

◆ 總說 ◆

乾燥摩擦과 境界摩擦

姜 龍 植

(中央大学校 化学工学科 教授)

一般적으로 摩擦面은 流体潤滑과 境界潤滑과 의 混合潤滑領域을 거쳐서 境界潤滑을 主体로 하는 領域으로 옮겨가는 可能性을 항상 지니고 있다. 거기에서는 粘度뿐만 아니라, 油性이나 極壓性 등이 潤滑特性에 重要的인 影響을 끼치게 된다.

따라서 그 領域에 있어서의 潤滑劑의 役割을 認識하고, 適正한 評價를 하기 위해서는 摩擦現象에 對한 理解가 必要하게 된다.

1. 摩 擦

有用한 일을 하기 위해서는 回轉運動이나 往復運動을 하는 機械나 裝置를 쓰게 되며, 그들의 運動을 安定, 精密하게 維持하기 위해서는 그 運動體를 案内하는 裝置가 必要하게 된다. 즉 相對運動을 하는 部分인 摩擦面이 생기게 된다.

이 摩擦面에 생기는 摩擦은 에너지나 資源의 浪費의 原因이 되는 同時에 機械나 裝置의 壽命을 短縮시켜서 結局에는 큰 經濟的인 損失을 招來하게 한다.

摩擦과 摩耗에 關与하는 因子들을 다음 그림 1과 같이 關聯시킬 수가 있겠다.

勿論 摩擦을 減少시키는 것이 潤滑의 目的인 것은 하나, 그것이 없으면 안되는 경우도 수없이 많은 것이다.

自動車의 브레이크裝置, 클러치 또는 織布의 실接合 等等과 같이…….

金屬의 表面은 그림 2와 같이 여러가지 表面層에 의해서 덮여져 있다.

따라서 金屬素地 上層部를 차지하는 이들의

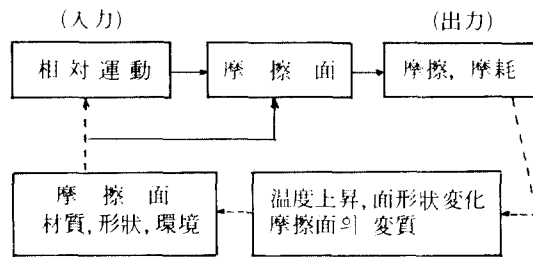


그림 1 摩擦, 摩耗와 그 影響因子의 關係

表面層이 實際에 있어서는 摩擦에 關与하게 됨으로 摩擦現象의 解析은 대단히 어려워진다.

그림 2의 構造는 깊이 方向의 質的差異를 나타내는 것이나, 表面에는 凹凸이 있으므로, 이 全 表面層이 그 凹凸의 輪廓에 따라서 起伏을 하게 된다.

表面의 構造가 摩擦現象의 物理, 化學的인 影響因子를 構成하는데에 對해서 그의 幾何學的인 形狀은 接觸狀態를 支配하여 그것을 通하여 廣範圍한 摩擦現象에 여러가지 影響을 끼치게 된다.

加工面은 加工法의 性格에 따라서 그림 3과 같은 形狀이 다른 微小凹凸을 形成하게 된다.

機械에서 쓰이는 摩擦面에서는 ぜ아무리 研磨를 徹底하게 해도 0.1 μ m 程度, 普通은 數 μ m

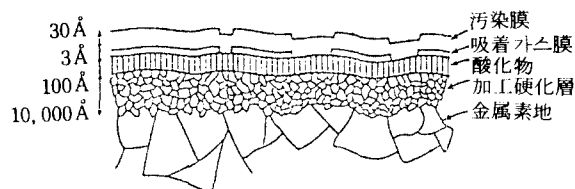


그림 2 金屬의 表面構造의 概念圖¹⁾

程度の 높이의 凹凸이 생기게 된다. 이것은 吸着膜의 두께에 대해서 大体로 100~1000倍程度의 크기가 된다.

各國의 規格이 採用하고 있는 表面粗度의 表示法은 表 1 과 같다.

凹凸이 있는 2 개의 固体面을 押着시키면 表面上의 그 凹凸들 때문에 겉보기 接觸面積과는 無關係하게 所謂 實接觸面積에서 接觸을 하게 되며, 그 接觸面積 A_r 은 押着荷重 P 와 固体의 塑性流動壓力 P_m 의 比로서 表示가 된다.

$$A_r = P/P_m \quad (1)$$

그림 5 는 二面을 接觸시켜놓고, 그 사이에 腐蝕劑를 流入시킨 다음에 荷重을 除去해서, 接觸하고 있었기 때문에 腐蝕을 免한 部分인 實接觸部를 顯微鏡으로 觀察한 結果이며, 그것으로서 實接觸面이 아주 離散의으로 分布되어 있는 것을 알 수가 있다.

그림 2 에서의 膜들이 除去된 金屬表面끼리를

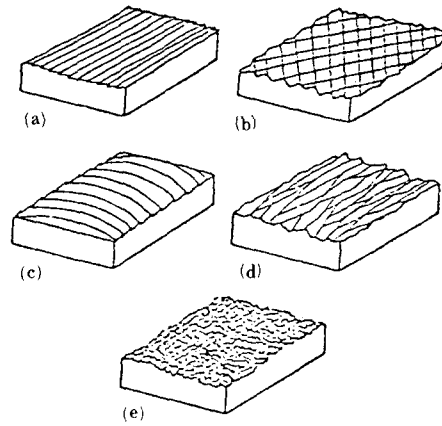
표 1 各國의 規格에 採用되고 있는 表面粗度의 表示法^{*)}

表示法	記 号	国 名
最大高 (Maximum Height)	$R_{max} = y_{max} - y_{min}$	日, 澳, 獨 ISO
中心線 平均粗度 (Center Line Average Height)	$R_z = \frac{1}{l} \int_0^l y-h dx$	美, 苏, 西 佛, 英, 日 伊, 和, ISO
自乘平均 平方根粗度 (Root Mean Square Height)	$R_{rms} = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l (y-h)^2 dx}$	불가리아
十点平均粗度 (Ten Point Height)	$R_z = \frac{(P_1+P_2+P_3+P_4+P_5)}{5} - \frac{(V_1+V_2+V_3+V_4+V_5)}{5}$	洪, 日, 波 苏, ISO
平均線의 深度 (Glättungs- tiefe)	$R_p = R_{max} - R_m$	獨
스웨덴의 標準 (Swedish Standard)	$H_{sws} = x - y$	스웨덴

*) ISO는 International Organization for Standardization.

押着시키면 金屬原子들이 直接 接觸을 하게 된다. 이 때에 同一金屬을 接觸시키면 그 接觸面은 金屬内部와 별로 다르지 않는 強度를 갖게 되나, 異種金屬間에서는 兩者이 合金屬容易性에 따라서 一定한 強度를 갖게 된다.

이와 같은 現象을 凝着이라고 부르고 있으나, 이것은 摩擦의 主要原因으로서 近代의 摩擦에



(a), (b) 形切削 (c) 플라이스切削
(d) 研 削 (e) 放電加工

그림 3 各種加工面의 微視의 形狀²⁾

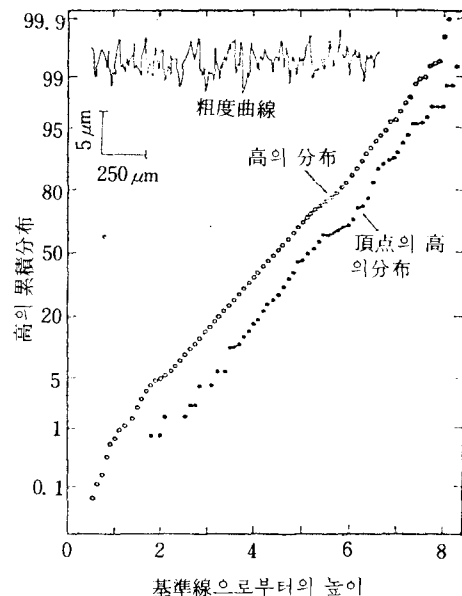


그림 4 研削面의 粗度曲線에서 求한 高分布와 頂点高의 分布³⁾

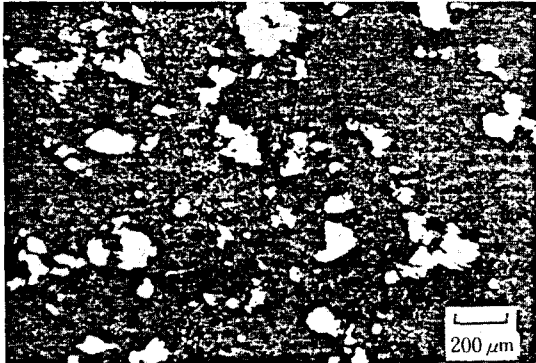


그림 5 끝모기 平面接觸에 있어서의 接觸面*

関한 學問의 展開도 이 凝着現象의 解明과의 關聯에서 이루어져왔다고 말해도 過言이 아니다.

摩擦이란 2개의 固体面이 미끄럼이나 구름 運動을 할 때에 그 運動에 抵抗하는 힘이 생기는 現象을 말하며, 流体潤滑의 狀態에서는 그러한 힘은 流体膜의 剪斷抵抗에 의해서 생기나, 境界潤滑에 있어서는 摩擦面이 接觸을 하면서

서로 運動을 하게 되므로 凝着된 接觸部의 剪斷에 그의 主要原因이 求해지고 있다.

2. 乾燥摩擦

本來에는 潤滑되지 않은 固体面에 있어서의 物質固有의 摩擦이라는 뜻으로 쓰여진 것 같으나, 우리들이 日常經驗하는 大氣環境下에서는 항상 空氣나 水蒸氣 또는 微粒子가 存在하며, 그것들이 큰 影響을 주게 된다.

實際로 대개의 固体面은 그림 2와 같은 構造를 갖고 있으므로, 그러한 面들을 接觸시켜서 摩擦을 시키면, 여러가지 吸着物質을 面面 사이에 介在시켜서 摩擦시키는 結果가 된다. 즉 乾燥摩擦과 境界摩擦과의 사이에 質的인 差異가 없게 된다.

摩擦의 發生原因으로서는 固体面의 凝着, 面의 凹凸間의 물림, 固体의 粘彈性에 기인하는 Hysteresis 損失, 또는 靜電氣에 의한 抵抗 等 여러가지가 생각되고 있다.

표 2 Rabinowicz 가 求한 乾燥摩擦係數⁵⁾

	W	Mo	Cr	Co	Ni	Fe	Nb	Pt	Zr	Ti	Cu	Au	Ag	Al	Zn	Mg	Cd	Sn	Pb	In
In	1.06	.73	.70	.68	.59	.64	.67	.79	.70	.60	.67	.67	.82	.90	1.17	1.52	.74	.81	.93	1.46
Pb	.41	.63	.53	.55	.60	.54	.51	.58	.76	.88	.64	.61	.73	.68	.70	.53	.66	.84	.90	
Sn	.43	.61	.52	.51	.55	.55	.55	.72	.55	.56	.53	.54	.62	.60	.63	.52	.67	.74		
Cd	.44	.58	.58	.52	.47	.52	.56	.59	.50	.55	.49	.49	.59	.48	.58	.55	.79			
Mg	.58	.51	.52	.54	.52	.51	.49	.51	.57	.55	.55	.53	.55	.55	.49	.69				
Zn	.51	.53	.55	.47	.56	.55	.50	.64	.44	.56	.56	.47	.58	.58	.75					
Al	.56	.50	.55	.43	.52	.54	.50	.62	.52	.54	.53	.54	.57	.57						
Ag	.47	.46	.45	.40	.46	.49	.52	.58	.43	.54	.48	.53	.50							
Au	.46	.42	.50	.42	.54	.47	.50	.50	.46	.52	.54	.49								
Cu	.41	.48	.46	.44	.49	.50	.49	.59	.51	.47	.55									
Ti	.56	.44	.54	.41	.51	.49	.51	.66	.57	.55										
Zr	.47	.44	.43	.40	.44	.52	.56	.52	.63											
Pt	.57	.59	.53	.54	.61	.51	.57	.55												
Nb	.46	.47	.54	.42	.47	.46	.46													
Fe	.47	.46	.48	.41	.47	.51														
Ni	.45	.50	.59	.43	.50															
Co	.48	.40	.41	.56																
Cr	.49	.44	.46																	
Mo	.51	.44																		
W	.51																			

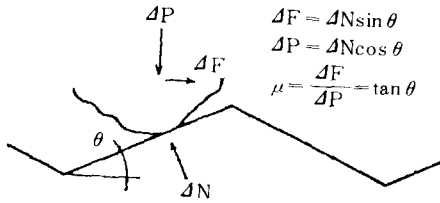
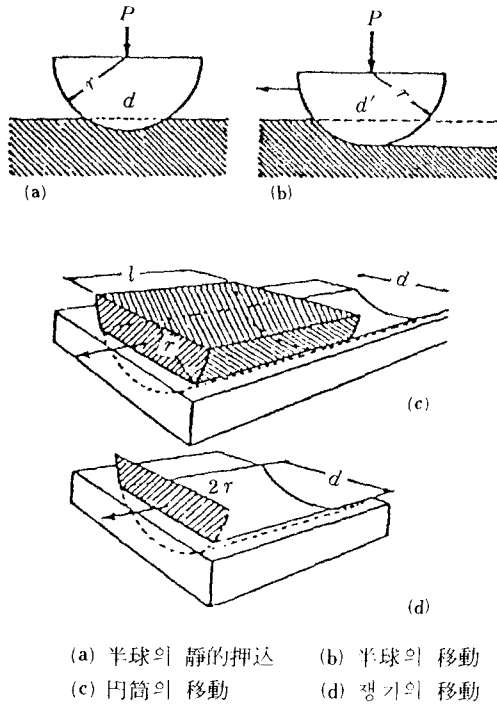


그림 6 凹凸에 의한 摩擦發生의 說明圖



(a) 半球의 靜的押込 (b) 半球의 移動
(c) 円筒의 移動 (d) 쟁기의 移動

그림 7 카운링에 의한 摩擦發生

Coulomb 등 初期의 研究者들은 淸淨한 固体面의 摩擦은 表面의 凹凸間의 물림에 의한 것으로서, 摩擦의 일한 한쪽 면의 凹凸이 相對面의 그것을 넘어갈 때에 消費된다고 생각하였다. 그림 6은 그의 概念圖이다.

確實히 이러한 機構로는 걸보기 接觸面積은 無關係하게 되고, 摩擦力이 垂直荷重에 比例하는 것이 되나, 凸部를 올라가기 위해서 消費된 에너지는 그것을 내려갈 때에 되돌려내게 되어 일의 消耗에 矛盾이 생긴다.

물린 金屬面土를 같은 金屬이 미끄러지면 같은 쪽의 表面의 凹凸에 의해서 물린 면에 흡이

생기는 것은 쉽게 理解가 간다. 그림 7에서는 이와 같은 경우의 摩擦의 發生機構를 概念的으로 나타낸다.

現在 많은 金屬에 대해서 摩擦의 發生要因으로 널리 認定되고 있는 것은 摩擦面의 凝着이다.

凝着은 接觸面積 A_r 에서 생기는 것으로 생각이 되나, 그것은 式(1)에서와 같이 P/P_m 으로 表示가 된다.

또 材料의 剪斷強度를 S_i 라 하면, 摩擦力 F 는 式(2)로 表示할 수 있으므로 摩擦係數는 式(3)이 된다.

$$F = A_r \cdot S_i = P/P_m \cdot S_i \quad (2)$$

$$\mu = F/P = (P/P_m \cdot S_i) / P = S_i/P_m \quad (3)$$

이 式에 따르면 μ 는 S_i 와 P_m 과의 比로 表示가 되어 있으므로, 乾燥摩擦이 物質固有의 屬性이라는 생각이나, Coulomb의 摩擦法則의 說明에 대단히 便利한 것이었다.

그러나 接觸部 全域에 걸쳐서 凝着이 생기는 確證은 조금도 없다.

그것은 이미 說明한 바와 같이 乾燥摩擦에 있어서의 固体面은 吸着膜 等에 의해서 汚染되어 있는 것이 一般的이어서 接觸部 全域이 母材와 같은 強度를 갖는 組織이 되어 있다고 생각하는 것은 매우 無理하기 때문이다.

이러한 矛盾을 없애기 위하여 Tabor⁶⁾는 다음과 같은 提案을 하고 있다. 즉 그는 그림8(a)와 같이 接觸部를 모델化하고, 界面附近의 薄層에 着眼해서 거기에 생기는 壓縮應力을 $P = P/A_r$, 剪斷應力을 $S = F/A$, 常數를 α 로 해서 摩擦中의 接觸部에 있어서의 隆伏이 式(4)의 條件에 따르는 것으로 생각하였다.

$$P^2 + \alpha S^2 = (P/A_r)^2 + \alpha (F/A_r)^2 = P_m^2 \quad (4)$$

즉 垂直荷重뿐만 아니라, 摩擦力 自体도 隆伏에 關與하는 것으로서, 摩擦力 F 가 0인 경우에 式(4)는 式(1)과 一致하게 된다. P 를 一定, α , P_m 을 常數로 하여, F 가 0이 아닌 경우도 式(4)가 成立되려면 A_r 이 增大되어야 한다.

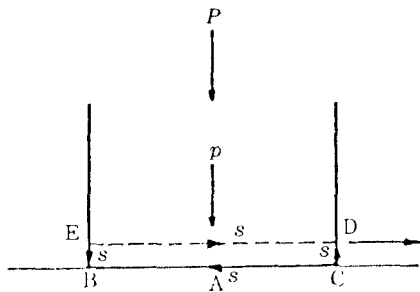
또 A_r 이 增大하고 $P = P/A_r$ 이 減少함으로써 接觸面에 있어서의 剪斷力 S 는 單調하게

增加해서 $P_m/\sqrt{\alpha}$ 에 接近한다. 따라서 $P_m/\sqrt{\alpha}$ 는 固體의 剪斷應力 S_m 와 같으며, 이런 식으로 그는 생각을 하였다.

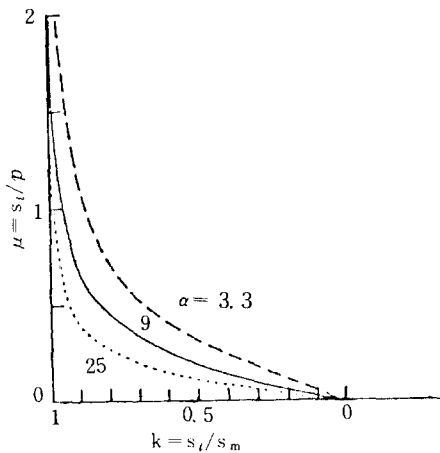
結局 그림 8 (a)와 같이 接觸點에 側方向의 힘을 加해가면 점차로 接觸面積이 增大하는 동시에 界面에 作用하는 剪斷應力도 커지게 된다.

乾燥摩擦에 있어서도 實際에 있어서는 여러가지 吸着物質이 存在하는 것이 常例이고, 또 材料의 表面附近에는 内部보다도 많은 欠陥이 存在하므로 實際의 界面의 強度는 内部보다도 一般의으로 낮다.

따라서 剪斷強度를 S_i 라 하면 k 를 0에서 1까지의 값을 갖는 常數로 해서 $S_i = kS_m$ 이라고 쓸 수가 있다.



(a) 接合部成長의 모델과 應力條件



(b) 摩擦係數(μ)와 剪斷強度比 k 의 關係

그림 8 接合部成長 모델과 摩擦係數

式(4)에 $P_m = \sqrt{\alpha} S_m = \sqrt{\alpha} / k S_i$ 를 代入하면 μ 는 式(5)와 같이 된다.

$$\mu = S_i/P = 1/\sqrt{\alpha(k^2-1)} \quad (5)$$

즉 摩擦係數는 界面과 内部와의 剪斷強度의 比 k 의 函數로 表示가 되고, k 가 0에서 1의 사이로 變化함에 따라서 0에서 無限大까지의 값을 갖게 된다.

α 를 參數로 취하고 k 와 μ 의 關係를 求하면 그림 8(b)와 같이 된다.

實際로 α 의 값으로서 어떤 것을 취하는 것이 좋은가에 대해서는 根據가 없는 것이나, 어떤 α 의 값에 대해서도 S_i 가 固體内部보다도 작아지면, 摩擦係數는 急激하게 減少하는 것을 알 수가 있다.

式(4)의 S 에 S_i 즉 $k/\sqrt{\alpha} \cdot P_m$ 을 代入하면 $P = P_m\sqrt{1-k^2}$ 이 되므로 摩擦係數 μ 는 式(6)으로 쓸 수가 있다.

$$\mu = S_i/P = S_i/P_m\sqrt{1-k^2} \quad (6)$$

따라서 k 가 1에 比較해서 작을 때 즉 界面이 固體内部보다도 훨씬 弱한 경우에는 μ 는 S_i/P_m 와 近似해진다. 이것도 Tabor의 理論이 前述한 單純한 凝着說은 그의 一部로 包含하고 있는 것을 나타내고 있다.

3. 境界摩擦

固體面 사이에 接觸點이 形成되는 狀態下에서도 潤滑劑가 存在하면 摩擦力은 乾燥摩擦에 比較해서 훨씬 낮게 抑制되는 것이 可能하다. 이러한 潤滑狀態를 境界潤滑이라 하며, 그 摩擦은 流体摩擦과 乾燥摩擦의 中間에 位置하게 되어서 摩擦係數의 값은 0.1程度가 된다.

그림 9의 Stri back線의 左側, 즉 (精度) × (速度) / (荷重)의 값이 적은 領域에서는 거의 境界摩擦의 特性을 나타내는 것으로 생각이 되고 있다.

이러한 條件下에서는 同一粘度의 潤滑油를 써도 그의 化學的 組成, 特히 添加劑에 의해서 摩擦差가 생기는 경우가 있게 된다.

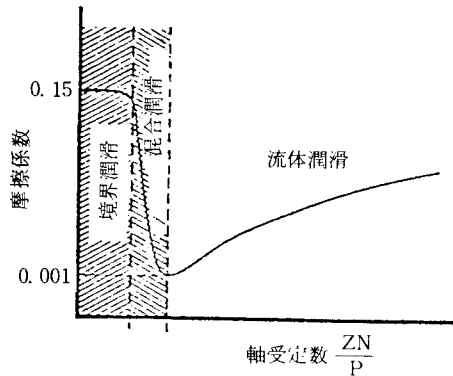


그림 9 Striback 線⁷⁾

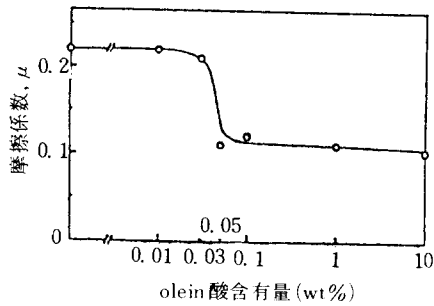


그림 10 파라핀油에 올레酸 添加에 따른 摩擦係數의 變化

이와 같이 境界摩擦에서는 潤滑劑의 粘度 以外の 性質이 큰 影響을 갖게 되며, 그것들을 綜合해서 油性이라 부르는 경우가 있다. 最近에는 friction modification 이라는 말도 쓰이고 있다.

表面膜이 없는 두 固体面이 接觸을 하면 그 두面의 分子사이에는 強한 相互作用이 생길 것이나, 그 힘은 두面사이의 距離를 멀어지게 함으로써 減少시킬 수가 있다. 즉 그것은 두面 사이에 어떤 膜을 介在시킴으로써 可能하며, 그것이 바로 境界潤滑의 原理라고 말할 수가 있겠다.

現在 油性의 改善을 위해서 使用되는 物質로는 脂肪酸, 알코올, 아민等 強한 極性基를 갖는 有機化合物들이다.

그림 11(a)는 Bowden 等이 그린 Hardy 流의 모델이나, 油性劑의 分子들이 固体面과의 1次의 인 結合에 의해서 一方向으로 整理가 되고, 다시 隣接해서 吸着된 分子들이 Van der Waals

力에 의한 2次結合에 의해서 固体面上에 規則的으로 配列하게 된다.

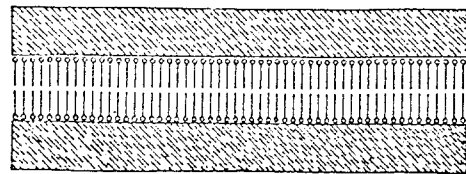
이들의 潤滑劑分子의 無極性間의 剪斷強度는 金屬面과의 接觸部의 그것에 比較해서 훨씬 적기 때문에 滑動은 無極性間에서 일어나게 된다.

Hardy 의 이와 같은 생각은 原理的으로는 아직 正當하다고 생각되고 있으나, 既述한 바와 같이 當時는 아직 接觸의 概念이 없었기 때문에 그림 11(a)와 같이 若干 現實과 遊離된 것이 되어, Coulomb의 法則을 說明할 수도 없었다.

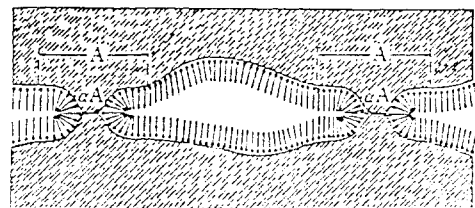
이 Hardy의 생각을 接觸과 結合시켜서 Bowden과 Tabor⁸⁾는 좀더 實際的인 생각으로 展開하고 있다.

潤滑이 된 金屬을 接觸시키면서 荷重을 加하면, 接觸面에 加해진 荷重을 支撐하기 위해서 充分한만큼의 塑性流動이 일어나서 接觸點이 形成된다. 이 變形 때문에 潤滑膜은 두개의 金屬面 사이에 끼우게 되어 대단히 큰 壓力을 받게 되나, 이 壓力은 接觸部 全域에 걸쳐서 均一하게 생긴다고는 생각되지 않으므로 壓力이 最高가 되는 部分에서 潤滑膜의 局部的 破斷이 일어나서 金屬融着이 생긴다. 그림 11(b)는 그것을 概念的으로 나타낸 것이다.

이 경우에 運動에 対한 抵抗 F는 接觸面積



(a) Bowden이 그린 Hardy 概念圖



(b) Bowden의 概念圖

그림 11 境界潤滑下의 摩擦面의 概念圖

을 A_r , 그중에서潤滑膜이破斷해서金屬結合이 생긴部分이占有하는比率을 η 라 하면式(7)이表示된다.

$$F = A_r \{ \eta S_m + (1 - \eta) S_1 \} \quad (7)$$

여기서 S_m 은金屬接合部の剪斷強度, S_1 은潤滑膜의剪斷強度이다.

이式은式(2)의 S_i 를 $\{ \}$ 內的 값으로置換한 것뿐이므로,凝着說의境界摩擦에의擴張이며, Hardy流의 생각으로는說明할 수 없었던 Coulomb의法則을適切하게說明하게된 것이다. 또그와같이式(5)와關係를 맺는 것도可能함은勿論이다.

또 η 의 값은潤滑膜의動的인破壞·修復의 밸란스에 의해서定해지는 것으로써,例컨대 어떤溫度範圍에 있어서의摩擦係數의溫度特性에 있어서, 같은脂肪酸이면서變化가 보이는 것과 보이지 않는 것이 있는 것도그와같은動的取扱에 의해서 비로소理解가可能하게된다.

以上摩擦에 대해서 극히概念的으로考察해보았거니와,省資源과省에너지를 위하여摩擦

에의充分的理解는 Tribology의重要課題라 하겠다.

참 고 문 헌

1. Rabinowicz, E. "Friction and Wear of Materials, 71 (1965), Gohnwiley & Sons New York, . "
2. Peklenik, Q., Proc. Instrn. Mech. Engrs., 182, 108 (1967~68).
3. Halling, Q. "Principles of Tribology", 36 (1975), Macmillan Press.
4. 久門輝正, 日本機械学会論文集, 35, 880 (1969).
5. Rabinowicz, E., ASLE Trans, 14, 198 (1971).
6. Tabor, D., Proc. Roy, Soc, Lond., A251, 378 (1959).
7. Ling, F. F., Klaus, E. E., Fein, R. S., "Boundary Lubrication", 39 (1969) ASME.
8. Bowden, Tabor, 曾田範宗譯 "固體의 摩擦과 潤滑" 206 (1961) 丸善.