

摩 擦 科 磨 耗

協 會 李 光 宰

1. 概 要

타이어의 摩擦과 磨耗에 대한 理論을 說明하기
에 앞서 本稿에서는 먼저 摩擦과 磨耗에 대한 基
礎概念을 살펴보기로 한다.

『摩擦』이 意識된 人間에게 利用된 것은 나무와
나무를 서로 문질러서 불(火)을 일으켰을 때에 시
작된 것으로 생각할 수 있으므로 아득한 옛날로
거슬러 올라가게 된다. 學者들이 이 문제를 다루기
시작한 것은 르네상스 時代의 幕이 오를 무렵, 즉
15世紀末에서 16世紀初頃이었다.

그러나 本格的인 實驗을 거쳐 데이터를 發表하
게 된 것은 Amontons (1663~1705 : 프랑스의 實
驗物理學者, 1699년에 摩擦에 관한 研究를 發表)
에서부터 시작된 것 같다. Tribology (摩擦工學)의
文獻에 나타난 것을 보면, Amontons 은 모든 機
械에 있어서 가장 重要的 것은 摩擦이라고 強調한
것 같다. 따라서 Amontons 은 金屬材料에 대한 摩
擦을 주로 研究했을 것으로 想像된다.

그 후 Coulomb (1736~1806 : 프랑스의 電氣學
者)이 摩擦에 관한 研究를 하게 된 것은 Amontons
보다 100年 후인, 英國에서 시작된 產業革命이 全
유럽에 波及되었을 무렵이다. Coulomb 도 Amontons
과 같은 프랑스인이었으므로 당연히 “機械와 摩擦”
이라는 感覺을 간직하고 있었을 것이다.

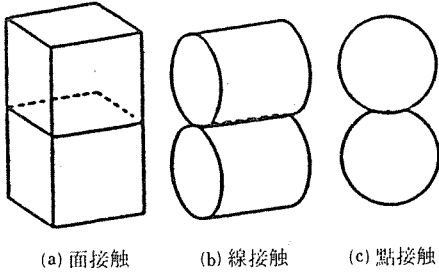
Amontons-Coulomb 의 摩擦의 法則에서 Bowden
으로 이어진 후 現在에 이르기까지 近代摩擦學의
系譜 중에는 固體表面의 接觸機構問題가 基本的으

로 가로놓여 있으며, 이와같은 固體接觸理論에는
金屬表面이 모델로 정해져 있다. 그리고 고무나 플
라스틱의 摩擦·磨耗를 생각할 때에 無視할 수 없
는 것이 바로 이 點이다. 따라서 金屬表面과 고무
(또는 플라스틱)의 表面이 서로 다른 것은 어디에
그 特徵이 있는가를 살펴볼 必要가 있을 것이다.
그렇지만 Bowden 의 凝着理論과 흔히 말하는 摩
擦論을 일차적으로 살펴본 후 거기서는 무엇을 重
要視하고 또 무엇이 빠져 있는가를 다시 한번 整
理하여 생각해 보아야 할 것이다.

2. 固體의 接觸

固體와 固體가 接觸되어 있는 상태를 생각할 때
는 크게 3 가지로 나누어 생각할 수 있다. 그 중 하
나는 “外觀上 接觸”의 概念이다. 이것은 그림 1의
(a) 면接觸에 해당되는 것이다. 이 때의 接觸面積
은 單純한 것으로서 4角面의 한 변이 10cm 이라
면 接觸面積은 100cm²가 되므로 거기에 加해지는
壓力을 100cm²로 나누면 面壓 또는 接觸壓을 計算
할 수 있다.

그러나 그림 1의 (b)와 (c)는 각각 線接觸 및
點接觸인 接觸狀態를 나타내고 있다. 그림에서는
円筒과 円筒 및 球과 球가 나란하게 接觸되어 있
는 상태인데, 만일 두 物體가 剛體로서 表面이 幾
何學的으로 완전한 円筒이나 球인 경우에는 그 사
이에 나타나는 接觸部는 線 또는 點으로 나타날
것이다. 따라서 平面과 球, 球와 橢圓體의 경우에
도 點接觸이 될 것이다. 예컨대, 베어링의 球와 內



[그림 1] 接觸의 形態

外輪, 톱니바퀴의 물림, 車輪과 레일 등에서 이러한 接觸을 볼 수 있다.

실제로 固體에는 有限의 彈性率(탄성률)이 있으므로 荷重(하중)이 0 일 경우에는 幾何學(기하학)的인 線(선)이나 點(점)으로 接觸(접촉)되었다고 할 수 있지만, 荷重(하중)을 加(加)하게 되면, 接觸部(접촉부)가 彈性變形(탄성변형)하여 약간 늘려서 어떤 幅(폭)을 차지하여 兩面(양면)이 接觸(접촉)하게 될 것이다. 이 問題(문제)는 Hertz (탄성學者)에 의해서 이미 解析(해석)되어 있기 때문에 “Hertz 接觸(접촉)”이라고 하며, 또 여기에서 나타나는 接觸壓力(접촉압력)을 Hertz 壓(압)이라고 한다.

먼저 (b)의 경우에는 凹筒(오목통)이 無限(무한)히 길다고 가정하여 2次元(2차원)으로 解析(해석)하게 되면, 接觸面(접촉면)은 당연히 이 筒軸(통축)에 나란한 帶狀(대장)이 될 것이며, 그 幅(폭) $2b$ 는 다음과 같이 表示(표시)된다.

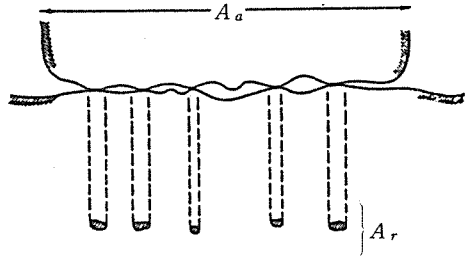
$$2b = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \sqrt{(l - \nu^2) \frac{Pr}{E_1}} \quad (1)$$

여기서 E 및 ν 는 材料(재료)의 縱彈性係數(종탄성계수) 및 Poisson 比(비)이며, P 는 荷重(하중), l 은 接觸 길이, 즉 P/l 은 單位 길이當(단위 길이당)의 荷重(하중), r 은 凹筒(오목통)의 半徑(반경)이다.

한편 (c)의 경우는 接觸面(접촉면)이 的當(의당) 凹形(오목형)으로 나타날 것이며, 그 直徑(직경) $2a$ 는 球(구)의 半徑(반경) r 이라 할 때 다음과 같이 表示(표시)된다.

$$2a = \sqrt[3]{6(l - \nu^2) \frac{Pr}{E}} \quad (2)$$

이와같은 경우, Hertz 壓(압)은 모두 橢圓(타원)分布(분포)로 나타나는 것이 特徵(특징)이다. 즉, (b)에서는 接觸幅(접촉폭)의 中(중)앙에서 ρ 인 位置(위치)에 있어서의 壓力(압력) p 는



[그림 2] 眞實接觸(眞實접촉)의 例(예)

$$p = \frac{2}{\pi} \frac{P}{lb} \sqrt{l - \frac{\rho^2}{b^2}} \quad (3)$$

으로 되며, (c)에서는 ρ 를 接觸凹(접촉오목)의 中心(중심)에서부터의 距離(거리)라 하면 그 點(점)의 壓力(압력) p 는

$$p = \frac{3}{2} \frac{P}{\pi a^2} \sqrt{l - \frac{\rho^2}{a^2}} \quad (4)$$

와 같이 表示(표시)된다. 이들 式(식)이 더욱 複雜(복잡)한 모양으로 되어 있으면, 平均面壓(평균면압)으로 이야기할 수도 있겠지만, 유연하게도 간단한 式(식)으로 나타나서 式(3), (4)는 자주 利用(이용)되는 것 같다.

다음에 두 번째 概念(개념)으로는 “眞實接觸(眞實접촉)”이다. 固體(고체)의 表面(표면)에는 “거칠음”이 반드시 따라다니기 마련이다. 그러나 單結晶(단결정)의 表面(표면)과 같이 原子(원자)적으로도 평평한 것은 例外(예외)로 생각할 수 밖에 없다. 事實(事實) Holm은 “아무리 미끄럽게 닦은 면이라도 어딘가는 凹凸(오목푹음)이 있기 마련이며, 따라서 그 極小(극소)한 部分(부분)만이 眞實(眞實)한 接觸(접촉)을 하게 된다.”고 하였다. 그리고 Hertz 接觸(접촉)도 巨視(거시)적으로 말한다면 覓(찾)보기(外觀上) 接觸(접촉)과 같은 것이고 眞實(眞實)한 接觸(접촉)은 아니라는 것이다.

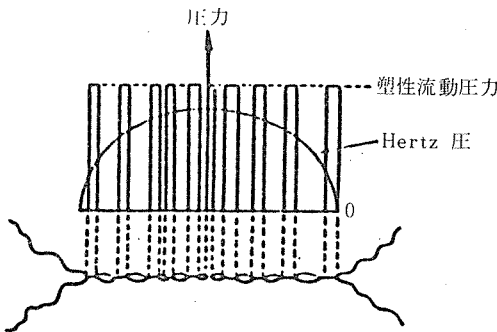
Holm의 이와 같은 생각을 그림²⁾으로 表現(표현)한 것이 그림 2이다. 두 表面(표면)을 接近(접근)시켜가면, 먼저 어딘가에서 2面間(2면간)에 힘(힘)의 傳達(전달)이 발생하여 아래쪽 平面圖(평면도)에서 斜線(갈선)으로 表示(표시)된 곳에 壓力(압력)이 發生(발생)한다. 最初(처음)에는 彈性變形(탄성변형)이 일어나겠지만, 곧 塑性域(소성역)으로 變換(변환)한다고 생각하고, 이 때 나타난 斜線部(갈선부)의 面積(면적)의 總(총)을 A_r 라 하면 제 1次(1차)의 近似(근사)로서 그 部分(부분)의 壓力(압력)은 加해진 荷重(하중) P 를 A_r 로 나눈 것과

같다고 볼 수 있다. 여기서 P/A_r 가 固體로서 감내할 수 있는 限界를 넘어서고 있는 동안은 變形이 進行되어 A_r 이 커진다. 그리고 壓力이 어떤 一定值 p_m 이 되었을 때 힘의 平衡이 이루어졌다면 A_r 의 값은 P/p_m 으로 주어지게 된다. 이 때의 A_r 을 眞實接觸面積, p_m 을 塑性流動壓力이라고 한다.

그런데, 式 (3),(4)에서는 Hertz 壓은 橢圓分布로 되어 있다고 했고 또 “眞實接觸”에서는 어떤 一定值 p_m 에서 平衡(즉, 一定值가 된다)이 된다고 하였다. 그렇다면 이들 사이의 關係를 어떻게 해석할 수 있을까.

面接觸에 있어서의 接觸狀態에 관해서는 그림 2에서와 같은 생각을 할 수 있다. 거기에는 多數로 分割된 眞實接觸面積이 存在하는데, 그 하나하나를 接觸點이라고 한다면 固體表面의 面接觸이라고 하는 것은 수많은 接觸點이 散在해 있고 각각 그 內部에는 p_m 과 같은 接觸壓力이 作用하고 있으며, 이들의 合이 荷重과 平衡을 이루고 있는 狀態라고 볼 수 있는 것이다. 面壓이라 하는 것은 그와같이 離散的으로 存在하는 接觸壓力을 外觀上的 接觸面積全體로 平均한 것이며, 各接觸點에 作用하고 있는 壓力과는 關係가 없다. 面壓이 높을 때에는 外觀上的 接觸面積 중에서 眞實接觸面積이 차지하는 比率이 크고, 反對로 面壓이 낮을 경우에는 眞實接觸面積의 比率도 작다는 것이다.

線接觸이나 點接觸에서의 接觸狀態도 本質的으로 는 똑 같으나, 다음과 같은 것이 面接觸과 다른 點이다. 즉, 線接觸에 있어서서는 이른바 Hertz 壓에 의해서 面壓이 주어지므로 接觸點이 特有한 分布를 이루게 되는데, 그 關係를 보면 그림 3과 같다.



[그림 3] Hertz 接觸과 眞實接觸

이런 '경우에도 固體間的 힘의 傳達는 離散的인 接觸點間에 作用하는 壓力 p_m 에 의해서만 이루어지는 것이며, Hertz 壓은 外觀上的 接觸面積內部에 있어서 局部的인 平均值로서 주어지게 된다. 따라서 Hertz 壓이 높은 中心附近에는 보다 많은 眞實接觸面積이 存在하며, 周邊으로 갈수록 적어질 것이다.

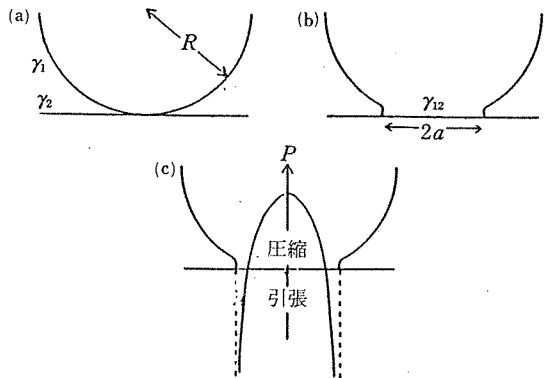
3. 固體接觸의 또 하나의 要素

앞에서는 Bowden의 凝着理論의 基礎인 固體接觸論에 대해서 概觀하였다. 이와같은 接觸機構論을 토대로 하여 展開된 摩擦論은 “Amontons-Coulomb”의 摩擦의 法則을 잘 說明하고 있으며, 그 根據를 주게 되었다.

그러나 摩擦의 法則을 說明할 수 있게 된 것이 그렇게 큰 일이라고 볼 수 있을 것인지, 보다 자세히 觀察하게 되면, 摩擦의 法則에 따르지 않는 摩擦 등도 얼마든지 있지 않을까 하는 意見이나 說도 나오게 될 것이다. 여기서는 그러한 議論 중의 하나를 紹介⁹⁾하고, 앞으로 參考하고자 한다.

固體表面을 接觸시키면 두 面 사이에는 附着力이 발생한다는 것을 생각할 수 있다. 靜電力이든, van der Waals 힘이든, 두 面 사이에 어떠한 힘이 作用하여도 상관 없겠지만, 이상한 것은 그러한 것이 전혀 觀察되지 않고 있다는 것이다.

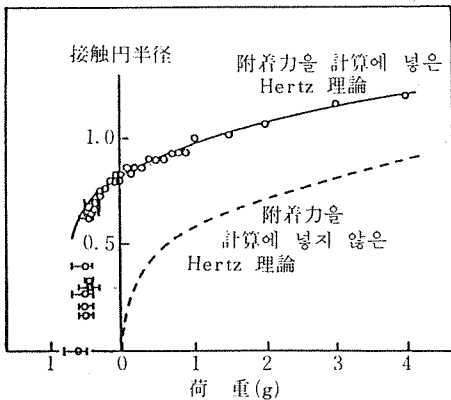
그림 4는 고무와 같은 彈性이 큰 球가 간단한 固體平面에 接觸되는 경우의 概念圖이다. 만일 壓



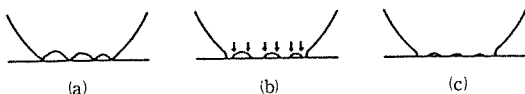
[그림 4] 彈性球體와 固體表面間的 表面力에 의한 附着概念

力은 전혀 作用하지 않고 彈性變形의 力學的 法則만을 고려하게 된다면, 接觸은 點으로 되고 接觸面積은 0이 된다. 이것이 그림 (a)에 表示되어 있다. 그러나 兩面이 서로 끌어 당기게 된다면 (b)와 같이 半徑 a 인 円으로 接觸하게 된다. 이 때의 內部 壓力은 円의 中心部에서는 壓縮되고, 周邊部에서는 引張될 것으로 豫想되는데 그 概念圖을 보면 그림 (c)와 같다.

外部로부터 加해진 힘은 없으므로 表面 에너지의 計算으로는, 球體의 表面 에너지 γ_1 과 平面 에너지 γ_2 가 없어지고 界面 에너지 γ_{12} 가 나타나게 되는데, 그 面積이 πa^2 이므로 그 差인 $\pi a^2 (\gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12})$ 에 해당되는 量만큼의 에너지가 變形된 에너지로 저축되게 된다. 이 때 球를 떼어내는 힘을 測定하여 理論値와 比較하면, 거의 맞게 나타나므로⁴⁾ 이대로 믿고 說明을 계속한다면, 眞實接觸面積은 van der Waals 힘에 의해 周邊部가 增大된다는 事實이 떠오르게 된다. 그림 5는 이것을 表示한 것이다. Hertz의 理論에만 따르는 것(點線)보다도 分子間力을 고려한 修正된 理論에 따르는 것(實線)이 接觸圓半徑이 커진다. 즉, 接觸面積이 커진다. 이것은 單純히 球와 平面과의 結合뿐만 아니라,



[그림 5] 彈性球體와 固体平面의 接觸



[그림 6] 凹凸이 있는 球面과 固体平面의 接觸 모델 (接觸面이 分子間力에 의해 增大한다)

예컨대, 凹凸이 있는 面과 平面에서도 일어날 수 있을 것이다. 그림 6은 그러한 모양을 모델의 表示한 것이다. 일상적으로 우리들에게 가까운 랩·필름의 附着性이 좋은 것도 같은 理由라고 볼 수 있다. 지금까지는 固體의 接觸에 관한 基本的인 생각을 紹介하였으나, 다음에는 이들을 미끄러지게 하였을 때 發生하는 摩擦에 대해서 살펴보기로 한다.

4. 摩 擦

앞에서는 固體와 固體를 接觸시켰을 경우에 대해서는 어떠한 概念으로 그것을 받아들여야 하는가를 大略 說明하였으나, 여기서는 2개의 固體表面을 서로 미끄러지게 하였을 때의 상태에 대하여 살펴보기로 한다.

그런데, 眞實接觸部에서는 相對하는 固體間에 相互作用이 일어난다. 凝着이 發生한다고 생각하여도 좋다. 그리고 이것을 剪斷하는데 必要한 힘이 摩擦力이다. 이러한 理論은 凝着理論에서 일반적으로 말하고 있는 것과 같은 것이며, 그 밖에도 凹凸 理論이나 原子間力說 등이 있다. 그러나 現在로서는 凝着說이 가장 一般化되어 있으며, 여러가지의 理論展開에서 基礎가 되고 있으므로 간단히 紹介하고자 한다.

먼저 잘 알려져 있는 摩擦의 法則에 대해서 생각해 보기로 한다.

① 摩擦力은 接觸에 作用하는 垂直荷重에 比例하며, 接觸面積(外觀上)에는 關係가 없다.

② 摩擦力은 미끄러지는 速度에는 關係 없다.

②의 경우가 옳은지 與否는 經驗의으로는 多少 疑問되는 점이 있으나, ①의 경우는 참으로 어려운 命題이다. Holm과 같은 式으로 말하면 固體表面은 外觀上의 接觸面積과는 關係없는 A_r 인 面積에서 眞實한 接觸을 하고 있다. 이 眞實接觸面積은 垂直荷重을 P , 固體의 塑性流動壓力을 p_m 이라 하면,

$$A_r = P/p_m \quad (5)$$

으로 表示된다. 실제의 摩擦面에는 작은 接觸點이 많이 있으므로 兩面이 미끄러지게 되면 어떤 接觸

點은 消滅되면서 또 다른 곳에서는 接觸點이 생기게 된다...고 하는 過程이 반복되겠지만 어쨌든 그 面積의 總合은 一定하므로 式 (5)와 같이 眞實接觸面積은 垂直荷重에 比例한다는 것이다.

만일 매끈한 金屬面 사이에서 이와같은 接觸點이 생겼다면 그 部分은 凝着된 것으로 金屬自體와 같은 정도의 強度를 가지게 될 것으로 생각된다. 眞實接觸點의 剪斷強度를 S_i 라 하면, 摩擦力 F 는 $A_r \times S_i$, 따라서 摩擦係數 μ 는 다음과 같은 式으로 表示된다.

$$\mu = F/P = S_i/p_m \quad (6)$$

여기서 S_i 와 p_m 은 金屬材料의 屬性이므로 式 (6)의 μ 는 一定하다고 볼 수 있다. 실제의 金屬에 대해서 S_i, p_m 을 代入하여 計算해보면 대략 0.5 정도로서 “金屬의 乾燥摩擦係數”와 거의 一致하고 있다. 따라서 여러가지 金屬을 組合하여 乾燥摩擦係數를 求하면 거의 一致되어 있다고 보아도 좋을 것이다.

그러므로 지금까지 說明한 Bowden, Tabor와 같은 方式의 摩擦理論은 단순히 摩擦의 法則에 理論의 根據를 가미한 것으로 보이며, 또 接觸機構에 있어서도 論據는 分明하므로, 일반적으로 理解하기는 쉽다. 그러나 金屬과 金屬을 眞空中에서 接觸시키게 되면 상태가 一變하며, 摩擦係數가 매우 크게 되며, 경우에 따라서는 凝着이 심하여 數值的으로 無限大로 되는 例⁶⁾까지 있다. 이것은 대부분의 金屬이 大氣中에서는 表面에 酸化物被膜이 생기기 때문에, 이 酸化物被膜의 破壞 및 金屬의 本바닥과의 直接接觸 및 凝着과 關係되는 것이라고 볼 수 있다. 酸化物被膜의 生成, 破壞, 除去의 메카니즘은 아직도 잘 알려져 있지는 않지만, 摩擦과 磨耗에 미치는 영향에 대해서는 크게 注目되고 있으며, 앞으로 많은 研究가 進行될 것으로 보인다.

以上을 要約한다면 다음과 같이 말할 수 있다. 摩擦의 理論이 우연하게도 大氣中の 金屬에 대해서는 適用되며, 摩擦이란 무엇인가 하는 點에 있어서는 일단 理論的인 根據를 주게 되었다. 그러나 眞空中에서와 같이 酸化層이 생기지 않는 분위기에서는 摩擦이 커지며, 金屬間的 凝着이 增大된다. 그러므로 플라스틱이나 고무와 같은 物質의 摩擦

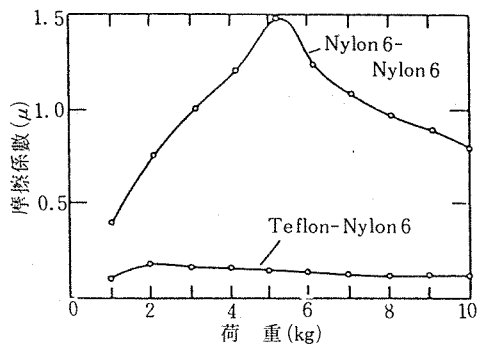
에서는 앞에서 說明한 바와 같이 分子間에 의한 附着이 생기므로, Holm이 말하는 降伏壓에만 의한 接觸面積의 想定이나 彈性學的인 Hertz 接觸의 概念으로는 이미 充分하지 못하다.

Polymer에 대한 摩擦을 보면 溫度나 미끄럼 速度의 영향을 받아 金屬의 경우와는 다르다. Polymer의 Rheological한 性質이 크게 영향을 미치므로 摩擦이 複雜하게 되며 觀察結果를 金屬의 경우와 같이(예컨대, 大氣中에서도) 간단하게 整理하기는 어렵다.

Lee의 解說⁶⁾에 의하면 Polymer의 摩擦은 附着에 의한 것과 變形에 의한 것 두 가지 要素가 적어도 생각되며, 兩者를 명확히 識別하여 測定하기는 대단히 어려운 일이고, 또 變形은 本質的으로 表面의 附着에 關係되고 있다. Lee는 Tanaka의 結論⁷⁾을 引用하여, Polymer의 摩擦力은 接觸部の 變形에 의한 것이며, 이른바 凝着理論에 따른 眞實接觸部の 剪斷에 의한 것과는 다르다고 하였다.

Polymer의 摩擦이 變形에 消費되는 에너지라던 의당 Polymer의 摩擦論에 대해서는 Rheological한 觀點에서 研究할 必要가 있다. 따라서 現在 많은 學者들이 多角的으로 資料를 蒐集하여 理論을 정리하려고 努力하고 있다. 그러나 Polymer 그 自體에는 種類가 극히 많아서, 摩擦力의 解析은 實驗的으로나 理論的으로나 多様하며 통일된 理論體系를 얻자면 아직도 상당한 時日이 要할 것 같다.

이에 대한 具體的인 例가 다른 資料에서는 많이 例示되어 있을 것으로 생각되므로 여기서도 그 한 例⁸⁾를 보면 그림 7과 같다.



[그림 7] Teflon-Nylon 및 Nylon 6-Nylon 6의 摩擦

5. 磨 耗

Tribology의 觀點으로는, 미끄러지는(또는 굴러는) 固體가 表面에 損傷을 받을 때 이것을 技術的으로 防止하는 문제를 學問的으로 뒷바침하기는 매우 어려운 問題이다. 여기서 表面損傷이라고 하는 現象에는 磨耗라는 카테고리가 있으므로, 단순히 表面이라고 강조하는 認識을 여기서 다시 한번 생각해 보기로 한다.

表面損傷은 크게 3가지로 分類할 수 있는데, 그중 하나가 磨耗이다. 磨耗 중에서도 여러가지 形態가 있으나 그것은 다음에 說明하기로 하고, 그 외에 타는(燒) 現象도 있다. 磨耗라고 하는 現象은 일반적으로 逐次現象, 즉 조금씩 進行되는 現象인데 반해 타는 것은 急히 일어나는 現象이다. 말하자면, 하나의 Catastrophe로서, 지금까지는 충분히 만족할 만한 摩擦을 하고 있었으나 갑자기 摩擦面 사이에 巨視的인 凝着이 생겨서 큰 損傷을 받아 드디어 사용할 수 없게 된다. 따라서 이러한 損傷의 정도를 磨耗와 같은 것으로 認識하여 몇mg 줄었다든가 하는 式으로 表現하여서는 意味가 없다. 즉 基本的으로는 먼저 磨耗問題인지, 타는 問題인지 判斷할 必要가 있다.

表面損傷의 또하나의 카테고리는 材料의 疲勞破壞로 인한 表面의 剝離現象이 있다. 이것은 타는 現象과 마찬가지로 磨耗와는 區別하여 생각하지 않으면 안된다. 이러한 반복되는 接觸에 따른 表面의 疲勞破壞의 形態, 즉 表面剝離現象은 여러가지로 多樣하여 pit(움푹 들어감), flake(薄片), spall(破片) 등으로 나타나며 각각 pitting, flaking, spalling 이 發生하였다고 말한다.

本稿에서는 磨耗에 關해서 說明하고 있으나 表面의 損傷에는 타는 現象이나 疲勞破壞 등도 있다는 것을 알아두는 것은 중요한 일이다.

磨耗란 潤滑用語集⁹⁾에 의하면 “摩擦에 의한 固體表面部分의 逐次減量現象”으로 定義되어 있다. 逐次減量(progressive loss of substance)이라고 하는 점이 특이하나, 同用語集에서는 이것을 다시 “보통은 두 면에서 磨耗粉으로 小片이 떨어져나가 減量되는 것이다”라고 說明하고 있다. 이것은 당

연한 說明으로 보이나, 여기서 또 한가지 생각되는 것은 “보통은”이라고 한 점이다. 원래는 그대로 逐次減量現象이라고 하나, “상대의 摩擦面에 表面部分이 移着하거나, 또는 상대편에서 移着해온 경우에 간혹 廣義的인 解釋으로 減量이 없는 경우에도 固體表面의 摩擦에 의한 變形損傷까지 總括하여 磨耗라고 하는 경우가 있다”는 것이다. 또한 “相對面이 固體表面으로 限定된 것은 아니며, 例컨대, Erosion 과 같은 浮遊粒子에 의한 磨耗도 存在한다”는 것이다.

要컨대, 固體의 表面이 문지러져 점차 파이게 되어 “곤란하다”는 것을 表面이 磨耗되었다고 말하는 경우도 있으나, 이것은 약간 恣意的으로 사용된 것으로도 볼 수 있다.

지금까지 說明한 것을 잘 整理한 다음, 一般論으로서 磨耗를 分類해 보면 다음과 같다(潤滑 Handbook¹⁰⁾ 참조).

(1) 凝着磨耗(adhesive wear) : 眞實接觸部の 凝着에 기인한 破斷으로 發生하는 磨耗.

(2) Abrasive 磨耗(abrasive wear) : 단단한 面의 突起나 硬質粒子의 切削作用에 의해 일어나는 磨耗.

(3) 腐蝕磨耗(corrosive wear) : 분위기나 潤滑劑의 腐蝕作用과 摩擦의 機械的作用이 並存함으로써 發生하는 磨耗.

(4) 疲勞磨耗(fatigue wear) : pitting 이나 flaking 등의 回轉疲勞.

(1) 凝着磨耗는 가장 일반적인 것으로서 “번들 번들하게 닳는다”고 할까, 어쨌든 어떤 豫想되는 範圍內에서 일어나는 것은 모두 이러한 種類에 속하는 것이 많다. 그리고 이 磨耗를 正常磨耗(normal wear)라고도 한다. 원래 摩擦作用이 있는 限, 앞에서 말한 바와 같이 固體間接觸이 存在하게 되므로 어느 정도 磨耗가 일어난다는 것은 오히려 당연한 狀態라고 볼 수 있다.

(2) Abrasive 磨耗는 샌드페이퍼로 문지른다가, 研磨粉 등으로 문지를 때 發生한다. 硬質粒子의 切削作用이라는 면에서 說明하게 되면, 그라인더로 研磨하는 경우도 여기에 해당된다. 硬質粒子에 의한 切削作用이라는 점에서는 앞에서 說明한 erosion 까지도 생각할 수 있으나, erosion 損傷 그

자체는 腐蝕(Corrosion)으로 보는 경우가 많으며, 오히려 腐蝕磨耗에 속하는 것이 妥當한 경우도 있다.

Abrasive 磨耗에 관해서 다소 강조하고 싶은 것은 空氣中에 浮遊하고 있는 “硬質粒子”나 이러한 시스템에 들어온 固體粒子(먼지라고도 함)가 abrasive 磨耗의 原因이 된다고 하는 점이다. 精密機器에서는 특히 留意할 事項이므로 이러한 磨耗는 單純히 材料의 耐磨耗性問題로 생각하는 것이 아니라 環境面으로도 考慮할 必要가 있다.

(3) 腐蝕磨耗는 摩擦材料와 環境이 合해서 일어나는 것이므로 이 두가지를 同時에 감안하지 않으면 안된다.

(4) 疲勞磨耗는 주로 材料 때문에 일어나므로 潤滑制 등으로 잘 解決하지 않으면 안된다. 磨耗問題에 대처하는 경우, 어떠한 磨耗가 問題가 되고 있는가를 먼저 알아야 하는 것이 重要하기는 하지만, 그것은 潤滑不良이나 材料疲勞 등 基本的인 原因을 判定한 다음에 논할 問題인 것이다.

以上 4 가지의 分類 외에도

(5) 微動磨耗(fretting corrosion)

(6) 變形磨耗(plastic flow)

의 두가지를 더 추가해 두는 것이 磨耗形態를 좁 넓게 보는 意味에서 좋을 것 같다.¹¹⁾

그런데, 이와같이 多様な 形態로 되어 있는 磨耗에 있어서 眞實한 理論이 唯一하게 存在할 리는 없을 것이다. 그리고 이 磨耗理論은 議論百出로 論爭이 활발하게 전개되고 있는 狀態에 있다. 위에서 說明한 分類에 대해서는 각각 理論이 정립되어 일단 마무리된 것 같으나, 여기서 잊어서는 안될 것은, 당초의 磨耗의 分類 그 自體는 多種多様하고 복잡한 現象을 대강 區別해본 것이라는 점이다.

다음에는 磨耗의 理論에 대하여 간단히 說明해 보기로 한다. 먼저 Holm, Archard의 凝着磨耗에 관한 理論으로서, 이것은 眞實接觸部에서 磨耗가 일어난다는 것인데, 出發은 摩擦의 凝着理論과 같다. 미끄러지는 單位距離에 있어서 接觸點을 몇 개나 만나게 되느냐를 計算하고, 그 接觸點에서 어떤 確率로 磨耗가 일어난다고 가정하여 磨耗體積을 求한다. 結論적으로는 미끄러지는 距離 l 사이에서 發生하는 磨耗粉의 總體積 W 는

$$W = x \cdot \frac{P}{p_m} \cdot l \quad (7)$$

로 表示된다. 즉, 磨耗量은 荷重과 미끄러지는 距離에 比例함을 알 수 있다.

그러나 이 理論에서는 왜 磨耗가 發生하는지, 物理的인 因子가 Parameter로 들어있지 않고 있다. 대체로 磨耗의 메카니즘이란 무엇일까. 그래서 만일 磨耗를 破壞現象으로 다룬다면 어떻게 될까 하는 點을 생각하게 된다. 破壞力學에 의하면 應力·變形의 반복, 材料의 變形, 硬度 등 導入해야 할(또는 導入하고 싶은) parameter는 얼마든지 나온다. 이들을 表面의 突起에 대해서 생각한다는 것 하나와 또 crack의 發生과 結付시켜 생각해보자는 立場도 있다. 이러한 一連의 研究家들의 特徵은 摩擦面을 열심히 觀察한다는 것이다.

6. 고무, 플라스틱의 摩擦磨耗

(1) 마크럼 磨耗

高分子材料의 磨耗現象은 복잡하나, 이것을 單純히시켜서 溶融形, 剪斷形, 炭化形 및 高彈性形으로 分類하면 便利하다.

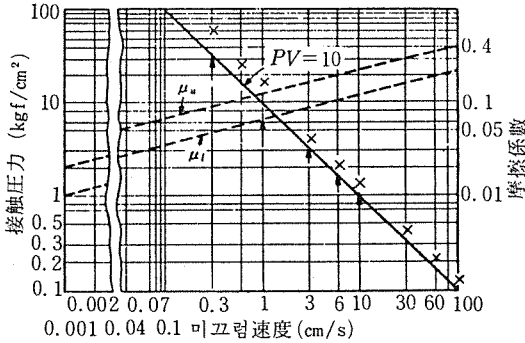
① 溶融形 鋼과 나일론 및 나일론과 나일론을 각각 接觸壓力 P 및 미끄럼 速度 V 인 條件에서 미끄러지게 할 때, $P \times V$ 의 값이 어떤 一定值以上이 되면 表面이 熔融되는 現象이 나타난다. 이와같은 溶融條件을 實驗적으로 調査한 結果는 다음과 같았다.

$$PV^\alpha = C \quad (8)$$

여기서 나일론과 鋼에서는 $C=590$, $\alpha=1.1$ 이었고, 나일론과 나일론에서는 $C=90$, $\alpha=1$ 이다. 여기서 이와같은 差가 나타난 것은, 發熱量이 일정하다고 하면 熱傳導가 다르기 때문이다.

이와같은 現象은 高密度 폴리에틸렌에서도 나타나는데, 폴리에틸렌-鋼에서는 $C=200$, 폴리에틸렌끼리는 $C=20$ 이었다.

② 剪斷形 接觸壓力과 미끄럼 速度를 서로 곱한 PV 值를 크게 하여도 나일론과 같은 溶融은 발



〔그림 8〕 PTFE의 磨耗發生

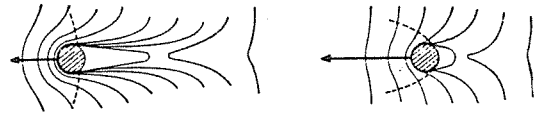
생하지 않고, 그 대신 磨耗가 발생하는 Teflon 이 있다. 그 예를 보면 그림 8과 같다. 이것은 Teflon 을 鋼에 대해 미끄러지게 하였을 때의 결과이며, $C=10$ 으로 그 限度가 나타났다.

以上の 實驗은 室溫에서 한 것이지만, $PV=100$ 으로 하고 試驗片의 溫度를 300°C 까지 올려서 磨耗를 調査한 結果, 溫度가 높아짐에 따라 磨耗가 작게 되었다.

③ 炭化形 페놀樹脂는 乾燥狀態로서 耐磨耗性이 있으므로 브레이크 슈나 클러치 板에 使用되고 있다. 그리고 그 耐磨耗機構는 摩擦面에서 熱에 의해 炭化-脫落을 반복하는 것 같다.

이와같은 機能을 가진 것으로는 폴리이미드樹脂가 있다. 荷重을 媒介變數로 하여 磨耗에 대한 速度의 영향을 檢討하였으나, 磨耗의 피크가 約 250 cm/sec 의 速度에 있다. 여기에서 左側領域에서는 줄로 研削한 것 같은 機械的인 磨耗가 보이고 또 右側에서는 表面이 炭化되어 있는 모습이 보였다. 즉, 摩擦熱이 化學變化를 일으켜 炭化層이 發生한 것이다. 炭化層의 두께는 最高 1 mm 에 달했다. 그리고 이 炭化現象에 의해 Crack이 發生하나, 그條件은 PV 值에 따르며, $PV=1200\sim 1500\text{ kgf/cm}^2$ 과 같이 매우 높은 값을 가지게 된다.

④ 高彈性形 미끄럼면의 接觸狀況을 微視적으로 보아 한쪽 面은 理想的으로 매끄럽고, 다른 한



〔그림 9〕 고무의 摩擦에 의한 變形

쪽 面은 거칠다고 하면, 이와같은 미끄럼 過程에서는 하나의 突起部와 平面의 조우라고 볼 수 있다. 그림 9는 斷面이 円形인 針을 고무 表面 위에서 미끄러지게 할 때 變形의 部分的 軌跡을 表示한 것으로, (a)의 最大變形에서 그것이 解放되고 다음의 變形 (b)가 시작되는 모습을 나타낸 것이다. 즉, 接觸時의 速度를 0으로 하고, 接觸點이 離脫할 때의 速度를 미끄럼 速度 V 라고 하면, 減速度인 dV/dt 가 작을수록 摩擦力, 즉 破壞力이 작고, dV/dt 가 커지면 破壞力도 커진다.

參 考 文 獻

- 1) Holm, R.: Electric Contacts, H. Gebers Forlag(1946) 2
- 2) Rabinowicz, E.: Friction and We of Materials, John Wiley and Sons (1965) 32
- 3) Lieng-Huang Lee 編 : Polymer Science and Technology, vol. 5, Advances in Polymer Friction and Wear, Plenum Press (1971) 5
- 4) Jonson, K. L., Kendall, K. and Roberts, A. D.: Proc. Roy. Soc. (London) A324, (1971) 301
- 5) Holm, R.: Kirschstein B.: Wiss Veroff. Siemens Konz., 15, 1 (1936) 122
- 6) Lieg-Huang Lee: Advances in Polymer Friction and Wear, Plenum Press. (1974) 31
- 7) Tanaka, K.: J. Pys. Soc. (Japan), 16 (1961) 2003
- 8) Lieg-Huang Lee: Advances in Polymer Friction and Wear, Plenum Press. (1974) 51
- 9) 日本潤滑學會編 : 潤滑用語集-解説付一, 養賢堂 (1981) 160
- 10) 日本潤滑學會編 : 潤滑ハンドブック, 養賢堂 (1970) 72
- 11) 曹田範宗 : 潤滑, 5 (1960) 109
- 12) たとえば木村好次, 岡部平八郎 : トライボロジー概論, 養賢堂, (1982)

☆

☆

☆