

윤활연구



Tribology의 기본적 개념

한국과학기술원
부교수 김 경 용 박사

1. 트라이볼로지에 있어서의 表面

트라이볼로지라는 용어에 대해서는 이전에도 해설한 바 있으나 “상대적으로 운동하면서 서로 영향을 미치는 두면 및 그와 관련된 제문제와 실제응용에 관한 과학과 기술”이라고 정의된다. 좀더 구체적으로 또 간단하게 표현하면 마찰, 마멸, 윤활에 관한 과학과 기술을 취급하는 학문이라고 할 수 있다.

어떤 기계에도 반드시 움직이는 부분과 움직이지 않는 부분이 있고 그 사이에는 많은 트라이볼로지에 관한 문제가 발생한다. 따라서 트라이볼로지에 관한 연구는 베어링이나 치차등의 기계요소등을 대상으로 하는 경우가 많은실정이다.

그런데 그러한 기계요소에서의 트라이볼로지에 관한 문제는 두면 좀더 정확하게 말하면 두 물체의 표면이 접촉 혹은 접근했을 때 일어나

는 문제이므로 물체의 표면이라는 것이 어떻게 되어 있는지를 아는 것이 트라이볼로지 연구의 첫 단계가 될 것이다.

1. 1 표면의 기하학적 형상

기계에서 사용되고 있는 부품뿐만 아니라 이 세상에 존재하는 거의 모든 물체의 표면은 그 표면자체가 처음부터 있었던 것이 아니고 반드시 어떠한 과정을 거쳐(기계부품의 경우는 절삭, 연삭소성가공, 열처리등이 해당됨) 형성된 것이라고 말할 수 있다. 그러한 고체표면의 형상에 대하여는 평면, 원근면, 구면등의 거시적인 표현을 사용하는 것이 일반적이고 또 트라이볼로지의 문제를 취급하는 경우를 제외하고는 그것으로 거의 충분하다. 예를 들어서 평면과 구면 평면과 원근면등의 접촉문제(접촉응력, 변형률등을 탄성역학적으로 구하는 문제)에서는 표면의 형상을 기하학적으로 완전한 평면, 원근면,

$$M = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}, N = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}$$

圖 解	計算式의單位는 kg, cm		$E_1 = E_2 = E$ $= 2.12 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$	
	$E_1 \neq E_2$	$E_1 = E_2 = E$		
球 와 球		$a = 0.88 \sqrt[3]{\frac{P M}{N}}$	$1.11 \sqrt[3]{\frac{P}{E N}}$	$8640 \cdot 10^{-6} \sqrt[3]{\frac{P}{N}}$
		$\delta = 0.77 \sqrt[3]{\frac{P^2 M^2 N}{E^2}}$	$1.23 \sqrt[3]{\frac{P^2 N}{E^2}}$	$75 \cdot 10^{-6} \sqrt[3]{\frac{P^2 N}{E^2}}$
		$\sigma_{\max} = 0.62 \sqrt[3]{\frac{P N^2}{M^2}}$	$0.388 \sqrt[3]{\frac{P E^2 N^3}{M^2}}$	$6400 \sqrt[3]{\frac{P N^3}{M^2}}$
球 와 平 面		$a = 0.88 \sqrt[3]{\frac{P M}{r}}$	$1.11 \sqrt[3]{\frac{P}{E r}}$	$8640 \cdot 10^{-6} \sqrt[3]{\frac{P}{r}}$
		$\delta = 0.77 \sqrt[3]{\frac{P^2}{r^2 M^2}}$	$1.23 \sqrt[3]{\frac{P^2}{E^2 r}}$	$75 \cdot 10^{-6} \sqrt[3]{\frac{P^2}{r}}$
		$\sigma_{\max} = 0.62 \sqrt[3]{\frac{P}{r^2 M^2}}$	$0.388 \sqrt[3]{\frac{P E}{r^2}}$	$6400 \sqrt[3]{\frac{P}{r^2}}$

円筒과 円筒		b	$1.08\sqrt{\frac{PM}{lN}}$	$1.52\sqrt{\frac{P}{lEN}}$	$1040 \cdot 10^{-8} \sqrt{\frac{P}{lN}}$
		δ	$0.65M \frac{P}{l} \lg \frac{67l}{MNP}$	$1.3 \frac{P}{El} \lg \frac{33.5El}{NP}$	$615 \cdot 10^{-8} \frac{P}{l} \lg \frac{71 \cdot 10^6 l}{NF}$
		σ_{max}	$0.59\sqrt{\frac{PN}{lM}}$	$0.418\sqrt{\frac{PEN}{l}}$	$610\sqrt{\frac{P}{lN}}$
円筒과 平面		b	$1.08\sqrt{\frac{PMr}{l}}$	$1.52\sqrt{\frac{Pr}{lE}}$	$1040 \cdot 10^{-8} \sqrt{\frac{Pr}{l}}$
		δ	$0.65M \frac{P}{l} \lg \frac{67lr}{MP}$	$1.3 \frac{P}{El} \lg \frac{33.5Elr}{P}$	$615 \cdot 10^{-8} \frac{P}{l} \lg \frac{71 \cdot 10^6 l r}{P}$
		σ_{max}	$0.59\sqrt{\frac{P}{lMr}}$	$0.418\sqrt{\frac{PE}{lr}}$	$610\sqrt{\frac{P}{lr}}$

* lg는 常用对数.

(표 1)

구면등으로 가정하여 Hertz에 의해서 표1과 같이 구해지고 있고, 실제로 많은 분야(rolling bearing, gear 등)에서 유익하게 이용되고 있다. 그러나 마찰이나 마멸등의 문제를 생각할 때에는 표면을 좀더 미시적으로 파악하는 것이 필요하다.

固体的 표면이 형성될 때 사용된 가공방법에 따라 정도의 差異는 있어도 어떤 표면에도 미시적으로는 반드시 그림 1에서 PROFILE이라고 표시한 것과 같은 요철이 존재한다. 그림 1은

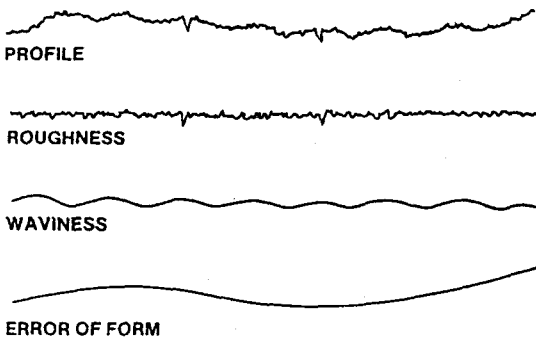


그림 1

실제의 표면형상을 표면거칠기(roughness), 표면파형(Waviness) 및 거시적인 형상오차(Error

of form)의 세가지 요소로 나눈 결과를 나타낸다. 이중 표면거칠기는 윤활상태가 탄성유체윤활상태 혹은 경계윤활상태에서 윤활성능에 큰 영향을 미치게 되며, 마멸은 이상적인 유체윤활상태에서는 일어나지 않는 것을 동시에 생각할 때, 마멸방지 및 기계수명의 연장등을 도모하기 위해서는 표면거칠기를 정량적으로 파악하는 것이 필수적이라고 할 수 있다. 표면거칠기를 나타내는 방법에는 여러가지가 있는데 그중에서 비교적 많이 이용되는 것은 C. L. A. (centre line average 및 R. M. S. (root mean square) 등이고 다음과 같이 정의 된다.

$$C. L. A. = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \quad (1)$$

$$R. M. S. = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l \{f(x)\}^2 dx} \quad (2)$$

여기서 $f(x)$ 는 거칠기를 나타내는 곡선의 중심선을 x 축으로하여 표시한 요철곡선이다.

실제의 표면거칠기를 측정하는 방법을 표2에 나타낸다.

Method	Resolution (μm)		Comments
	Lateral	Vertical	
Optical microscope	0.25-0.35	0.18-0.35	Results depend on the quality of the optical system and hence depth of field of photomicrographs
Light profile	0.25	0.25	Using optimum microscopic conditions
Oblique section	0.25	0.025	Sectioning angle = $\tan^{-1} 0.1$ and optimum microscopic conditions
Interference microscope	0.25	0.025	Requires high specular reflectivity of surface
Multiple beam interference	5	0.005	Requires high specular reflectivity of surface and angular deviations greater than 5°
Reflection electron microscope	0.03-0.04	0.03 0.02-0.008 0.005	Vertical resolution from profiles. Vertical resolution from shadows Vertical resolution using stereo device.
Electron microscope	0.005	0.0025	Vertical resolution using shadowed replica angle $\tan^{-1} 0.3$
Profilometers	1.3-2.5	0.005-0.25	Finite size of the stylus is ultimate limit on resolution

(표 2)

1. 2 표면의 질적 특징

표면의 기하학적인 형상이 위에서 기술한 바와 같이 복잡한 것이라고 해도 그러한 표면의 성질이 고체내부의 성질과 같은 경우에는 트라이볼로지의 문제는 비교적 간단해질 것이다. 그러나 실제의 고체표면에는 고체내부와는 상당히 다른 성질을 갖는 부분이 존재하는 것이 일반적이다. 보통 우리가 어느 재료의 성질을 검토하는 경우에는 이와 같은 표면 가까이의 특이성을 무시하는 일이 많다. 금속학이나 재료강도학이라는 학문의 주체를 이루는 부분에서는 그와 같은 취급이 오히려 일반적이다. 그러나 트라이볼로지는 표면에 관한 과학기술이므로 트라이볼로지에 관여하는 고체의 성질의 대부분은 고체의 내부의 즉 고체의 고유의 성질이 아

니라. 표면 부근의 층이 나타내는 성질일 것이다.

그렇다면 이와 같은 층은 어떻게 해서 생성되는 것일까. 이 문제를 생각할때는 우선 표면 자체가 어떻게 해서 만들어지는가를 생각해 보는 것이 필요하다. 전해 연마등의 특수한 방법에 의해서 만들어진 면을 제외하고, 고체의 표면은 대체로 절삭, 연삭, 연마등의 기계가공이나 소성가공등에 의하여 만들어진다. 이러한 가공 방법에 의해 만들어진 면은 가공도중에 매우 큰 힘을 받거나 급격한 온도변화를 받게되며, 그 결과 고체내부와는 상당히 다른 성질을 가지게 된다. 또 그러한 표면을 마찰 시키면 마찰과정 자체에 의해서도 표면에 힘이 가해지거나 고온 상태가 되기 때문에 표면의 성질은 더 변하게 된다. 위에 기술한 이유로 인하여 생기는 표면층을 가공변질층 및 마찰변질층이라고 부른다.

이러한 표면층의 변화로서는 표면부근에서의 경도변화, 잔류응력변화, 합금원소의 배합율변화, 특수한 화합물의 생성등 매우 다양한 변화가 보고되고 있다. 그림 2는 표면부근의 단면을 나타내는 대표적인 예이다.

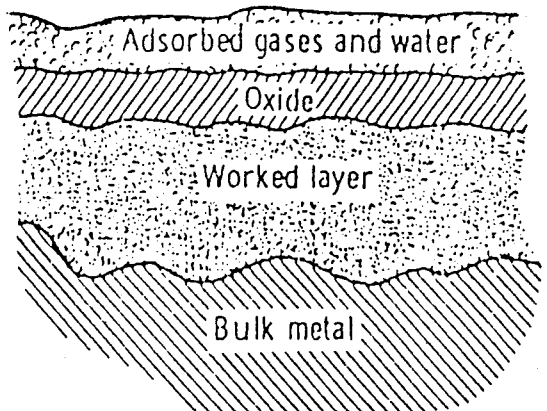


그림 2

그런데, 이와 같은 표면부근의 성질의 변화가 트라이볼로지에 관련한 제현상에 어떤 영향을 미치고 있는 것일까. 유감이지만 그 문제에 대해서는 현재까지 확실하게는 밝혀져 있지않는 실정이다. 여러가지 형태의 변화는 그 자체가 흥미로운 문제이나 그러한 변화의 모두가 마찰이나 마멸등에 중요한 영향을 미치고 있지는 않

을 것이고, 취급하는 현상에 따라 어느 정도의 깊이까지의 변화가 영향을 미치는가도 다를 것이다. 이러한 점들은 앞으로 해명되어야 할 문제라고 할 수 있다.

2. 마찰

고체표면에는 일반적으로 각종의 오물이 붙어 있어, 어떠한 표면처리를 행하더라도 이것들은 완전히 제거하는 것은 거의 불가능하다 (그림 2). 이러한 오물의 막은 일반적으로 고체의 마찰을 저하 시키도록 즉 일종의 윤활막의 역할을 할 경우가 많은데, 적절한 화학적, 물리적 처리를 행하면, 흡착물질막은 상당한 정도까지 제거할 수 있으며, 청정한 표면을 얻을 수 있다. 이러한 청정고체면의 마찰을 건조마찰이라고 한다. (그림 3-a).

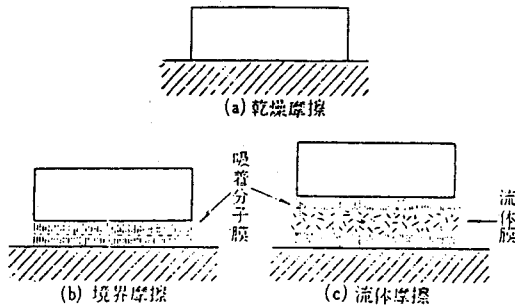


그림 3

청정한 고체면상에 기체나 액체분자의 흡착분자층이 형성되고 누적 되면, 그 윤활작용에 의하여 마찰은 저하되며, 일반적으로 흡착량이 증가함에 따라 처음에는 급격하게 그 후에는 서서히 저하 된다. 이와 같이 고체의 청정면이 기체, 액체의 흡착분자층으로 윤활되고 있을 때의 마찰을 경계마찰이라고 한다. (그림 3-b). 청정한 고체면 사이에 액체 혹은 기체가 유택하게 전재 하고, 두면의 형상과 두면의 상대운동이 적절하기 때문에 두면사이에 두꺼운 유체막이 생성되며, 그막 내부의 유체압력이 하중을 지지할 수 있을 경우의 마찰은 점성유체역학적으로 정해 지는 것이고 이것은 유체마찰이라고 한다. (그림3-c).

실제로는 건조마찰계수는 $10^1 \sim 10^0$, 경계마찰계수는 $10^{-1} \sim 10^{-2}$, 유체마찰계수는 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 의 범위가 될 경우가 대부분이다.

3. 윤활

윤활상태는 기본적으로 고체윤활, 경계윤활, 유체윤활의 세가지로 구분할 수 있다.

고체윤활은 특수한 고체물질을 마찰면 표면에 붙임으로써, 마찰이나 마멸을 저하 시키는 것이고, 마찰기구상으로는 건조마찰에 속한다. 붙이는 고체물질 자체가 부드럽거나, 전단에 의해 내부에 미끄럼이 일어나기 쉽거나, 기타 윤활제로서 필요한 제성질을 가지고 있으므로, 그것을 붙임으로써 마찰면 자체의 마찰보다 훨씬 낮은 마찰계수(일반 경계마찰과 비슷한 $\mu = 10^{-1} \sim 10^{-2}$: μ 는 마찰계수)를 실현 시킬 수 있는 것이고, 유체윤활제등을 사용하기 어려운 특수한 부분에 혹은 특수한 목적으로 사용 될 경우가 많다. Graphite, MoS_2 등은 그 좋은 예이다.

고체윤활 상태는 기본적으로는 고체마찰 상태이므로, 그 마찰 법칙은 거의 Amontons-Coulomb의 법칙에 따른다. 즉 마찰력 F 는 마찰면 재료 재료 및 표면의 청정한 정도등의 주어지면 미끄럼 속도나 걸보기의 접촉면적에는 무관하고 수직하중 P 만에 비례한다. 이것을 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$F = \mu P \quad (3)$$

$$\mu = F/P \quad (4)$$

경계윤활은 고체면에 흡착한 단분자 내지 수분자막 정도의 두께 (10^{-6} mm 정도)의 액체 혹은 기체분자층에 의한 윤활이며, 고체마찰면의 마찰이나 마멸을 충분히 저하 시키기에는 만족할 만한 상태라고 말하기는 어렵다. 그러나, 일반적으로는 고체마찰보다는 훨씬 마찰을 저하 시킬 수 있다. 경계윤활에 있어서의 마찰은, 그 기구상 윤활제 자체의 분자 혹은 윤활제 성분중에 흡착성이 강한 성분을 포함 했을 때 현저히 저하 하나, 이 흡착층은 고체면에 흡착 한꺼거의 액체 적인 유동성을 지니지 않으므로 그 마찰 법칙도 건조마찰과 마찬가지로 대체로 Amontons-Coulomb의 마찰 법칙에 따른다.

유체윤활은 마찰면 사이에 충분히 두꺼운 (10^{-5} mm 이상) 유체막이 개재하는 형태의 윤활이며, 이때는 고체면의 직접접촉은 전혀 존재하지 않으므로, 일반적으로 마찰도 낮고 마멸도

없다. 이 유체막의 두께는 마찰면의 기하학적 형상이나 마찰조건 및 유체의 점도등으로 유체 역학적으로 정해지며, 그 마찰 법칙은 Newton의 점성마찰식에 의해 다음과 같이 규정된다.

$$F = (\eta UA/h_0) K \quad (5)$$

$$\mu = \{\eta UA / (Ph_0)\} K = \{\eta U / (ph_0)\} K \quad (6)$$

단 η 는 유체의 점성계수, U 는 마찰속도, A 는 마찰면적, P 는 수직하중, $p = P/A$, h_0 는 유체막의 최소 두께, K 는 유체막의 형상으로 정해지는 무차원 상수이다. 즉 Amontons - Coulomb의 법칙과 달리, 유체. 윤활의 마찰계수는 $\eta U / (ph_0)$ 라는 무차원수로 정해지게 된다.

4. 실제의 고체면의 윤활상태 (혼합마찰)

위에서 기술한 윤활의 형태는 이상화된 상태에서 분류된 개념이고, 각각의 상태에 대한 고유의 마찰법칙이 어떠한 것인가를 기술한 것인데, 실제의 고체표면에는 roughness, waveness, 조립시의 변형, 열변형등이 존재하고 있어서 전 마찰면이 균일한 윤활상태가 되는 것은 기대하기 어렵다.

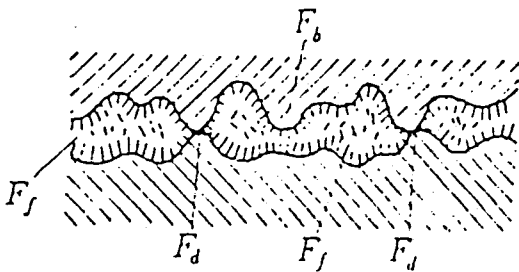


그림 4

즉 그림 4에 나타낸바와 같이 두면이 매우 접근하여 강하게 접촉하는 부분에서는 경계막도 과단하고 건조마찰 F_d 가 발생하고 있고, 비교적 가벼운 접촉부분에서는 경계마찰 F_b , 그리고 매우 약한 접촉 혹은 전혀 접촉하고 있지 않은 부분에서는 유체마찰 F_f 가 일어나고 있을 것이며, 전체 마찰 F 는 이들의 합으로 다음과 같이 표시된다.

$$F = F_d + F_b + F_f \quad (7)$$

전하중 P 를 건조, 경계, 유체의 윤활상태로

각각 X_d, X_b, X_f 의 비율로 분담하고 있다고 하고, 각 상태의 마찰계수를 각각 μ_d, μ_b, μ_f , 전체의 평균마찰계수를 μ 라고 하면

$$X_d + X_b + X_f = 1 \quad (8)$$

$$F = \mu P, \quad F_d = \mu_d P_{xd}, \quad F_b = \mu_b P_{xb},$$

$$F_f = \mu_f P_{xf} \quad (9)$$

건조, 경계의 두 마찰면의 평균마찰계수 (실험적으로 측정된 소위 경계마찰계수)를 μ'_b 라고 하면

$$F_d + F_b = \mu'_b (P_{xd} + P_{xb}) \quad (10)$$

식(7)~(10)에서 실제 윤활면에서 각 마찰상태로 분담하고 있는 하중의 비율은 다음과 같이 구해진다.

$$X_d = \frac{(\mu - \mu_f) (\mu'_b - \mu_b)}{(\mu'_b - \mu_f) (\mu_d - \mu_b)} \quad (11)$$

$$X_b = \frac{(\mu - \mu_f) (\mu_d - \mu'_b)}{(\mu'_b - \mu_f) (\mu_d - \mu_b)} \quad (12)$$

$$X_f = \frac{\mu'_b - \mu}{\mu'_b - \mu_f} \quad (13)$$

유체마찰에 의한 하중분담비 X_f 가 무시할 수 있을 정도 작은(속도가 매우 작을 때 등) 경우에는, $X_f \approx 0$ 이므로

$$X_d = \frac{\mu - \mu_b}{\mu_d - \mu_b} \quad (14)$$

$$X_b = 1 - X_d = \frac{\mu_d - \mu}{\mu_d - \mu_b} \quad (15)$$

또, 건조, 경계의 두 마찰면에서 하중을 분담하고 있는 비율 X'_b 는

$$X'_b = X_d + X_b = \frac{(\mu - \mu_f)}{(\mu'_b - \mu_f)} \quad (16)$$

보통 윤활상태에 대하여 위식에서 계산하면 X_d 나 X_b 가 작고 수% 정도의 경우라도, 건조 및 경계마찰 부분에 집중하는 마찰이나 발열량은 전체 마찰이나 발열량의 대부분을 차지 하는 것으로 추정되며, 이것은 실제 윤활면에서의 각종 손상의 기구를 이해 하는데 매우 중요한 일이다.

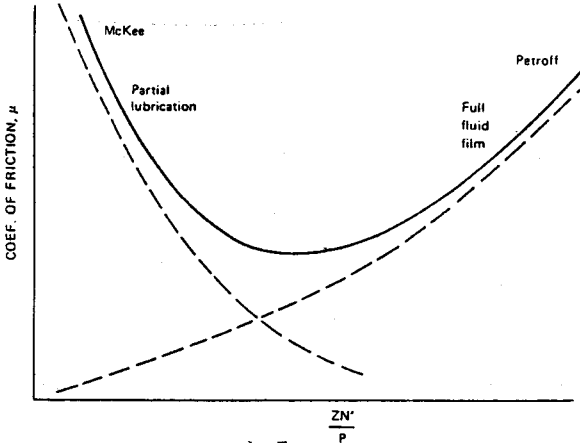


그림 5

그림 5는 윤활면에 작용하는 평균압력P, 윤활제의 점성계수Z 및 축의 회전속도N으로 만들어지는 무차원 변수 ZN'/P 과 마찰계수의 관계를 나타낸 것이고 Striebeck 곡선이라고 한다. ZN'/P 가 클 때는 유체윤활상태, 작을 때는 경계윤활상태에 대응하고 있으며, 거의 모든 윤활면의 마찰계수를 정성적으로는 이러한 곡선으로 나타낼 수 있는 것으로 알려져 있다.

5. 마멸

마멸의 형태를 분류하면 다음의 4 가지를 기본 형태라고 할 수 있다.

(1) 응착마멸 (adhesive wear) : 표면요철부분에 응착에 기인하여 가속한 운전상태에서 생기는 마멸.

(2) 연삭마멸 (abrasive wear) : 경도가 높은 입자 혹은 면에 의한 절삭작용에 의하여 생기는 마멸

(3) 부식마멸 (Corrosive wear) : 주변환경 혹은 윤활제의 부식작용과 마찰의 기계적작용이 동시에 전재함으로써 생기는 마멸

(4) 피로마멸 (fatigue wear) : 마찰면에 수직력 및 마찰력이 반복하여 작용함으로써 생기는 마멸
 마멸의 응착이론 혹은 연삭이론에 의하면 마멸량V는 하중W, 마찰면의 이동거리ℓ, 마찰면의 표면경도 H에 의해 다음과 같이 표시 된다.

$$V = k \frac{W\ell}{H}$$

여기서 k는 표면의 재료, 요철, 청정한 정도 등에 의해 정해지는 비례상수 이다.

6. 유체윤활과 EHL (Elasto-hydrodynamic-lubrication)

상대적으로 운동하는 두면을 유체로 완전히 분리 시키고 있는 유체윤활 상태에서는 두면 사이에 작용하는 하중을 지지할 수 있는 만큼의 유체압력이 윤활막 내부에서 발생 돼야 한다. 이러한 윤활막 내부의 압력은, 점성유체에 대한 Navier-Stokes 의 방정식 및 연속 방정식으로부터 유도되는 다음과 같은 Reynolds 방정식에 의해 정해진다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{12} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^3}{12} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6(U_1 - U_2) \frac{\partial h}{\partial x} + 6(V_1 - V_2) \frac{\partial h}{\partial y} + 6h \frac{\partial}{\partial x} (U_1 + U_2) + 6h \frac{\partial}{\partial y} (V_1 + V_2) + 12(W_2 - W_1) \quad (17)$$

여기서 p는 압력, h는 윤활막의 두께, η는 윤활제의 점도, x, y는 윤활면상에서의 좌표, U_1, U_2, V_1, V_2 는 각 윤활면의 x, y 방향으로의 속도, W_1, W_2 는 윤활면에 수직방향으로의 윤활면의 속도를 나타낸다. 이 식의 물리적 의미를 간단하게 생각하기로 하면 다음과 같다. 대충 설명하면 식(17)의 왼편은 압력 p의 2 차미분이고 P의 요철의 정도를 나타내는 것이므로 오른편이 0 일 경우는 압력은 발생하지 않는다. 바꾸어 말하면 오른편이 유체윤활의 압력발생의 원인이 되고 있는 것이다. 식(17)에서는 그 원인이 3 가지 있다는 것을 알 수 있다. 즉 오른편의 제 1 항과 제 2 항, 제 3 항과 제 4 항, 제 5 항은 각각

- (i) 쪼이기형유막효과 (Wedge action)
- (ii) 미끄럼면신축효과 (Stretch action)
- (iii) 짜내기효과 (Squeeze action)

라고 불리는 것이고 유체윤활에 있어서 압력발생의 3 가지 중요한 원리를 나타내고 있다. 일반적인 기계에서는 이들 3 가지의 효과중에서 (i)의 쪼이기형유막효과가 지배적인 경우가 많으나, 왕복운동을 하는 기계등에서는 오히려 짜내기 효과가 지배적인 요소가 된다.

보통 윤활문제에서는 식(17)의 h 즉 윤활막의 두께 혹은 두윤활면간의 거리는 압력과는 상관 없이 윤활면의 원래의 기하학적 형상만으로 정해진다. 그러나 윤활면에서 발생하는 압력이 큰

경우(구름베어링의 경우에는 발생압력이 1GPa 이상이 될 수 있다) 혹은 윤활면 재료의 탄성을 이 낮은 경우에는 윤활면이 탄성변형 하계되며, 윤활막의 두께는 압력의 함수가 된다. 따라서 그러한 경우에는 식(17)은 탄성변형을 나타내는 식과 연립시켜서 취급해야 되게 되며, 이와 같이 윤활면의 탄성변형량도 동시에 고려하는 유체윤활을 탄성유체윤활 혹은 EHL이라고 한다.

7. 윤활제의 점성

윤활면에서의 성능에 크게 영향을 미치게 될 윤활제의 제성질중 특히 유체윤활상태에서의 성능에 중요한 것은 점성계수라고 할 수 있다.

유체의 점성은 보통 다음의 관계식으로 정의 된다.

$$\tau = \eta \frac{\partial u}{\partial y} \tag{18}$$

여기서 τ 는 유체 내부에 발생하는 전단응력, u 는 유체의 속도, y 는 속도 방향과 수직방향의 좌표이고, 일반적인 점성유체에서는 τ 는 전단비 $\partial u / \partial y$ 에 거의 비례하기 때문에 η 는 상수이고, 이 η 를 점성계수라고 부르는 것이다. 또 이 η 가 일정한 값의 유체를 Newton 유체라고 부른다.

이에 대하여 점도지수향상제등의 첨가제를 사용한 윤활유, 등에서는 τ 가 $\partial u / \partial y$ 에 비례하지 않는 경우가 많다. 이러한 유동을 Non-Newton 유동이라고하고, 그중에서 대표적인 것의 τ 과 $\partial u / \partial y$ 의 관계를 나타내면 그림 6 과 같다. 그림

에서 A는 Newton 유체의 유동특성을 나타내는 것으로서 τ 과 $\partial u / \partial y$ 는 비례한다. 이에 대하여 B, C, D와 같은 유동특성을 나타내는 유체도 존재하고, 각각 Shear - thinning, 소성유동, Shear-thickening이라고 한다. B는 전단비를 증가 시켜 갈때 겔보기 점성계수 $\tau / \frac{\partial u}{\partial y}$ 가 서서히 감소하는 것이 특징인 현상이고, 많은 원인이 있다. 콜로이드계에서 입자의 집합이생길경우 전단비를 증가시키면 집합체를 부수고 그 결과로서 입자에 의하여 부동화되어 있는 용매의 양이 감소한다. 따라서 계의 겔보기 점성계수가 저하한다. Shear-thinning은 불균일한 입자로 구성된 계에서는 매우 일반적인 현상이다.

소성유동은 Shear-thinning과 유사하다. 전단응력이 어떤 한계치 τ_0 이하일 때는 유동하지 않는 점을 제외하면 Shear-thinning 현상과 같은 유동이다. 이 한계치를 항복치(yield value)라고 한다. 소성유동의 가장 간단한 것은 다음과 같이 표시 할 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\eta} (\tau - \tau_0), \quad \eta : \text{Const} \tag{19}$$

이것을 Bingham 소성유동이라고 하고 τ_0 를 Bingham 항복치라고 한다. 일반적으로 윤활유 Grease도 소성유동을 하고 유체윤활조건에서는 일차근사로 식(19)를 사용할 경우가 많다.

Shear-thickening의 현상은 그림의 D와 같이 변형속도를 증가 시키면 겔보기 점성계수가 증가하는 특징을 가진다. Shear-thickening은 입자가 밀도 높게 분산하고 있는 계에서 나타나는 경우가 많다.

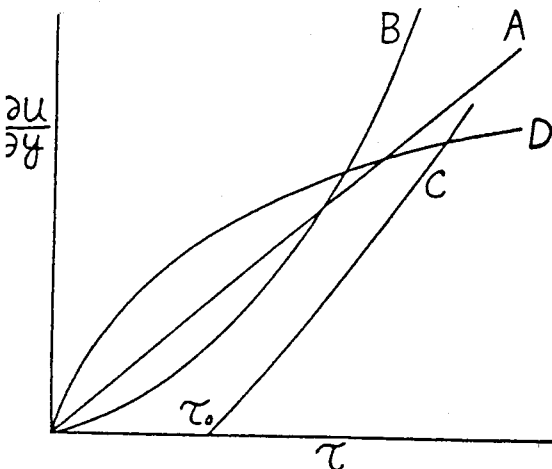


그림 6