



유체 윤활의 발전역사와 기초이론

공군사관학교
교수 강 석 춘

1. 서론

액체나 그리스가 마찰면 사이의 마찰을 감소시켜 준다는 사실은 오래전부터 잘 알려져 왔다. 그러나 과거에는 액체나 그리스가 거칠은 면의 낮은 부분을 메꾸어 주어 운동면을 매끄럽게 해주기 때문인 것으로 믿었다. 이러한 견해는 고대 철학자들의 지지를 받았고 19세기 중반 이전까지 Amontons이나 Coulomb 또는 다른 공학전문가들의 견해도 마찬가지였다. 보수적이고 권위주의적인 학문의 전통때문에 산업혁명 초기에 윤활에 관련된 독창적인 연구가었던 Gustave의 논문이 과거의 이론과 다르다는 이유로 프랑스 아카데미에서 인정받지 못하였다.

윤활의 주요 발전은 최근 100년전부터 시작되었고 취급하고저 하는 내용도 주로 4~50년전부터의 연구 결과들을 정리하여 알기쉽게 설명한 것이다.

2. 유체 윤활(Hydrodynamic Lubrication)

윤활분야의 발전은 Reynolds(1842-1912)의 그림 1과 같은 베어링에서 회전하는 축과 저널면과의 관계에 대한 연구에서부터 본격적으로 시작되었다. 그의 이론적인 해석은 Tower(1845-1904)가 발견한 증기기관의 축과 베어링 사이에서 일어나는 현상에 바탕을 둔 것이다. Tower는 윤활계가 효과적으로 작동될때 그림 2와 같이 아주 높은 유체 압력이 윤활 피막사이에서 형성됨을 발견하였던 것이다.

1886년에 출판된 Reynolds의 설명은 다음과 같다. 만약 회전축이나 저널베어링이 윤활유가 없는 상태에서 시계방향으로 회전한다면 그림 3a에

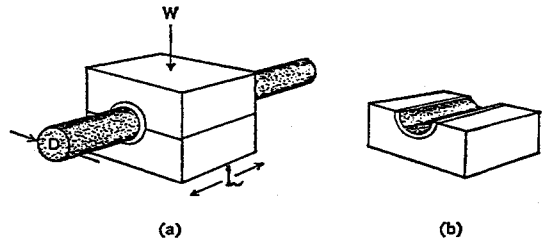


그림1 (a)완전 베어링 (b)반축 베어링

※베어링의 수직압력은 하중을 사형 면적으로 나누어 준 것 $(W \div (D \times L))$ 으로 보통 100~1000psi 정도임

서처럼 축은 베어링의 오른쪽으로 지어 올라간다. 그러나 베어링에 오일을 넣고 계를 같은 방향으로 적당히 작동시키면 축은 베어링의 반대쪽(왼쪽)으로 옮겨가고 따라서 축과 베어링 사이에 오일이 채워진 췌기형 틈새를 만들어 준다. 그 결과로 움직이는 면 사이의 좁은 공간을 통과하는 윤활유 흐름의 속도가 증가하게 된다. 액체는 점성을 갖으므로써 이런 현상이 생기는 오일 통로에서 액체 압력을 생성하며 적당한 조건에서는 두 마찰면을 완전히 분리시키기에 충분해진다. 오일에서 이 압력의 분포가 그림 3b에 나타나 있다.

Hydrodynamic(수력학, 유체운동학)의 의미는 액체(hydro)와 상대운동(dynamic)이라는 두가지 뜻을 갖는다. 그러나 실제로 유체운환에서 필수적인 다른 두가지 특징을 갖고 있다. 먼저 액체는 점성을 갖어야 하며 두번째로 마찰면의 상호 위치가 액체형 썩기꼴을 이루어야 한다. 이것은 축과 운환된 베어링에서 자연스럽게 만들어진다. 이런 현상은 그림 4와 같이 약간 경사진 두면 사이에 유체가 있고 서로 상대운동을 할 경우에도 나타난다.

유체운환에서 마찰의 전부는 윤활막의 전단에 의해 일어나므로 오일의 점도 크기에 의해 결정된다. 오일이 묽으면 묽을수록(점도가 낮을수록) 마찰은 낮아진다. 또 중요한 요소는 두면 사이의

낮아진다. 만약 오일의 점도가 매우 낮으면 두면 사이의 간격은 표면조도의 높이보다 더 작게되고 마찰면의 거칠은 돌기가 오일피막을 투과하게 되므로 마찰과 마모를 증가시킨다.

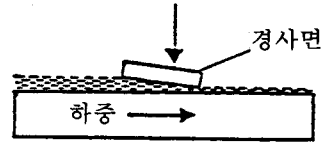


그림4 경사면 형태의 베어링에서 유체 운환

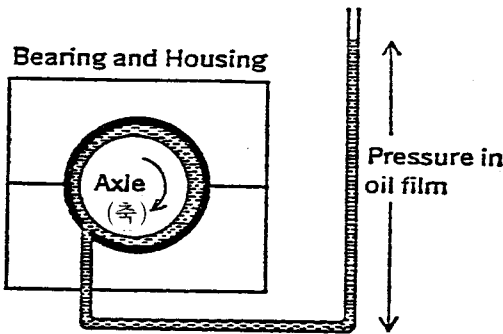


그림2 잘 윤환된 경우 축과 베어링 사이에서 압력 생성에 관한 Tower의 실험

유체 운환의 큰 잇점은 마찰계수가 매우 낮아지고 ($\mu \approx 0.001$) 이상적인 경우에는 상대 움직이는 마찰부분의 마모는 없게 된다. 이때 표면은 매끄러워야 하고 축과 베어링은 잘 배열되어 있어야 하며 간격이 적당하여야 한다. 그러나 마찰작용에 의한 열생성이 윤활유의 점도를 감소시키므로 오일막의 침투 위험은 작동중에 점점 증가하게 된다. 이에 대한 대처 방법으로는 오일의 양을 증가하여 베어링에 있는 오일을 계속 순화시키면서 오일의 온도를 낮추어주는 방법과 오일이 온도변화에 따라 점도변화가 적도록 첨가제를 첨가해 주는 방법이다.

윤활 유체에서 중요한 문제 발생은 회전속도가 0일때 이론적으로는 오일 피막두께 역시 0이 되고 이것은 운동시작이나 정지할 때에 생겨난다. 또 축에 작용하는 하중의 크기와 방향이 내연기관의 크랭크축의 경우처럼 서로 달라지는 경우이다. 원칙적으로 어떠한 재료도 유체 윤환조건에서 효과적인 베어링 역할을 할 수 있으나 실제로 경우에 따라서 윤활유의 국부적 파괴가 일어나게 되고 이때 문제가 발생하게 된다. 이러한 경우 베어링 재료는 극한 상황에 도달되며 손상에 대한 마지막 대처능력과 성질을 갖는 것이 바람직하다.

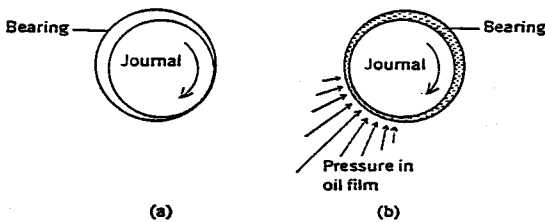


그림3 베어링에서 축이 시계방향으로 회전할 때의 모형. (a)윤환이 안된 경우, (b)축과 베어링 사이에 윤환된 경우

간격(틈새)이다. 간격이 좁아지면 베어링의 부하가 커지고 속도가 커지면 마찰열에 의해 점도는

3. 공기 윤환

유체 윤환의 연장개념에서 공기나 다른 가스를 윤활제로 사용하는 것은 흥미있고 중요성이 증가

하고 있다. 공기의 점도는 매우 묽은 순수한 광유보다 1,000배 정도가 작다. 따라서 점도에 의한 저항이 매우 낮아지게 된다. 또 두면사이의 틈새도 매우 작으므로 특별한 주의가 필요하다. 공기 유회를 하기 위해서 마찰표면은 매우 매끄러워야 하고 축과 베어링의 배열은 잘 되어야 하며 축과 베어링 사이의 틈새가 매우 정확하여야 한다. 더욱 중요한 것은 하중이 비교적 작고 속도는 커야한다. 만약 모든 조건이 충족되면 공기 베어링은 마찰이 거의 없는 상태에서 작동되어질 수 있다. 공기는 온도 증가에 따른 화학적 변화가 생기지 않고 점도는 온도에 따라 거의 변하지 않으며 유회유 비용이 들지 않는 잇점이 있다.

4. 탄성 유체 유회

앞에서 취급한 회전축과 베어링에서 마찰재료는 완전히 강체이고 작동중에 그들의 기하학적 형태가 계속 유지되는 것으로 가정하였다. 그러나 모든 마찰재료는 탄성 변형을 하게 되고 그 경우에 다음과 같이 된다. 그림 5와 같이 강철로 된 축이 고무위에 있다면 고무는 탄성변형을 하게 되고 반쪽 베어링과 같은 모양을 하게 된다. 만약 축과 고무 사이에 유회유를 공급하게 되면 좁은 틈새로 침투하게 되고 조건이 맞다면 유체 유회 피막을 형성하게 된다.

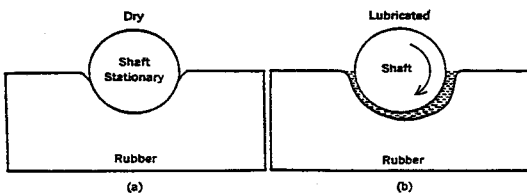


그림5 고무에 축이 놓인 경우. 고무의 변형(a)과 그 사이에 유회유를 넣고 회전시킨 경우의 변형 모형(b)

이 경우에 오일에서 생성된 압력은 고무의 변형시에 갖는 압력과 대등하게 되고 실제에는 그림 5b에서와 같은 모양이 된다. 이러한 형태를 갖는 유회를 탄성유체 유회이라고 부른다. 변형되는 물체는 그의 형태, 탄성 성질, 작용하중,

마찰속도 및 침투하는 액체의 점성 등 모두 중요한 인자가 된다.

보통 축과 베어링사이에서 걸리는 압력은 1000psi 정도가 된다. 고무같은 재료로 만든 탄성 유체 유회 베어링의 경우에 고무의 저항 압력은 이보다 10~20배 정도가 작다. 기어의 경우에서 접촉 압력은 100,000psi 정도에 이른다. 재료가 매우 단단하기 때문에 이것은 탄성변형이내에 들게 된다. 기어 이의 적절한 배열과 표면조도가 적당하다면 기어유회를 광유로 사용하더라도 성공적으로 작동된다. 이러한 경우의 압력에서 형성되는 유체 피막의 두께는 유회유 원자직경 정도가 된다. 마찰면은 아무리 매끄럽게 제작해도 이것보다는 훨씬 거칠다. 따라서 이런 경우에는 어떻게 유회가 효과적으로 이루어지는지 매우 궁금하였다.

이에대한 설명을 처음에는 1949년 소련 학자인 Grubin에 의해 제시되었고 영국 교수인 Crook에 의해서 확인되었다. 대부분 광유인 경우에 매우 높은 압력을 가하면 점도는 놀랄만큼 증가하게 된다. 예를 들면 100,000psi의 압력에서 점도는 10,000배 정도로 증가할 수 있다. 기어의 이표면 돌기사이의 틈에 채워져 있는 오일은 표면사이에 갇히게 되어 접촉 압력이 높아짐에 따라 실질적인 고체 피막같은 역할을 하게 된다. 이것이

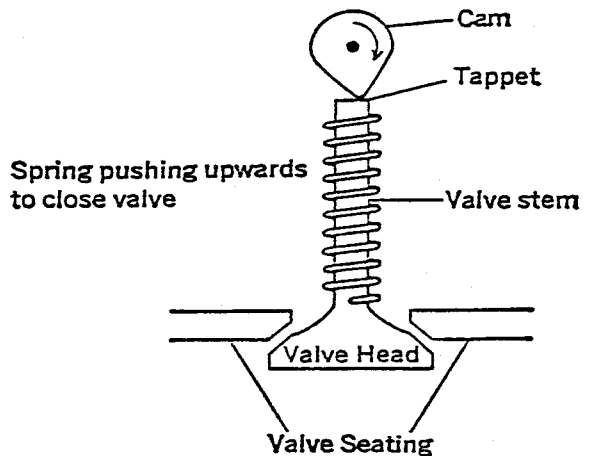


그림6 내연기관에서 작동되는 캠과 태핏의 배열 (캠과 태핏의 접촉압력 : 1000,000psi)

많은 기계의 윤활상태에서 원만히 작동되는 이유가 된다.

이러한 형태의 탄성유체 윤활은 피막 두께가 $\frac{2 \sim 10}{1,000,000}$ cm 정도 범위에서 잘 나타난다. 이러한 원리에 의해 성공적으로 윤활되기 위해서는 마찰 표면이 매끄러워야 하고 잘 배열되어 있어야 한다. 만약 이러한 조건이 성립된 기어나 캠과 태핏(그림 6) 같은 계통에서 금속 접촉없이 매우 높은 압력으로도 효과적으로 작동될 수 있다. 이때 마찰계수는 하중, 형태, 속도 등에 따라서 달라지지만 일반적으로 $\mu=0.01$ 에서 $\mu=0.1$ 정도가 된다. 그러나 여기에도 문제가 있다. 압력이 더 커지면 윤활유 점도가 더욱 커져 윤활면의 손상이 발생하지 않아야 되는데 실제로 손상이 생기는 이유는 무엇인가? 라는 것이다. 마찰면에서 생성되는 높은 순간온도에 의한 유막의 파괴가 생기지 않는지 아직도 분명한 설명을 못하고 있다.

5. 경계 윤활

접촉 압력이 매우 크던지 또는 마찰 속도가 매우 느리거나 표면조도가 매우 크면 마찰면의 거친 돌기부분이 윤활피막을 침투하게 된다. 이때 양마찰면에서 금속 접촉이 일어나고, 마찰이 증가하여 마모가 발생한다(그림 7 참조). 작동조건이 더욱 가혹해지면 윤활피막 파괴의 정도가 심

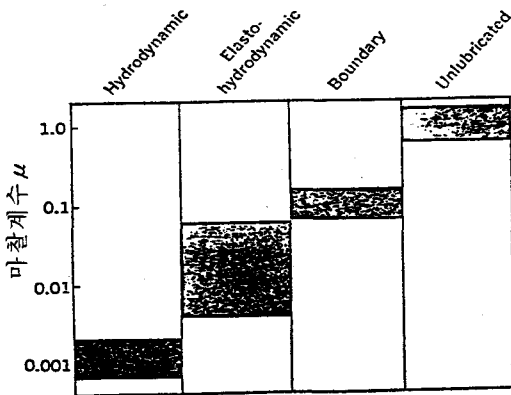
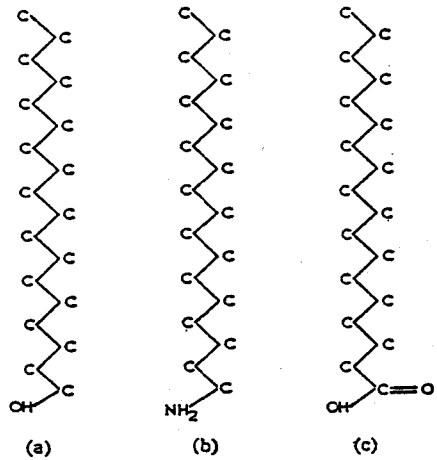


그림7 윤활조건에 따른 마찰계수의 범위 및 비교

하게 되어 마찰면의 소부(달라붙는 현상) 현상이 생기게 되고 작동이 불가능해진다.

만약 단순한 광유로 윤활된 경우의 마찰 마모 시험에서 약간의 유기화합물을 첨가하게 되면 앞의 상황(손상)은 상당히 개선 또는 지연된다. 이들의 첨가제는 매우 적은 양(1%보다 적음)이기 때문에 윤활유의 점도에는 거의 영향을 미치지 않는다. 이 첨가제는 윤활유가 금속표면에 강력히 달라붙는 기능을 해준다. 비록 그들이 일반적으로 하나 혹은 두개 정도의 분자두께로 되어 있지만 금속간의 접촉을 상당히 억제해준다. 따라서 윤활유의 마지막 경계층으로써 보통 경계 윤활로 알려져있다.

경계 윤활은 유체 윤활이나 탄성유체 윤활이



Lateral attraction between hydrocarbon chains

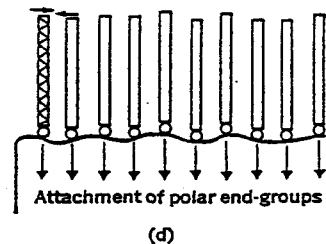


그림8 활성 극 말단기를 가진 탄소원자로 구성된 경계윤활 분자. (a)극 말단기가 OH인 알콜, (b)극 말단기가 NH₃인 아민, (c)극 말단기가 COOH인 지방산, (d)금속표면에 극성 말단그룹이 흡착된 경우

최소화되는 극히 낮은 속도나 매우 높은 압력하에서 상대운동할때 가장 잘 나타난다. 가장 좋은 경계 윤활제는 알콜, 아민과 지방산 같은 활성적인 극성을 갖는 긴 연쇄분자로 구성된 것들이다. 이러한 종류의 대표적인 분자가 그림 8에 제시되어 있다. 그들은 탄소원자와 활성적인 말단기로 이루어진 수산화탄소로 구성되어 있다.

알콜의 말단기는 OH이고 아민은 NH₃이며 지방산은 COOH로써 카복실기로 알려져 있다. 광유 속에 녹아있는 이러한 물질이 금속이나 고체 표면에 접하게 되면 활성적인 말단기는 고체에 달라붙고 점차 8b와 같이 표면층을 형성한다. 이 피막은 표면에 매우 단단히 붙어있고, 두면의 상대운동시에 최외측 표면끼리 미끄러지게 된다. 이때 표면의 거친 부분이 피막을 침투할 수는 있어도 광유만 있는 경우보다 훨씬 적게 된다. 경계윤활의 온도 효과에 관해서 살펴보자.

비반응성 금속인 백금표면에 스테아릭산의 피막을 입히기 위하여 윤활후 벤젠 같은 기화성 용매로 처리하였다. 그 다음 유체 윤활 특성과 마찰열 생성을 피하기 위하여 낮은 속도로 마찰시험을 하면서 표면온도를 상승시켜 보았다. 그림 9에서와 같이 표면이 69°C가 될때까지는 마찰계수는 일정하였고, 지방산의 용해점인 69°C 이후에서부터 점점 증가하기 시작하였다. 이때 금속간의 접촉이 증가하며 표면손상이 생기기 시작하였다. 만약 똑같은 시험을 반응성 금속인 구리를 사용하여 실시했을 경우에 초기마찰은 더 낮아지고($\mu=0.05$) 피막의 파괴는 120°C가 될때까지

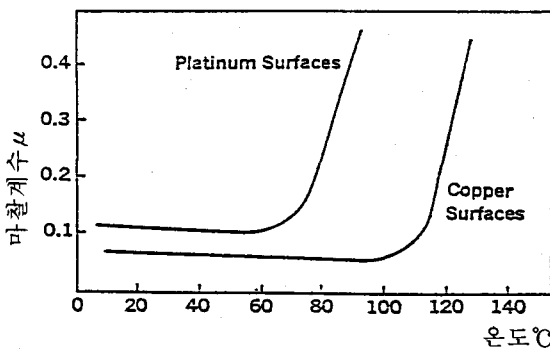


그림9 순수 스테아릭산으로 윤활된 백금과 구리 표면의 온도와 마찰계수와의 관계

일어나지 않는다. 이 온도가 구리 스테아릭의 연화점이다. 분명히 화학반응을 일으켰고 생성된 화합물은 표면에 잘 붙어 있으며 지방산보다 윤활성이 더 좋다.

경계 피막의 보호특성은 방사성 동위원소 방법에 의해 연구되었다. 마찰하는 물질에 방사성을 갖도록하고 다른 마찰면과 마찰시험한 후 가이거 계수기로 방사성 정도를 탐지함으로써 경계윤활시 금속 전이 특성을 알 수 있다.

6. 경계 윤활 작용

경계윤활의 주요기능은 금속접촉면의 상호교환작용을 억제하고 그 자신이 마찰면 사이에서 전단되어지는 피막을 형성한다. 금속의 상호교환작용이 완전히 제거되지는 않지만 피막이 고체상태이면 극히 낮은 값으로 줄어든다. 보통의 광유 같은 윤활유는 비교적 빈약한 윤활특성을 갖는다. 마찰면은 가장 잘 보호하는 경우에는 다음과 같은 성질을 갖는 긴 연쇄의 분자로 구성된 고체 피막으로 덮여있는 경우이다.

- ①표면 거친 돌기들에 의해 침투를 억제하는 연쇄사이의 강한 점착력
- ②마찰계수를 낮게해주는 낮은 전단강도
- ③높은 온도까지 보호할 수 있는 고체피막을 제공

위 성질을 갖는 경계 윤활 첨가제는 알콜, 아민과 지방산이 있다. 이들은 매우 조금만 첨가하여도 금속에 단단히 달라붙는 성질을 갖는다.

지방산은 금속이 반응성이면 금속과 반응하여 금속 비누를 만드는 장점을 더 갖는다. 여기서 비누라고 부르는 것은 보통사용하는 비누가 금속(나트륨이나 칼슘)과 지방산에 의해 형성된 화합물이기 때문이다. 그들은 바람직한 전단성질을 가질뿐만아니라 보통의 지방산보다 용해점이 상당히 높다.

경계 윤활은 마찰 금속면의 전이 현상을 수천배 감소시킬 수 있는데 이것은 금속간의 효과적인 접촉억제능력 때문이다. 또 경계윤활은 낮은 전단성 때문에 마찰계수도 상당히 감소시킨다. 그러나 접촉부분의 국부적 온도가 증가함에 따라 분자들의 연쇄(고리)가 잘라지고 피막은 녹아버린다. 따라서 마찰과 전이가 증가하게 된다. 그

래도 아직은 약간이 금속표면에 붙어있어 보호작용을 하지만 온도가 더 높아지면 윤활유 분자는 이탈하게 되고 금속접촉이 증대되어 건조마찰과 같은 상태로 된다.

따라서 경계윤활특성이 더욱 우수하기 위해서는 높은 온도에서도 금속으로부터 떨어져나가지 않는 성질을 추가로 요구하고 있다.

7. 그리이스

칼슘이나 나트륨 스테아릭산 같은 금속비누가 보통의 광유와 함께 혼합되면 비누는 물렁거리고 그리이스라고 부르는 연하고 쉽게 변형되는 풀과 같은 반고체 혹은 반액체 상태가 된다. 그리이스는 고대부터 알려져왔고 그 예로 기원후 77년에 Pliny는 나트륨 비누제조와 그의 사용에 관해 기술하였다. 이러한 비누계통의 그리이스는 대부분이 섬유나 분자연쇄가 3차원적으로 엉키어 있고 오일은 빈틈이나 동공내에 존재하게 된다. 이러한 그리이스는 약간의 윤활성만이 요구되고 윤활유가 쉽게 증발되거나 흐르지 않아야 되는 경우에 사용하기에 가장 이상적이다. 특히 볼이나 롤러베어링에 적합하다. 모든 그리이스가 비누를 포함한 것은 아니다. 상당한 종류는 벤트나이트나 실리카(규토) 같은 진흙 종류의 물질로 만들어진다. 이들은 온도변화에 비교적 안정하므로 넓은 온도 범위에서 사용가능하다. 그리이스의 또다른 장점은 금속의 부식을 억제할 수 있다는 것이고 작동기계를 먼지나 오염물질이 침투하는 것을 효과적으로 방지해주는 역할을 한다.

8. 극압 윤활

경계 윤활은 온도가 최대한 200~250℃ 정도가 되면 윤활 효과를 잃게되고 윤활유도 산화되어 버린다. 따라서 이러한 가혹조건에서는 다른 윤활유 즉 극압 또는 EP 윤활유를 사용하여야 한다. 그러나 실제 의미는 극한 압력이 아닌 높은 온도에 사용되는 윤활유를 말한다.

EP 윤활유는 보통 기유인 윤활유에 약간의 EP 첨가제를 혼합하여 만든다. 이런 첨가제의 대표적인 것이 인과 염소 및 황을 포함한 화합물이다. 일반적으로 이 물질들은 금속표면과 반응하여 금속 모체간의 직접 접촉을 억제하는 표면고

체 피막을 형성하는 기능을 갖고 있다. 만약 이 표면피막이 낮은 전단강도를 갖는다면 마찰계수도 감소시킬 수 있다. 일반적으로 인(phosphorus)으로 된 피막의 마찰계수는 낮고($\mu=0.2$), 황(sulphur)으로 만들어진 피막은 비교적 크나($\mu=0.58$) 온도에 안정적이고 수분에 영향을 받지 않으며 높은 온도까지 윤활 성질을 유지하는 특성을 갖고 있다.

비록 극압첨가제가 금속과 반응하여 그 기능을 발휘하지만 그들이 반응을 너무 심하게 할 경우에 화학적 부식에 의한 또 다른 마모를 유발함으로써 바람직하지 않다. 또 소부(달라붙는 현상) 직전 온도가 매우 높은 경우에 더욱 활발한 반응을 하는 것이 바람직하다. 이러한 이유로써 극압첨가제의 반응온도 이하에서는 경계윤활작용을 해주는 지방산과 함께 사용하면 넓은 온도 범위에 대해 효과적이 된다.

이에 대한 도식적인 설명이 그림 10에 있다. 그림에서 곡선 I은 파라핀 기유만에 대한 온도에 따른 마찰계수의 변화로써 초기부터 높고 온도증가와 함께 점점 증가하였다. 곡선 II는 기유에 경계윤활 첨가제인 지방산을 첨가시킨 것으로써 금속 비누를 만들기 위해 표면과 반응하고 상온에서부터 비누가 변화(응용)되는 온도(Tr)까

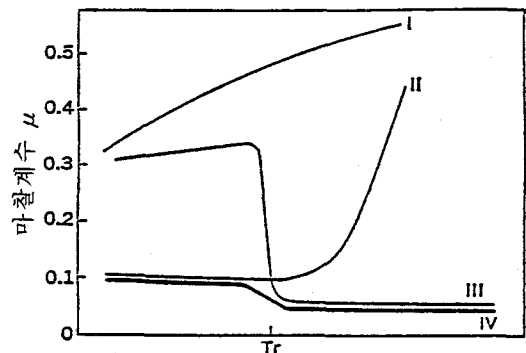


그림10 윤활유에 따른 온도와 마찰계수의 관계

- I : 파라핀 오일
- II : 파라핀 오일+경계윤활 첨가제
- III : 파라핀 오일+극압첨가제
- IV : 파라핀 오일+경계윤활첨가제+극압첨가제

지는 좋은 윤활 기능을 갖는다.

곡선 III은 기유에 극압첨가제를 혼합한 경우로써 일정한 온도 이하에서는 매우 늦은 반응을 하고 윤활성이 빈약하다가 일정한 반응온도 이상에서는 표면보호 피막 형성이 활발해지고 매우 높은 온도까지 효과적인 윤활성을 가진다. 곡선 IV는 경계윤활 첨가제와 극압첨가제를 동시에 혼합한 경우로 앞의 두 경우의 잇점을 동시에 얻을 수 있으므로 넓은 온도범위에서 효과적이거나 온도가 더욱 높아지면 역시 윤활성을 잃게 된다.

9. 결 론

이상에서 윤활에 관련된 가장 기초적인 내용을 알기쉽게 설명하였다. 보다 전문적이고 이론적인 내용은 전문 서적이거나 논문들에 수록되어 있으므로 참조하길 바라고 우선은 기본적인 개념 파악과 물리적 의미를 확실히 이해하여야 함으로 비교적 자세히 설명하려고 노력하였다.