潤滑理論

경계윤활과 그 이론

공군사관학교
교수 강 석 춘

Ⅰ. 서 론

상대운동을 하는 마찰면이 단지 몇개의 분자 크기만으로 분리되어 있을때 마찰과 마모는 윤활유의 화학성분과 금속표면의 특성에 의하여 결정되어지고 윤활유의 점성은 거의 영향을 미치지 못한다. 이러한 윤활상태를 W.B, Hardy 경에 의해 경계윤활(Boundary Lubricaton) 이라고 불리워졌고 많은 연구를 수행하였다. 이에 반해서 마찰특성이 점성에 지배를 받고 생성된 유막에 의해서 하중을 지지하는 경우는 유체윤활(Hydrodynamic Lubrication)로 불리우고 이 두상태간의 이동은 비교적 점진적으로 일어난다. 즉 속도가 감소하거나 하중이나 온도가 증가함에 따라 상대면을 분리해주는 윤활유의 두께는 얇아지고 유막을 투과하는 금속표면의 돌기(asperities)는 점점 증가하게 된다. 따라서 유체윤활의 역할은 감소하고 경계윤활의 역할은 증가한다. 이 중간과정에서 혼합윤활 또는 준 유체윤활이 존재하지만 그 정의는 애매하고 실제로 그 중요성은 크지않다. 윤활마찰기관에서 경계윤활상태는 기관의 설계, 정비, 성능 및 수명에 가장 큰 영향을 미치므로 윤활분야의 관계자들은 분명히 이해할 필요가 있다. 그런의미에서 E.P. Bowden의 설명을 바탕으로 여러각도에서 경계윤활의 현상을 상세히 고찰해 보고자 한다.

Ⅱ. 경계윤활에 미치는 영향

1. 연쇄길이(Chain length)의 영향

파라핀오일의 연쇄길이에 대한 영향이 그림 1에 표시되어있다. 일반적으로 파라핀이 액체인 경우 움직임이 때때로 중단되는 경우가 있고(Stick-slip motion) 이때에는 정지되는(Stick)점의 값을 취했다. 그러나 고체 파라핀의경우 움직임은 매우 매끄러웁다. 여기에서 마찰계수는 분자연쇄의 증가에 따라 감소하고 $\mu=0.1$정도의 값에 도달한다. 지방산에 대한 결과가 그림 2에 있다. 이 결과들에 의하면 매우 긴

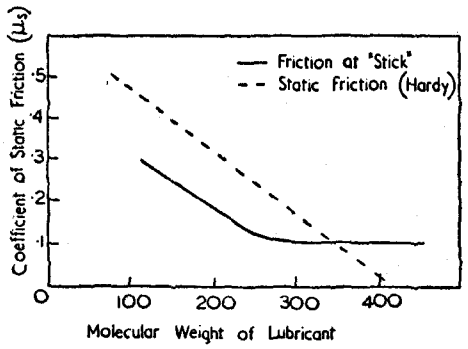


그림 1. 파라핀오일과 강철에서 마찰과 연쇄길이 혹은 분자중량과의 관계

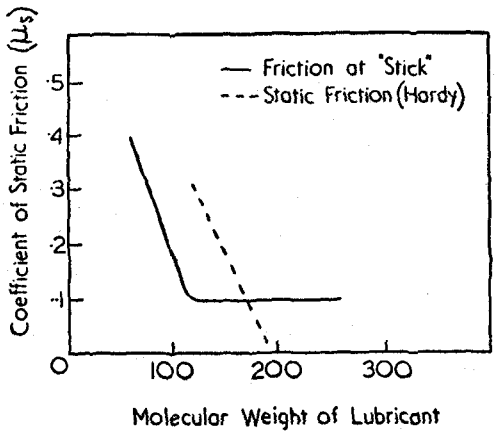


그림 2. 지방산과 강철에서 마찰과 연쇄길이 혹은 분자중량과의 관계

연쇄에서 최소값을 갖고 같은 조건에서 Hardy 경의 실험결과와 비슷하다. 그러나 Hardy 경은 충분히 긴 분자로 구성된 윤활유의 경우 마찰이 0이 될것이라는 가정과는 다르다. 또 같은 연쇄길이의 분자에 대해서 지방산은 파라핀보다 더 효과적인 데 이에대한 설명은 후에 제시할것이다.

2. 경계층 두께의 영향

간단한 실험에 의해 효과적인 경계윤활을 하는데 필요한 최소 유막(경계층)의 두께를 결정할 수 있다. 즉 0.1% 방향산이 포함된 순수한 파라핀 오일 약간을 깨끗한 카드뮴표면에 칠하면 낮은 마찰계수를 갖는다. 이때 작은 피펫을 사용하여 단계적으로 순수 파라핀 오일을 카드뮴표면에 덮여줌으로써 마찰과 표면손상의 변화를 측정한다. 지방산 모두가 금속표면에 흡착되었다고 가정하면 좋은 경계윤활특성을 갖는 방향산의 양을 계산하는것은 가능하다. 보통 윤활유의 두께는 한두개의 분자층으로 구성 되어있다. 따라서 매우 적은 지방산의 양이 윤활의 경계층 특성에 놀랄만한 효과가 있음을 보여준다. 식물성 기름이 윤활유로써 우수한 것은 바로 그속에 포함된 적은 양의 지방산에 기인하는것으로 밝혀졌다. 대부분 윤활에 필요한 필름의 두께는 마찰재료, 표면형상 및 사용하중에 좌우된다.

3. 필름의 마모

Stearic산의 필름에 대한 마모실험결과가 그림 3에 있다. 단일층 윤활막은 매우 쉽게 달아없어지지만 53개층의 필름은 상당한 반복에도 닳지 않는다는것을 보여준다. 표면손상에 대한 조사는 필름이 두꺼울수록 잘 보호해 준다는것이 밝혀졌다. 따라서 필름이 두꺼울수록 마모에 저항이 증가하고 표면보호능력을 증대시켜준다.

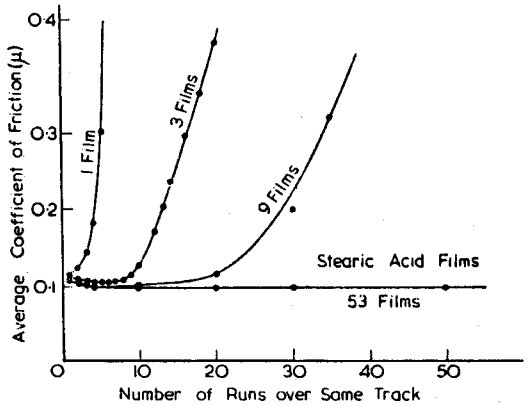


그림 3. Languir 관으로 강철표면에 여러 분자층의 지방산을 입힌 경우의 마모특성

4. 합성윤활유의 경계특성

실리콘은 유체윤활로써는 매우 매력적인 특성을 갖고 있으나 경계윤활특성은 좋지않다. 따라서 실리콘유로 윤활되는 구리면의 경우 마찰계수는 매우크고($\mu=1.4$) 표면은 심한 손상을 입는다. 강철의 경우 마찰계수는 좀 낮아지나($\mu=0.4\sim0.8$) 광유($\mu=0.2$)보다는 못하다. 이에 대한 이유는 간단하다. 즉 효과적인 경계윤활을 하기 위해서는 윤활유 분자가 분자들사이에 강한 측면 응축력(lateral attraction)으로 표면층을 형성하기 위해서 표면과 반응을 할 수 있어야 한다. 그러나 실리콘유는 화학적으로 안정하기 때문에 금속표면과 반응할 수 없다. 또한 실리콘원자의 부피가 크기 때문에 분자사이의 측면 응집력도 비교적 약하기 때문이다.

또 하나의 합성유로는 Fluorolubes로 알려진 그룹이다. 이들은 일부 또는 전체의 Hydrogen이 Fluorine으로 대치된 Hydrocarbon 분자로 구성되어 있다. 이 혼합물은 높은 열및 화학적 안정성을 갖고있고 상응하는 Hydrocarbon 과 동일한 혹은 더나은 윤활특성을 갖는다. 이러한 이유는 아직 잘 밝혀지지 않았지만 큰 불소원자가 탄소고리간의 강성도를 분리시켜줌으로써 금속표면을 더 잘보호해 주는것 같다. 그것은 매우 우수한 마찰특성을 갖는 고체 PTFE (Polytetrafluoroethylene)이고 실제로는 길다란 Fluorolube Polymer로 표기한다.

Fluorolube와 비슷한 Chlorolube (염소화합물)은 역시 좋은 윤활특성을 갖고있으나 Fluorolube와 같이 안정적이지는 못하다. 따라서 높은 온도에서 금속염을 형성함으로써 극압첨가제 역할을 하고 있다.

Ⅲ. 경계윤활의 이론

경계윤활에대한 Hardy경의 연구에서 마찰은 분자의 연쇄(chain) 길이가 증가함에 따라 감사한다는 것이 발견되었다. 따라서 지방산은 알콜보다 더 낫고 알콜은 탄화수소보다 더 낫다. 그는 윤활이 안된 경우에 마찰은 표면에서 힘의장(field) 간의 상호작용에 기인하는 것으로 보았고 윤활된 경우에는 윤활막이 힘의 장을 덮어주는 정도에따라 마찰이 영향을 받는다고 주장한바 있다. 그래서 극성을 갖는 분자들은 비극성 분자

보다 더 효과적일 것이고 마찬가지로 분자가 길수록 표면사이의 간격을 더 넓혀주기 때문에 표면간의 상호작용을 감소시켜준다. 이것이 연쇄길이의 증가에따라 마찰의 감소에 대한 설명이 된다는 것이다. 그러나 최근 이론에서는 이러한 견해를 약간 수정해서 금속표면과의 화학반응에 더욱더 중요성을 강조하고 있다. 이것은 경계조건에서 마찰하는 금속표면의 온도효과를 살펴봄으로써 간단히 증명이 된다.

1. 온도의 영향

경계윤활에서 온도의 영향은 시편을 가열하면서 마찰계수와 온도를 동시에 기록함으로써 조사될 수 있다. 일반적으로 온도가 증가함에따라 매우 정확한 온도까지 마찰계수는 별로 변하지 않는다. 이 온도에서 표면의 손상이 증가하면서 마찰계수의 급격한 증가를 가져오고 냉각에의해 원래로 되돌아온다. 파라핀과 알콜의 경우 이러한 현상은 고체의 용해점에서 일어난다. 지방산의 경우는 용해점 보다 더 높은 온도에서 일어난다. 그러나 실험이 은이나 백금판을 사용하였을 경우 지방산은 용해점에서 깨어진다. 즉 깨어짐이 더 높은 온도에서 일어날 경우는 단지 반응이 가능한 물질에 한한다. 이런 결과로부터 마찰현상은 지방산과 금속면 또는 금속산화면과의 화학반응에 의해서 표면에 있는 금속 비누막에 의한다는 것을 암시해 준다. 이 사실은 다음과 같이 증명한다. 만약 방향산이 백금 표면을 윤활시키기 위해서 사용되었다면 윤활층은 방향산의 용해점(44℃)에서 깨어진다. 그러나 만약 구리면에 사용되었다면 윤활은 110℃까지 효과적이다. 또 지방산이 비교적 더 높은 온도까지 좋은 윤활을 가능케 하는 것은 금속과 반응하여 금속 비누를 형성하기 때문이다.

2. 비누형성(soap formation) 메카니즘

만약 지방산이 금속표면과 작용하지 않는다면 윤활유로써는 비교적 효과가 없다. 이것은 다음과 같은 방법으로 증명된다. 그림 4와 같이 좁은 트랙을 윤활유 바로 밑에서 절삭한다. 그리고 그위에 있는 마찰봉(slider)이 절삭공구의 바로 뒷쪽 금속표면위를 지나가게 한다. 이런 방법으로 금속표면에 존재하는 산화막을 마찰봉 바로 앞에서 제거한다. 1%의 지방산 용액으로써 윤활은 매우 빈약하다. 단지 트랙이 산화되도록 물에 적시면 효과적인 윤활이 될 수 있다. 이것은 그림 5를 보면 분명히 알 수 있다. 이 사실은 지방산이 산화물과는 작용하지만 금속과는 작용하지 않는다는 것을 알 수 있다.

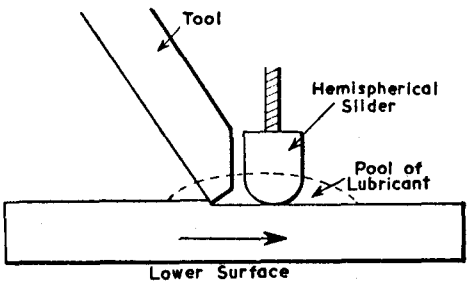


그림 4. Slider가 지나기전에 산화막을 제거한 표면준비 과정과 실험

3. 비누막의 물리적상태

비누형성의 현상은 금속표면에서 형성과정과 부착되는 방법에 따라 달라진다. 이상적인 조건에서 비누는 그들이 연하여지는 점(연화점)까지 효과적으로 윤활을 해주나 만약 금속표면에 비교적 약하게 부착되었을 경우에는 비누는 과도한 오일속에서 용해성의 증가로 비교적 낮은온도에서 금속 표면으로부터 분리된다. 그 결과로 막의 깨어짐은 연화(softening) 점보다 낮은 온도

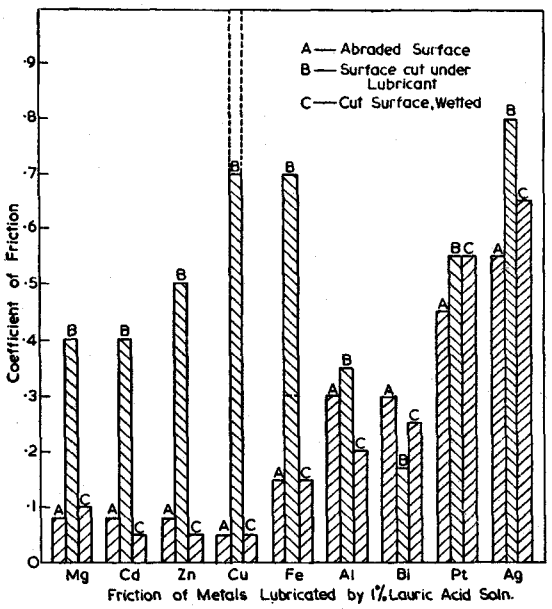


그림 5. 파라핀에 lauric acid 1%용액으로 윤활할때 표면처리에 따른 마찰특성

에서 일어난다. 반면에 파라핀오일에 있는 약간의 지방산은 화학적으로 형성된 금속비누의 전체적인 연화점까지 윤활효과를 증가시킬 수 있다. 다시 말하면 비누막에 물이 스며들어 수용성으로 된다면 막의 파열은 100℃정도에서 일어난다. 이것은 분명히 윤활층을 붕괴하는 과도한 수분의 비등에 기인한다. 그러나 만약 비누에 마르거나 기화하기 용이한 에에테르 용액을 침투시키면 그들의 전반적인 연화점(softening point)에 가까운 온도까지 윤활특성을 유지 한다. 이러한 관찰에 의하면 비누윤활이 실용적으로사용될 수 있다는 것이다. 만약 천연광유에 약간의 비누가 존재하면 그것은 금속표면에 흡착(absorbed)막을 형성하고 이것의 두께는 한 두 개의 분자 두께로 이루어진다. 그것은 실내온도에서 효과적인 윤활역활을 해주지만 ㅎ매성이 증가되었기 때문에 비교적 낮은 온도에서 파열된다.

만약 약간의 지방산이 광유 속에 녹아있으면 화학반응에의해 이미 형성된 비누막을 더욱 단단히 들러붙게하고 전반적인 용해점까지 효과적인 윤활작용을 해줄 것이다. 이것은부분적으로는 화학적으로 형성된 필름이 더욱 강력히 붙어있게 하고 또 일부는 화학반응에 의한 두꺼운 막을 형성해주기 때문이다. 또한 마찰에의해 막이 씻겨나가게되면 더욱 반응이 활발해져 비누막이 계속 보충되어 진다.

4. 흡착작용의 형태(Type of Adsorption)

흡착에는 물리적흡착과 화학적인 흡착의 형태가 있는데 이것은 예민한 방사성 방법으로 조사되어진다.

중성자 처리로 방사성을 갖도록한 얇은 금속박판을 지방산 용액에 담근다. 그리고박판을 옮겨서 뜨거운 벤젠으로 씻어내고 방사성을 조사한다. 만약 흡착이 물리적인 형태이었지면 방사성물질은 제거되지 않을 것이고 화학적이었다면 방사성금속은 막과 함께 제거되고 즉시 탐지된다. 그 결과는 금이나 은 같은 귀금속에는 반응이 일어나지 않으나 카드뮴 구리 또는 아연같은 금속에서는 반응은 즉시 일어나고 금속표면근처에서 형성된 비누의 양은 단일분자층 보다 훨씬 크다. 이것은 확산 효과인 것으로 보인다. 즉 지방산은 비누층으로 확산되고 표면과 반응하지만 주변용액으로 비누층의 확산율은 상당히 느리다. 결과적으로 금속면에 상당량의 비누가 축적하게 된다. 또 다른 흥미있는 현상은 분명히 더 반응성을 가진 금속에서 생긴다. 그것은 에스테르에 있는 불순물과 지방산에 원인이 있는지 또는 유리산과 표면에 있는 수소에 의한 것인지 분명치않다. 흥미있는 현상은 방사성방법에의해 상당한 화학반응을 보여 주는 경우 마찰특성이 에스테르의 용해점 보다 더 높은 온도까지 유지된다는 것이다. 이 사실은 매우 중요하다. 왜냐하면 에스테르가 상업용 윤활유로 사용되고 있고 그 효능은 최소한 부분적으로는 금속면에서 금속비누를 형성하는 그들 능력에 기인하기 때문이다. 다

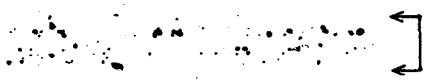
5. 윤활막의 전자회절시험

가열될 때 윤활막에서 일어나는 변화를 전자회절법을 이용하여 조사하였다. 백금과 아연면에서 흡착되는 단일층의 스테아린산에 대한 결과는 상온에서 표면과 막이 강한 적응성을 갖는다. 그러나 표면이 가열될 때 회절카메라 에는 적응성이 사라지는 임계온도까지는 별로 변화가 일어나지 않는다. 백금의 경우 비적응성(disorientation)은 산의 융점인 69℃ 정도에서 일어난다. 아연인 경우에는 아연산의 연화점인 130℃까지 적응은 지속된다. 표면을 실내 온도 까지 냉각시키면 적응된 패턴이 다시 나타남으로 이 회절 현상의 변화는 막(film)의 상태변화에 필수적으로 원인을 갖는다. 비슷한 결과도 다른산이나 금속에서도 얻어진다. 그것은 일반적으로 비반응 금속에 대한 비적응 온도가 산의 전체융점에 접근하고 반면에 반응금속은 훨씬 높은 온도에서 일어난다. 두 경우에서 비반응온도는 그에 일치하는 마찰시험에서 윤활상태가 파괴되는 온도와 비슷하다. 반응금속의 이런 결과는 금속비누의 형성을 의미한다.

6. 표면손상

경계윤활의 초기이론에서 전마찰은 윤활막 내에서만 일어난다고 제안되었다. 즉 이러한 경우 마모가 없다는 것을 의미한다. 이때 마찰은 극히 잦아야하고 연쇄 길이가 충분히 길면 0이 되어야 할 것이다. 실험에의하면 이러한 경우는 일어나지 않는다. 마찰계수는 0.04이하로 떨어지지 않고 보통은 이것의 두 배 가량이 된다. 최상의 경계윤활유일지라도 약간의 금속 마찰이 윤활면에서 일어나고 서로 다른면끼리 금속이 이전된다는 사실을 보여준다. 이것은 Electrographic분석에 의해 증명된다. 방법은 먼저 구리와 철판을 마찰 시킨다. 그다음 전해액에 담겨놓았던 겔라틴(gelatine)종이 조각을 철판위에 접촉하도록 놓고 금속이온이 철판을 통과하여 겔라틴에 달라붙도록 전류를 보낸다. 그때 적당

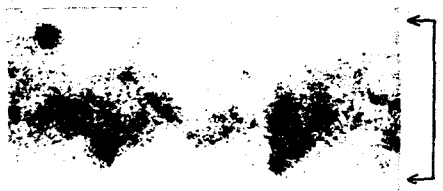
(*a*) Clean.



(*b*) Lubricated.

(a, b) Electrographs of polished steel surfaces showing distribution of copper fragments after a copper slider has traversed the surface once. Magnification × 7.

(*c*) Clean. Pick-up 2. 10^{-5} gm./cm.



(*d*) Lubricated cetyl alcohol. Pick-up 10^{-6} gm. cm.

(*e*) Lubricated copper laurate. Pick-up 10^{-9} gm. cm.

(c, d, e) Autoradiographs of copper surface over which a copper slider has passed once. Lubricants do not appreciably reduce the number of pick-up fragments, but enormously reduce their size. Magnification × 54.

한 시약을 구리이온이 나타나도록 젤라틴에 묻힌다. 깨끗한 구리와 윤활된 구리표면에 대한 electrograph가 그림 a) b) 에서 보여준다. 이런 방법으로 얻어진 다른 electrograph는 비록 금속 상호작용이 좋은 경계윤활이 된 경우에 상당히 감소되지만 완전히 제거될 수 없다는 것을 보여준다.

7. 금속전이(Metal transfer)에 대한방사성 조사

금속 서로간의 금속전이에 대한 방사성 조사 방법은 매우 예민하나 위험성의 문제로 현재는 별로 사용되지 못한다. 그러나 이방법은 1950년대 많이 실시되었고 그결과들은 다음과 같다. 실제 조사 방법으로는 방사성 금속을 비방사성 표면에 마찰시킨 후 가이거 계수기로 탐지하는 것이 있고 또 다른 방법은 금속표면에 사진판을 놓고 전이된 방사성에 의해 검게된 사진 감광판을 조사하는 것이다.

경계윤활에 있어서 마찰과 금속전이에 대한 radoiographic 결과가 c, b, e, 에 표시되 있다. 이들 결과에 의하면 먼저 금속의 pick－up이 계속된 마모의 형태가 아니라 점점이 끊긴 입자들로 구성되어 있다는 것이다. 비록 매우 큰 입자가 있다해도 전이된 대부분은 입자형으로 이루어져 있다. 어떤 경우에도 평균 크기는 그리 차이나지 않는다.

두번째, pick－up의 감소는 마찰계수의 감소에 비해 매우 크다는 것이다. 예를들면 훌륭한 경제윤활로 마찰할 경우의 마찰 계수는 약 20배 정도로 나쁜 경제윤활 보다 감소 시킬 수 있다 (μ= 1～0.05). 반면에 pick－up의 경우 20,000 혹은 그 이상으로 감소된다는 것이다. 세번째 사실은 윤활의 주요효과는 입자의 평균 크기를 감소시키는 것이 아니라 입자의 숫자의 감소이다. 전형적인 실례가 표 1에 있다.

8. 마찰과 마모

표 1로부터 또 하나의 다른 결론을 얻을수 있다. 즉 실리콘, 파라핀 또는 알콜 같은 나쁜 윤활유의 경우 마찰계수의 감소는 금속전이나 혹

Friction and pick-up on copper surfaces (2 Kg *load*)

Condition of surfaces	μ	*Pick-up* (× 10^9) *g/cm of track*	*Average mass of individual pick-up fragments (approx.)*
Unlubricated	1·2	20,000	10^{-7} gm
Lubricated with:			
Liquid silicone	1-1·2	10,000	10^{-7}
Liquid paraffin	0·2-0·3	500	10^{-9}
Solid paraffin	0·1-0·2	100	5.10^{-10}
Solid alcohol	0·15	50	3.10^{-10}
Fatty acid (inadequate reaction)	0·05-0·06	20	10^{-10}
Fatty acid (heavy reaction)	0·05	1	10^{-11}
Copper soap			

은 pick－up의 양의 감소에 의해 이루어지나 좋은 윤활유의 경우는 그렇지 않다. 두가지 좋은 윤활유는 pick－up을 20혹은 그 이상으로 차이를 갖지만 마찰은 큰 차이가 없다. pick－up 이 필수적으로 마모의 양의 척도이므로 마찰의 측정만으로는 상당히 다른 내마모성(antiwear properties)을 갖는 두개의 윤활유의 차이를 분간할 수 없다.

9. 온도의 영향

온도 증가에 따른 마찰과 pick－up에 대한 연구에 의하면 파라핀이나 알콜로는 마찰과 마모의 현저한 증가가 용융점 근처에서 가역적으로 일어난다. 비반응성 금속과 지방산에서 혹은 반응이 부적당한 상태하에서는 윤활상태의 파손(breakdown)은 용융점 근처에서 일어난다. 반응이 일어날 때에는 마찰이나 pick－up의 증가는 금속비누의 연화점보다 훨씬 높은 온도에서 일어난다. 또다른 중요사항은 윤활막의 용융점보다 높은 온도에서 윤활유 특성이 더이상 나빠지지 않는다는 것이다. 이때 마찰은 낮은 비율로 증가하지만 pick－up은 큰 비례로 증가된다. 이 단계에서 마찰과 pick－up은 윤활유가 금속에 존재해도 윤활이 안된 경우나 마찬가지다. 이 결과들은 그림 6 에서 팔미틴산(palmitic acid)에 의하여 카드뮴 표면을 윤활한 경우이다. 초기단계에서 화학공격은 효과적인 비누윤활을 하는데 불충분하고 첫번째 파괴는 산의 용융점에서 일어난다. 이때 마찰계수가 증가하고 금속전이가 상당히 증가한다. 고온 즉 130℃에서 더욱 악화되고 마찰과 표면손상은 윤활이 안된 경우나 마찬가지가 된다. 이 단계에 이르렀을 때 상당한 화학공격이 일어나고 상당량의 금속비누의 공급이 존재한다. 온도가 감소됨에 따라 마찰과 표면전이는 감소하고 110℃(비누가 고형화되는 온도)에서 마찰은 매우 작아지며 pick－up 역시 무시할 만큼 작아진다. 그다음 첫 파열이 항상 110℃에서 일어나는 것을 제외하고 같은 현상을 보여 준다. 온도 증가에 따라 윤활막의 상태변화는 전에 설명한 전자회절 현상에서 증명된바 있다.

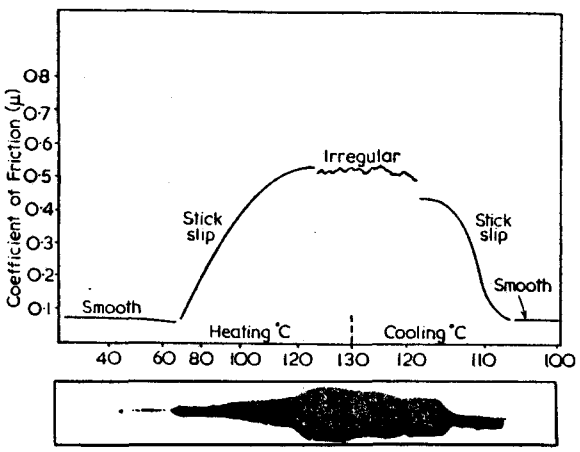


그림 6. 카드뮴 표면을 palmitic acid로 윤활했을때 마찰과 금속 전이현상.
첫번째의 불연속점은 막의 용해에 의한것임.
두번째 불연속은 분자의 탈착현상.
※ 냉각할때 효과는 가역적임.

10. 산화효과

앞에서 설명한 것은 마찰의 변화가 윤활막의 물리적 상태의 변화에 원인이 되고 또 가역이라는 사실이다. 가역적이 아닌 다른 형태의 변화는 윤활유에 상당한 산화가 일어나도록 가열함으로써 나타난다. 파라핀오일에서 초기에 생성된 산화는 윤활유에 약간의 지방산을 첨가했을때 생기는 것과 비슷한 윤활특성의 향상을 가져온다. 예를들면 철의 표면이 순수한 광유로 윤활되어지면 윤활은 중간정도이고 마찰계수는 0.2 가량이 되며 약간의 금속표면 손상을 수반한다 (그림 7 a). 만약 금속표면을 200℃에서 몇 분동안 가열된 후엔 움직임은 매끄럽고 마찰계수는 0.1정도로 감소되며 표면손상은 극히 작다 (그림 7 b). 그러나 계속 가열된다면 오일은 두꺼운 껌을 형성하고 마찰은 높은 값으로 증가하며 상당한 표면손상이 생긴다. (그림 7 c).

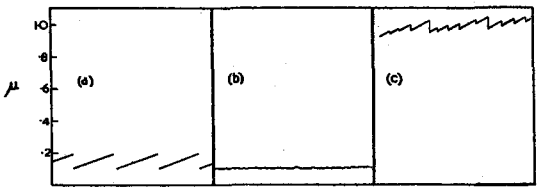


그림 7. 파라핀으로 윤활된 강철면에서 마찰에 대한 산화의 영향
a) 초기마찰
b) 산화가 마찰을 향상시켜준 현상
c) 과도한 산화는 높은 마찰을 가져옴

만약 오일에 공기를 주입시키면서 가열하면 비슷한 효과로써 처음에는 조금씩 상태가 개선되다가 다시 악화된다. 이 변화는 오일 막이 금속표면에서 가열될 때와 거의 비슷하지만 변화는 더욱 천천히 일어난다. 이것은 산화 형성물이 금속표면에의해 촉진되기 때문인것 같다.

분명히 이 결과들은 직접적이고 실질적인 의미를 갖는다. 즉 적은 양의 산화는 광유의 경계윤활특성을 향상시켜주나 계속되면 중합현상(polymerisation)에 의해 산화율이 급격히 증가되고 나쁜 생성물을 만든다. 이런 이유로 산화효과를 감소 또는 저항을 주기 위해서 윤활오일에 약간의 첨가제를 첨가하는 것이 보편화 되어있다.

Ⅳ. 경계윤활 메카니즘

앞서 설명한 금속마찰이론이 경계윤활제가 있는 곳에서 어떻게 수정되는가를 살펴보고 자 한다. 보통 하중은 윤활막과 윤활 막을 통과하는 조그만 금속 접촉면적 A에 의해 지지된다. (그림 8)

마찰력은 두항의 합으로 표시될 수 있다.

i) 금속 접합을 전단시키는데 요구되는 αAs의 힘, 여기서 α는 금속접합면적과 전체 면적과의 비이고 A는 전체면적이며 S는 금속의 전단강도이다.

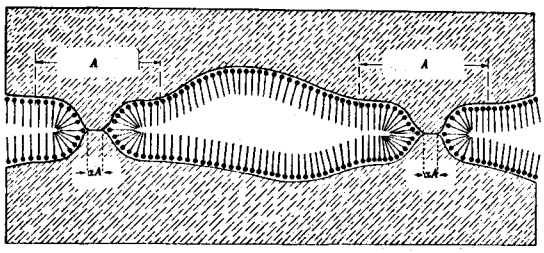


그림 8. 경계윤활의 메카니즘을 보여주는 그림

ii) 윤활막의 전단력은 $A(1-\alpha)Se$, 여기서 Se은 윤활자체의 전단강도이다.

그래서 전체의 전단력 F는

$$F = A(\alpha s + (1-\alpha)Se)$$

이 된다.

좋은 경계윤활유에서 α는 매우 작다. 금속성분은 마찰에 거의 영향을 주지 않으나 그래도 마모를 일으킨다. 나쁜 윤활유는 금속표면을 별로 잘 보호하지 못하고 α와 금속상호 작용의 양을 상당히 증가시킨다. 이때 마찰계수는 3～4 배로 증가되나 pick-up은 100 혹은 1000배 이상증가시킨다.

자동방사성 사진이 α의 값을 대략적으로 측정할 수 있게 해준다. 결과에 의하면 다음과 같다. 먼저 입자들이 크기에 상관없이 같은 모양을 갖고 있고 윤활이 있던 없던간에 전단과정이 비슷하며 입자수(접촉모양)는 윤활이 있다해도 거의 같다고 가정한다. 그러면 좋은 윤활유는 금속 전이의 양을 약 20,000배로 감소한다고 가정한다. 그때 전단되는 금속접합의 단면적이 $(20,000)^{2/3}$의 비, 즉 800정도의 비로 감소된다. 만약 윤활안된 경우 마찰이 1이라면 식에서 α의 값은 1/800이고 윤활된 경우에 금속접합은 1/800의 양 또는 관찰된 마찰계수가 0.0012이 될 것이다. 만약 $\mu=0.05$라고 한다면 금속접합이 마찰저항의 단 2～3 %만 기여하는 것처럼 보인다. 물론 이것은 어림된 계산이지만 아마 크기의 차원은 거의 맞는 결과를 주는것 같다.

이제 좋은 윤활유의 경우 마찰저항의 대부분은 윤활막 자체전단으로부터 온다는 결론을 갖는다. 이것은 최근 지방산의 단일층의 전단강도를 직접 측정에의해 입증 되었다. 이것은 서로 접촉된 두개의 운모(mica)서 실험한다. 운모는 분자상으로 매우 매끄럽기때문에 반사간섭에의해 측정된 기하학적 접촉면적은 실제 접촉면적이다. 간섭에 의한 방법은 정밀한 윤활층의 두께를 측정하게 해주고 경험적으로 단일층이 파괴되지 않음을 보여준다. 이 결과 단일층은 상당히 높은 비(Specific)전단 강도를 갖고 있고 공유 윤활막의 전단은 윤활면의 마찰에 상당한 부분을 담당하게 된다. 이것은 다음 결과를 제기한다. 잘 윤활된 주석(tin, 경도 4kg/㎟)과 잘 윤활된 공구강(경도 400kg/㎟)으로 일정한 하중에서 마찰을 비교해 본다. 주석의 면적 A는 강의 면적의 100배일 것이고 윤활막의 면적은 100배 더 클 것이다. 따라서 μ(주석)=100μ(강)이 될 것으로 예측할 수도 있겠다. 사실 마찰계수는 2배 정도이고 그이상 차이는 없다. 이에 대한 해석은 유기물질의 전단특성에 대한 Bridgeman 의 압력효과에 대한 연구에의해 유도될 수 있다. 그는 비 전단강도 Se은 압력과 거의 선형적으로 증가됨을 발견하였다. 따라서 강의 금속면사이에 있는 윤활막의 비 전단강도는 주석표면값 보다 약 100배 이상이 될 것이다. 따라서 주석의 μ값과 강의 μ 값은 대략 같은 차원이다.

윤활막의 물리적인 유동학 특성에 대한 압력의 효과는 분명히 매우 중요하고 그의 전반적

인 의의는 아직 충분히 알려지지 않았다. 액체윤활유는 그들이 실제 접촉면 근처에서 높은 압력을 받을 때 큰 비례로 점성이 증가하고 반면에 고체 윤활제는 그의 전반적인 전단강도가 약간만 증가함은 의심할 여지가 없다. 이것은 작동이 정상적으로는 불가능하다고 생각되는 하중, 속도범위에 작용하는 요소가 여러가지가 있는것 같다. 그래서 철사인발이나 고속 금속 압연에서 변형되는 금속표면에 약간의 유체윤활이나 혼합윤활이 일어나는 것을 보여주는 증거가 있다.

V. 결론

앞서 설명한 결과는 경계윤활의 주요기능이 마찰면 사이에서 금속 상호작용의 정도를 감소시킬 수 있게하고 따라서 쉽게 전단되도록 막을 끼우는 것이다. pick-up은 결코 완전히 제거시킬 수 없으나 윤활유가 고체상태라면 극히 낮은 값을 얻을 수 있다. 막이 고체이고 적당한 전단특성을 갖는다면 표면에 붙어있는 강도는 덜 중요할 것이다. 즉 약하게 붙어있는 고체 탄화수소는 지방산이나 비누보다 더 효과적일 것이다. 결과적으로 최상의 보호는 분자 연쇄사이에 강이 효과적인 이유가 된다.

온도가 상승함에따라 상호 측면인력은 열운동에 의해 차츰 제거되고 융접근처에서 거의 전부 상실한다. 이때 표면 돌출부는 특성을 잃은 막을 더 쉽게 침투할수 있으며 마찰과 pick-up 이 상당히 증가된다. 비록 윤활막이 완전히 그의 성질을 잃었다고 하지만 분자는 아직 금속표면에 붙어있어 약간의 표면보호를 해준다. 온도증가에따라 완전히 윤활분자의 특성을 잃을때까지 서서히 감소한다. 이 온도에서 윤활유는 금속표면으로부터 제거되고(desorption) 표면끼리 서로 접촉되어 윤활 안된경우와 동일해진다. 윤활유가 이탈되는 온도는 분자가 표면에 붙어있는 강도에 좌우된다. 이 단계에서 Hardy 경의 이론이 부분적으로 유효하다. 즉 분자극성이 많을수록 흡착될수있는 온도는 높아진다. 그것은 적절한 전단특성과 높은 용융점을 갖는것과는 달리 좋은 경계윤활은 높은 온도까지 강력히 표면에 붙어있어야 하는 것이다.

韓国潤滑学会 加入案内

学会는 化学·金属·素材·熱力学·機械·潤滑管理에 従事하는 技術人 또는 이에 関心을 가진분들과 学生들의 많은 加入을 바라고 있다.

● **事業計劃**

1. 刊行物 発刊　　2. 学術講演会 開催　　3. 学術用役事業
4. 分科委員会 事業　　5. 国際協力事業

● **会員의 区分 및 資格**

1. 正 会 員 : 潤滑에 관한 相当한 学識과 経験이 있는者 또는 潤滑에 관한 業務에 従事하거나 潤滑에 관심을 가지고 있는者.
2. 学生会員 : 潤滑에 관련되는 学科에 在学中인 者.
3. 特別会員 : 潤滑에 관련되는 団体, 企業体로서 本会의 目的에 찬동 지원하는 者.
4. 名譽会員 : 潤滑에 관한 学問, 技術의 発展에 功績이 현저한者 또는 本会의 目的達成에 큰 貢献을 한者.

● **加入節次**

加入하고자 하는분은 学会所定의 加入願과 年会費(正会員 10,000원, 学生会員 5,000원)을 学会로 보내면 된다.

● **住　　所**

우편번호 150
서울 永登浦区 大林洞 1016－21
☎ 845－2977