으로 반응하면서 산발적으로 일어나고 그들의 물성은 더욱 복잡하다. 또한 주어진 윤활제는 매우 다른 수준의 가혹성과 완전히 다른 표면 반응물을 생성할 수 있는 서로 다른 금속과 접촉하여야 하기 때문에 여러 형태의 윤활성이 요구된다. 그렇지만 다양한 하중에 대한 마모시험 결과는 필요한 성능을 만족시킬 수 있는 효과적인 첨가제를 제조하는데에 대한 귀중한 지침을 제공한다.

• 표면반응에 대한 운동성

감마제나 EP첨가제와 마찰면 사이에 일어나는 화학반응의 운동성은 최대효과를 얻는데 매우 중요하다. pin-on-disk 머신에서 마찰하는 표면과 EP첨가제인 방사성 S³⁵반응성이 조사되었고 수학적으로 표시되었으며 여러 상수를 계산해 보았다. 화학반응이 일어나기 전에 흡착성과 흡착분자의 배열은 중요하다. Diester sulfide는 다음과 같은 구조를 가지고 있다. $[-S-(CH_2)_nCOOC_2H_5]_2$

여기에서 N = 1, 2, 3 이고 낮은 농도에서 효과적인 감마 혼합물이라는 것이 발견되었다. 그러나 높은 농도에서는 그들은 빈약한 EP물성을 갖고 마모는 응착형태로 이루어진다. EPM (Electron probe microanalysis)에 의하면 낮은 농도에서 마모된 면에 많은 유황이 존재함을 보여주나 높은 농도에서는 거의 없다. 표 1에 있는 열의 흡착성은 이스터 계열이 유황 원자보다 흡착에 더 기여함을 보여준다. 분명히 낮은 농도에서 유황과 이스터 계열은 마찰표면 위에 함께 놓이게 되고 유황이 황화철을 형성하게 된다. 높은 농도에서는 더 강력하게 흡착된 이스터 계열이 황의 원자를 밀어내고 따라서 황이 표면과 화학반응을 못하도록 한다. 첨가제와 금속의 화학반응에 대한 운동학의 중요성은 CRCL-37과 L-42인 기어 시험에서 인과 황의 EP첨가제 비교로부터 얻을 수 있다. 유황화물은 일반적으로 높은 속도/낮은 하중 시험조건(L-42)에서 최상의 기능을 하고 반면에 인 혼합물은 낮은 속도/높은 하중시험(L-37) 상태에서 일반적으로 최상의 기능을 갖는다.

• 온도

온도는 마모를 지배하는 많은 윤활기능의 가장 중요한 요소이다. 온도는 윤활제의 점도와 두 면을 분류하기 위한 점성막을 생성시킬 수

표 1. 산화철에 대한 첨가제의 흡착열.

Additive	Cal × 10 ⁻³ / g Fe ² O ³
[CH ₃ (CH ₂) ₁₁ -S-] ₂	4.9
[-(CH ₂)COOC ₂ H ₅] ₂	7.0
[-S-(CH ₂) ₂ COOC ₂ H ₅] ₂	11.4

From Forbes, E. S., Allum, K. G., Neustadter, E. L., and Reid, A. J. D., Wear, 15, 341, 1970. With permission.

있는 능력을 결정한다. 온도가 증가할수록 돌출부의 상호작용 기회가 증가하고 표면막의 필요성이 더욱 증가한다. 표면온도는 감마제의 반응운동학과 마찬가지로 표면과 감마제의 EP첨가제와의 반응운동학을 결정한다. 많은 EP첨가제는 효과를 얻기 위해서 최소한 반응온도를 필요로 한다. 반응성이 온도에 영향을 받는다면 최적표면 온도 이상의 온도증가는 과도한 화학반응을 일으키고 화학적 막모를 유발한다. (그림 4) 매우 높은 표면온도에서 다음과 같은 인자가 첨가제 반응을 손상시킬 수 있다.

1. 금속 자체와의 접촉성 감소
2. 오일의 용해성 증가에 의한 탈착성 증가
3. 필름의 유동성 및 전단특성변화

표면막이 효과가 감소됨에 따라 금속 접촉의 증가는 마찰을 높여주고 표면온도를 더욱 높여주며 결정적인 마모손상을 가져온다. 이것이 천이온도 현상으로 알려져 왔다.

• 하중

마모율은 접촉의 전면적이 낮은 피막 상태에서 하중과 비례하기 때문에 1 식과 같이 하중에 비례한다. 접촉 돌출부의 수가 하중 증가에 따라 증가함으로써 한 점은 윤활막이 더이상 하중을 지탱할 수 없게 된다. 이것이 정상마모에서 윤활 효과가 없는 손상마모로 천이하는 점이다.

5. 연마마모 (ABRASIVE)

연마 마모는 (1) 거칠고 단단한 면이 연한 면 사이에 마찰할 때 또는 (2) 오염된 단단한 입자가 마찰면 사이에 존재할 때 깎여나감 작용으로부터 이루어진다. 완전윤활 또는 EHD 윤활막이 충분히 두꺼워서 두 면을 분리시킬 수 있거나 (1) 혹은 가장 큰 단단한 입자보다 두꺼울 때 (2) 연마 마모는 상당히 감소된다. 윤활된 계통에서 연마 마모는 충분히 두꺼운 윤활막을 만들 수 있을 정도로 적절한 점도를 가진 윤활유를

표 2. 마모계수 K

Additive	Wear scar diameter (mm)	Wear coefficient K (× 10 ⁻³)	
			Wear scar diameter (mm)
Zinc Dialkylphosphorodithioates			
Zn $\left[\begin{array}{l} \text{S} \\ \text{SP} \begin{array}{l} \text{---} \text{S} \\ \text{---} \text{OR} \\ \text{---} \text{OR} \end{array} \end{array} \right]_2$	R = Isopropyl	0.258	0.17
	R = 2-Ethylhexyl	0.296	0.43
	R = n-Dodecyl	0.290	0.37
phosphonates			
(R ₁ O) ₂ P(O)R ₂			
R ₁ ; R ₂			
Butyl; H	0.64	14.1	
2-Ethylhexyl; H	0.36	1.2	
Butyl; phenyl	0.48	4.2	
Phosphates			
Tributyl	0.47	3.9	
Tricresyl	0.28	0.29	
Disulfides			
Dibenzyl	0.560	8.1	
Di-n-butyl	0.855	46.0	
Di-n-dodecyl	0.623	12.6	

Note : four-ball test, 15kg, 1500r/min, 50°C, 60 min.

사용하거나 혹은 피할 수 없는 단단한 오염입자를 제거할 수 있는 적당한 여과기를 사용함으로써 조절할 수 있다. 만약 연마마모 입자가 접촉면에 잔류한다면 변형경화에 의해 연마 마모를 일으킬 수 있는 더 큰 입자를 형성할 가능성이 많아진다. 액체 윤활제는 연마마모 입자를 접촉면으로부터 씻어낼 수 있고 연마 마모를 일으키는 원인을 제거할 수 있다. 두꺼운 윤활막을 유지하는 것이 불가능한 작동상태나 계통에서 감마제 또는 EP첨가제가 생성되는 표면 피막을 통해서 그들의 두께나 연마 마모의 억제에 의해서 약간의 보호역할을 한다.

6. 피로마모 (CONTACT FATIGUE WEAR)

피로는 구름베어링이나 기어 또는 벨브드레인과 같은 경우와 같이 반복하중을 받음으로써 생긴다. 접촉면의 반복된 변형은 미소균열을 유

표 3. 롤링접촉 피로수명에 대한 윤활유에 포함된 수분의 영향

Lubricant description*	Water content of oil (%)	Fatigue life reduction (%)	Test equipment and Hertzian stress	Ref.
SAE 20rust and oxidation inhibited mineral oil (0.01%)	0.04	48	Tapered roller bearing 2.03GPa (0.29 × 10 ⁶ psi)	31
Mineral oil-based	0.1	45	Angular contact bearing	
Emulsifying hydraulic oil (0.02%)	0.5	56	2.27GPa (0.33 × 10 ⁶ psi)	32
SAE-10-based mineral oil (0.15%)	0.5	45	Unisteel bearing fatigue test 3.90GPa (0.57 × 10 ⁶ psi)	33
SAE-10-based mineral oil (=0.05%)	0.5	17	Rolling 4-ball 7.52GPa (1.09 × 10 ⁶ psi)	34
Emulsifying hydraulic oil (Purged with Argon)	1.0 (seawater)	45	Rolling 4-ball 6.89GPa (1.00 × 10 ⁶ psi)	35

* Water content of oil without added water given in parentheses.

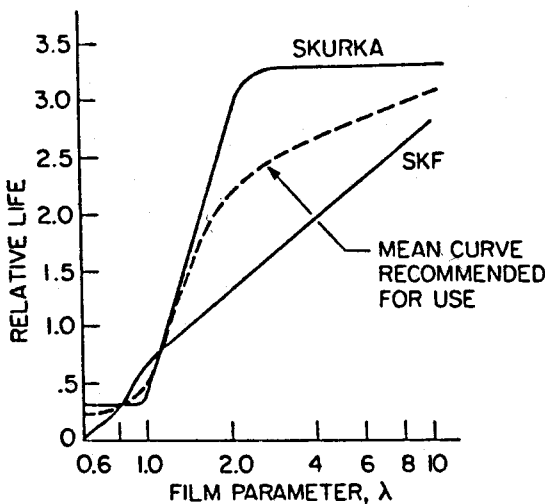


그림 7. 필름상수 λ의 함수로써 피로수명과와의 관계.

발하고 확대시킨다. 내면균열의 시작은 일반적으로 최대전단 응력을 받는 곳에서 생기고 가끔 금속에 있는 불순물에 의해 생기기도 한다. 불완전한 표면에 박혀있는 입자, 긁힌 자국, 움푹 패인 곳 또는 윤활유속에 있는 단단한 오염입자 등이 표면 미세균열을 일으키도록 작용하기도 한다. 균열의 전파를 통한 균열망의 형성은 작은 조각들이 쪼개져 나가거나, 분리되어 떨어지게 한다. 그리고 그것이 피로 마모의 형태이다.

윤활제의 화학적, 물리적 물성은 피로마모에 상당한 역할을 한다. 비 피막두께 λ(EHL 피막두께와 표면조도의 비)는 베어링의 피로수명에 영향을 주는 중요한 인자로 생각된다. λ가 윤활유 점도와 점도-압력계수의 함수이기 때문에 피로는 적절한 점도를 가진 윤활유를 선택함으로써 조절될 수 있다. 그림 7은 피막의 함수로써 또는 비피막 두께의 함수로써 상대적인 피로수명에 관한 그림이다.

• 수분의 효과

윤활유에 포함된 약간량의 수분은 표 3에 요약된 것과 마찬가지로 불 또는 몰리베어링의 피로수명을 상당히 감소시킨다. 대부분의 산업용 오일은 50-500PPM 정도의 물을 포함하고 있고 작동환경으로부터 수분에 의해 점점 더 오염된다. 기유나 첨가제의 분자에 비해서 물의 분자가 극히 작기 때문에 즉시 미세균열 틈새로 들어가고 수소 원자를 생성시키는 매우 반응성이 높은 물질로 분해된다. 수소는 철의 균열을 더욱 전파되도록 금속 사이로 점점 더 확산되어 간다. 따라서 크랙이 확산되어 진다.

• 윤활유 형태와 윤활 첨가제

윤활유 형태는 피로수명에 상당한 영향을 미친다. 불에 저항성을 갖는 유체는 피로수명을 상당히 감소시켜 준다. 로울러 베어링으로 실험한 최근의 결과가 표 4에 제시되었다. 로울러 베어링과 유니스틸 피로시험의 최근 실험 극압 첨가제와 감마 첨가제는 피로수명에 상당한 영

표 4. 화재저항성 유체에서 상대적 피로수명의 비교

	Tapered roller bearing	Unisteel bearing
	1.97GPa (0.285 × 10 ⁶ psi) ³⁷	3.88GPa (0.563 × 10 ⁶ psi) ³⁸
Mineral oil	1.0	1.0
Phosphate ester	0.49 - 0.80	0.79
Water-in-oil emulsion	0.31 - 0.53	0.21
Water glycol	0.14 - 0.20	0.17
Dilute emulsion 5/95oil/water		0.06

향을 미친다. 황과 인의 EP첨가제는 높은 비피막 두께의 값에서 피로수명을 감소시켜주나 낮은 값에서는 증가시켜 준다. 첨가제의 반응은 첨가제 농도와 금속학적으로 매우 민감하다는 것이 발견되었다. 오일의 산화는 피로 수명을 감소시켜 준다. 그리고 감소의 크기는 산도에 의해 영향을 받는다. 회전 및 미끄럼 혼합상태에서 Zinc dialkylphosphorodithioate첨가제는 높은 응력 수준에서 보다 낮은 응력수준에서 더 심하게 피로수명을 감소시켜준다. 따라서 응력수준에 따른 첨가제 반응의 영향을 알 필요가 있다. 일반적인 결론으로써 많은 EP, 또는 감마 첨가제는 피로수명을 감소한다. 표 5는 여러 종류의 EP첨가제에 대한 롤러베어링 시험의 결과를 비교한 것이다. 최근에 유기인은 구름베어링 표면에 피막을 생성시켜 줄으로써 피로수명을 증가시켜 주는 것으로 보도되어 왔다.

표 5. 테이퍼롤러 베어링의 피로수명에 대한 윤활유효과

SAE Grade.	Type of EP additive package	L ₅₀ life, normalized
90	None	1.00
80	Lead-sulfur	0.24
80	Lead-sulfur	0.34
80	Phosphorus-sulfur	0.32
90	Zinc-phosphorus-sulfur	0.17
90	Zinc-phosphorus-sulfur-chlorine	0.40
90	phosphorus-sulfur	0.67

Note : 1.03GPa (150,000psi) maximum Hertz stress.

7. 침식마모 (EROSIV WEAR)

침식마모는 유체 속에 존재하는 고체 입자나 혹은 유체 그 자체에 의해 연마작용이나 충돌에 의해 일어나는 고체표면의 재료손실을 의미한다. 만약에 유체가 부식성이라면은 그 현상은 침식에 의한 부식이라고 불리어져야 할 것이다. 평면 베어링의 침식마모는 베어링의 날카로운 모서리에서 점성 유체가 재빨리 흐르면서 일어난다. 윤활상태에서 고체에 의한 침식은 입자가 오일의 흐름에 따라 이동되어 질때 일어난다. 평면 베어링의 경우 침식마모는 베어링 입구 근처에서 주로 일어난다.

8. 캐비테이션 마모 (CAVITATION WEAR)

마모는 액체속에 있는 기포나 기체의 터짐으로부터 생기는 높은 충격압력에 의해서 일어난다. 이 현상은 완전 윤활상태에서 갑작스럽고 큰 압력의 변화에 의해 기포의 형성 및 터짐에 의해서 비롯된다. 윤활피막에서 연속된 액체상에서 전형적인 마모는 개스상태의 캐비테이션, 기포의 캐비테이션으로 알려져 있다. 개스의 캐비테이션은 윤활유가 녹아있는 가스의 포화압력 이하로 떨어지게 될때 일어나고 기포의 캐비테이션은 액체의 압력이 국부적 비등을 야기하는 증기압 이하로 떨어질 때, 그리고 형성된 기포가 압력증가에 의해 터질 때 일어난다. 기체의 공동은 증기의 공동보다 더 늦게 형성되고 또 파괴된다. 따라서 일반적으로 표면손상은 작아진다. 기포는 동력학적으로 하중을 받는 저널베어링이나 외부적으로 압력을 받는 저널베어링

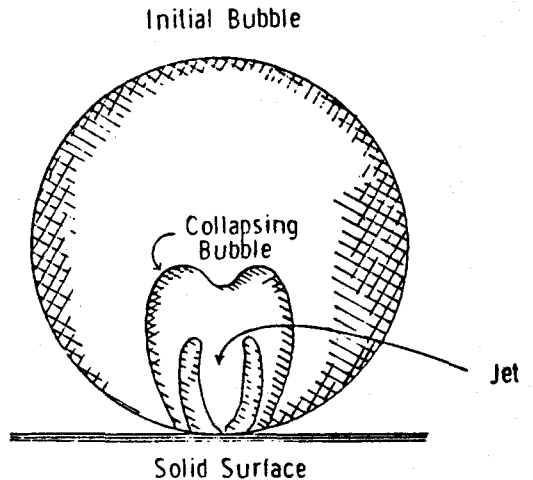


그림 8. 거품(기포)의 파괴

의 성능에 영향을 미친다. 따라서 하중 부하능력과 피막두께가 작아지고 표면손상을 유발한다. 기어 펌프에서 옆면이 주로 기포에 의한 마모의 손상을 입는다. 기포는 굴음접촉 베어링의 마모에도 중요하다. 4 - Ball 굴음접촉 시험에서 피로저항은 기포침식마모 시험에서 핏팅저항과 상관관계를 갖는다. 비슷한 결론으로 기포침식이 기포가 파괴될 때 액체젯트의 충격에 의한 피로과정으로 도달될 수 있다. 기포침식의 자세한 메카니즘은 아직도 알려지지 않았다. 그림 8은 중심부에서 고속미세 젯트의 형성과 함께 동공이 파괴되는 현상을 보여준다. 이 젯트와 액체충돌과의 상사성은 캐비테이션 마모와 유체침식이 비슷하다는 것을 암시한다. 표면장력은 터지는 율을 증가시키고 반면에 압축성, 점성 그리고 비응축기체의 존재는 터지는 율을 감소하는 경향이 있다.

9. 전기화학적 마모 (ELECTROCHEMICAL WEAR)

가끔있는 한 마모의 형태는 전기화학적 반응에 의해 일어난다. 인화 에스테르 액체가 있는 항공기 유압서보 밸브의 마모는 전기운동학적 유동전류의 발생에 의한 것으로 설명된다. 그림

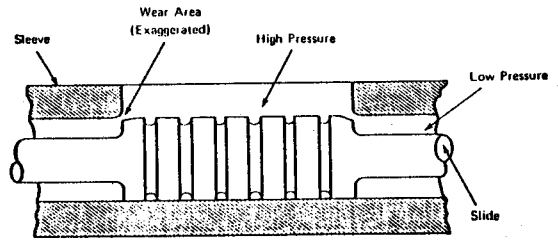


그림 9. 항공기 서보밸브에서 전기 화학적 마모.

9에서 보는바와 같이 마모는 밸브의 상류쪽에서 일어나고 밸브가 작은 구멍을 통해 큰 압력차(3000psi)를 갖는 중립위치에 있을 때 가장 빨리 일어난다. 이런 형태의 마모가 일어나기 위해서 작동유체는 두 가지 상태를 만족시켜야 한다. 전기적 2중층은 정수압 경계층에 비하여 얇아야 한다. 또 유체의 전도성은 금속에 비하여 비교적 낮아야 한다. 낮은 전도성 유체는 앞의 조건에 어긋나고 반면에 높은 전도성 유체는 두 번째 조건에 벗어난다. 결국 인화 에스테르는 두 조건을 충족한다.