

補强性고무의 磨耗機構 (I)

編輯部譯

1. 遊離粒子 또는 凝集體에 의한 磨耗
2. 磨耗性質의 集中的인 低下機構
3. 고무의 試驗室的 磨耗
 - A. 磨耗와 摩擦
 - B. 磨耗型態
 - C. 磨耗와 Slip
4. 路面磨耗

1. 遊離粒子 또는 凝集體에 의한 磨耗

苛酷한 磨耗條件下에서 그 耐久性이 優秀한 고무製品은 타이어, 구두창 및 自動車의 밑갈개(Mat)等이다, 고무는 金屬의 壽命을 늘리는 能力(作用)이 顯著하며 이의 用途도 重要하다. 加黃 고무의 薄膜으로 金屬을 被覆하는 技術은 탱크, 落下傘, 흡과 및 性質이 特殊한 物質 또는 끝이 銳利하게 생긴 物質의 操作用 Bin 등에 應用되고 있다. 콘베이어 벨트는 이와같은 類의 磨耗를 자주 받기된다. 다른 物質의 경우와 마찬가지로 고무의 磨耗速度는 물과 같은 適切한 潤滑劑로 接觸表面의 摩擦 相互作用을 除去시킴으로서 減少될 수 있다. 그러나 潤滑劑에 의한 摩擦의 低減은 고무의 銳利한 部分의 切傷作用도 增加시킨다.

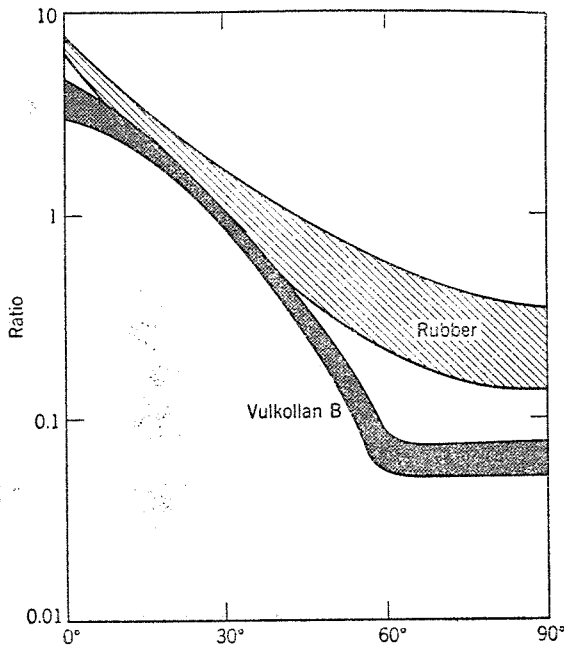
타이어의 磨耗率은 濕한 舗裝道路에서는 적지만 이와같은 結果에 對하여 表面濕도가 낮을 때 일어나는 現象에 對하여는 아직까지 完全한 說明이 없다. 빗방울때문에 일어나는 腐蝕을 防止하기 爲하여 高速으로 비행하는 航空機, 風板(Aeroforl)의 主要部에 Neoprene 이나 Poly-

urethane 被覆을 하는 것은 彈性體에 의한 被覆으로 얻어지는 耐磨耗性이 金屬性 物質에 의한 被覆보다 훨씬 優秀하다는 證據이다. 比較試驗結果 彈性體를 利用한 被覆은 表面에 粗雜度(Roughness)의 形狀 期間을 10에서 100의 因子까지 延長시킨다는 것이 證明되었다. 一般的인 廣義의 意味에서는 이와같은 用途에서 彈性體가 優秀한 耐磨耗性을 나타내는 機械的인 根據는 彈性體를 破壞시키기 爲하여 外力을 加하는데 必要한 高度의 에너지 또는 일(work), 可塑性 流體를 蓄積하지 않고 即, Stress-strain 曲線에 降伏點(Yield point)을 만들지 않고 繼續的인 衝擊으로부터 나오는 에너지를 吸收하는 彈性體의 能力 및 高度의 Poisson 比에 應力集中을 減少시키는 相當히 낮은 Modulus의 效果에 依해서 說明될 수 있다. 破壞될 때까지 吸收된 에너지의 金屬과 比較하면 고무의 높은 伸張은 큰 範圍까지 그 고무의 낮은 Modulus 및 引張力을 相殺할 수 있다. 重量이 同一한 境遇에 比較해 본다면 引張力試驗片이 破壞했을 때 發生하는 에너지는 Tread 고무의 加黃體가 15,000 ft-lb/lb 인데 反하여 普通鋼鐵은 3,000 ft-lb/lb 이다. 反復되는 荷重 即, 正常的인 使用應力(Working stress)에서는 週期當 에너지 收受量은 고무가 약 2,000 ft-lb/lb 이고 鋼鐵은 20ft-lb/lb 이다. 이와같은 考察로 고무는 다른 金屬보다 硬度가 낮음에도 不拘하고 耐被覆性이 金屬보다 優秀하다는 것이 基礎的인 物理的 媒介變數의 意味에서 充分히 說明될 수 있다. 그러나 正常的인 硬度의 範圍內에서는 고무自體는 硬度가 增加함에

따라 磨耗率은減少하는 傾向을 보이는 大部分의 物質이 가지고 있는 一般的인 法則을 따르고있다.

遊離粒子에 依한 磨耗의 原理는 Air blast (壓力이 높은 바람)에 依해서 運搬된 汗줄기의 粒子群으로 많은 物質의 磨耗에 對하여 廣範圍한 比較研究를 한 Wellinger 및 Uetz의 實驗結果로부터 깊이 알 수 있다. 噴出되어 나오는 粒子群의 投射角은 가장 重要한 變數中의 하나이며 다른 物質의 相對的인 結果에 顯著한 效果를 준다.

配合고무 및 하나의 標準鋼鐵의 試驗片에 關係되는 Vulkollan의 容積損失을 噴出되어 나오는 粒子群의 投射角의 函數로서 (그림 1)에 나타내었다 (石英砂의 粒徑은 0.2 乃至 1.5mm).



表面角이 30°以上일 때 고무는 角度가 增加함에 따라 鋼鐵보다 顯著히 改良되고 있다. 어떤 주어진 角度에서는 하나의 粒子로부터 나오는 衝擊力은 表面에 平行한 切線成分 및 表面에 垂直인 法線成分을 가지고 있을 것이라고 豫見된다. 摩擦係數에 依해서 角度가 決定된다. (그림 1)에서 表面粒子의 미끄러지기 쉬운 可能性이 減少함에 따라 고무의 優秀性이 더욱 顯著하

다는 것을 알 수 있다.

고무 및 鋼鐵의 相對磨耗能力의 다른 또 하나의 좋은 보기는 試驗用 바퀴와 磨碎用 바퀴間의 미끄러짐을 調整하기 爲하여 磨碎用바퀴 反對쪽에 쇠 바퀴 및 고무바퀴를 굴러 實驗을 한 Zapp의 研究이다. Butyl tread 고무의 磨耗率은 Slip이 낮은 鋼鐵보다 훨씬 적다. 이것은 Zapp가指摘한 바와 같이 큰베어벨트, 고무를 입힌 落下傘 그리고 이와 비슷한 構造를 가지고 있는 物體가 優秀한 耐磨耗性을 가지고 있다는 것을 說明하는데 도움이되고 있다. 物體는 고무와 接觸될 때 反撥하고 미끄러지지 않는 反面 굴러 떨어져서 고무에 가장 優秀한 磨耗性을 주게 된다.

2. 磨耗性質의 集中的인 低下機構

磨耗는 다른 表面과의 摩擦에 依한 相互作用으로 因하여 고무 表面으로부터 적은 微粒子가 物理的으로 移動하는 現象이다. 集中的으로 일어나는 磨耗의 低下에 있어서의 粘彈性的인 效果는 大端히 크다. 타이어磨耗에 있어서의 集中的인 伸張率은 100,000, 200,000 및 1,000,000 %/sec의 順으로 되어 있다는 것은 오래 前부터 推定되어온 事實이다. Fromandi, Ecker 및 Heidemann는 20°C에서 天然고무 配合의 加黃 Tread 고무의 引裂強度는 伸張率을 20에서 20,000%/sec 範圍까지 增加시킴에 따라 漸次的으로 減少한다는 事實을 發見하였다. 이 경우 Buna S는 引裂強度가 約 500%/sec에서 最少值를 나타내었다가 急激히 上昇하여 5000%/sec에서 天然고무의 曲線을 가로 지르고 있다.

Grosch 및 Mullins는 速度와 溫度에 대한 依存性에 있어서 非結晶性고무 加黃體의 磨耗率이 代表的인 粘彈性現象에 대한 法則에 完全히 一致한다는 事實을 發見하였다. 이것은 補強性 加黃體에 대해서는 아직 證明되지 않고있다. 그래서 構造機構는 補強性고무에 適用되어지지 않

며 더욱 그 工程이 完全히 粘彈性이라고는 말할 수 없다. 더욱이 構造效果 그 自體가 粘彈性 遷移를 따를 수도 있으며 따라서 이와같은 原理上에 그 效果의 存在를 決定하는 것은 容易하지 않다.

Schallamach는 바늘을 加黃體의 表面에 꼽았을 때 일어나는 破壞現象을 研究하여 磨耗의 集中的인 物理的 低下現象을 仔細히 觀察하였다.

바늘을 찌른 자리는 複雜한 모양을 한 應力變形 및 破壞現象이 나타났으며 이現象은 加黃體의 種類에 따라 相當히 달라지고 있고 摩擦力에 依해서 物質의 移動에 따라 表面의 弱所가 增加되고 있다.

磨耗表面에 있는 銳利한 粒子의 摩擦附著物에 依해서 생긴 纖維狀고무의 破壞點을 急速히 伸張시키는 것과 같은 簡單하고 直線的인 破壞機構가 磨耗를 支配하는 것 같지 않다. 오히려 反覆되는 伸張 및 表面元素의 作用때문에 疲勞效果가 생길 可能性이 더욱 큰 것 같다.

磨耗時 고무의 表面의 性質이 相當히 變한다는 것은 疑心할 餘地가 없다. 補強性 加黃體의 表面의 反覆되는 應力때문에 表面의 物質이 物理的으로 軟化되는 것 같다. Schallamach는 고무試驗片과 炭化珪素布地上에서 고무를 磨耗시킨 後의 金屬의 자욱間의 電氣抵抗에 큰 變化가 일어나는 것을 測定하였는데 이 抵抗은 磨耗後一 또는 二次的인 크기로 增加하고 있음을 發見하였다. 變形된 層의 두께는 數千分의 一 cm 程度밖에 되지 않는다. 普通磨耗에 있어서는 前述한 바와 같이 物理的인 Peeling 또는 Rolling 機構에 依해서 移動되는 것은 바로 上述한 表面이며 따라서 磨耗는 繼續的으로 再生하는 軟化層이 一種의 集中的인 Delamination(얇은 조각 또는 層으로 갈라지는 것)을 일으킨다고 推定되고 있는 것 같다. 普遍的인 意味에서의 加黃體性質을 다시 말해서 試驗室에서 測定한 磨耗機構를 說明하려고 하는 試圖를 複雜하게 하는 第二의 因子는 測定되지 않고 있고 또 熱傳導의 數學的인 理

論으로부터 概算할 수 밖에 없는 集中的인 溫度上昇의 發生이다. 計算上 나타난 溫度傾向은 두께가 10^{-2} cm인 表面에 集中되어 있고 그리고 이것은 一경우에 따라 一致되는 수도 있고— Schallamach가 電氣的인 測定值에 依해서 磨耗의 限界層에 대하여 推論한 두께와 같은 次數를 가지고 있다.

路面上에서의 타이어의 螺旋形의 走行 또 Sliding과 같은 苛酷한 使用條件下에서 磨耗가 될 경우 고무表面의 溫度는 SBR에 대해서는 240°C 이고 天然고무에서는 200°C 인 熱分解點에 到達할 수 있다. 이와같은 條件下에서는 熱軟化 및 分解가 磨耗에서 一般的으로 일어나는 物理的인 作用機構를 크게 增加시킨다.

Stiehler가 說明한 磨耗의 酸化機構는 이와같은 苛酷한 條件下에서는 아주 그럴듯한 磨耗에 한나의 因子가 된다. 天然고무 및 SBR의 酸化의 差異點은 磨耗의 正溫度係數(Positive temperature coefficient)는 天然고무 Tread에서 SBR Tread는 負係數(Negative coefficient)를 各各 가지고 있다는 것이다. 가벼운 磨耗條件 즉 고무의 移動率이 낮은 條件下에서는 天然고무 및 SBR Tread의 加黃體는 耐磨耗性이 比較될 程度로 비슷하지만 苛酷한 條件下에서는(즉 高度의 分解 또는 破壞溫度가 重要한) SBR이 훨씬 優秀하다.

〈表 1.1〉 몇가지 表行條件에 대하여 計算한 摩擦 溫度上昇

走行條件	摩擦 溫度上昇, $^{\circ}\text{C}$			
	理想的인 平滑 路面		小眞接觸面에서	
	아스팔트	콘크리트	아스팔트	콘크리트
正常運行				
62.1 miles/hr, 3% slip	15	10	60	40
커브길				
31.1 miles/hr; 10% slip	35	25	140	100

<表 1·1>에 表示된 Viehmann's가 計算한 結果中의 몇가지는 表面이 平滑하다고 假定하여 타이어 Tread의 表面에서의 摩擦溫度上昇이 大端히 順調로워 磨耗에 미치는 溫度의 影響은 極히 적고 따라서 이때의 磨耗는 機械的이라고 생각하여야 된다는 것을 示唆하는 것이다.

3. 고무의 試驗室的 磨耗

A. 磨耗와 摩擦

고무의 磨耗는 다른 物體의 表面과 고무表面의 摩擦相互作用으로 因하여 고무表面에 集中的인 Overstress가 일어나 그 結果 磨耗現象이 나타나게 되며 이 磨耗는 摩擦熱에 依하여 促進된다. 그러므로 加黃體의 摩擦特性이 磨耗作用의 一部를 이루고 있다는 것은 明白하다.

一般的으로 고무의 경우에 있어서의 摩擦力은 勿論 彈性體의 分子構造 및 配合에 左右되지만 溫度, 速度 및 荷重에 依하여 크게 影響을 받는다. 이와같은 複雜한 摩擦舉動이 磨耗工程에 如何히 關係되고 있는 가에 대하여 仔細한 分析이 되어 있지 않으나 摩擦과 磨耗現象間에 몇가지 보다 明白한 關係는 興味있고 有益한 材料가 되고 있다.

試驗方法과 試驗을 마친 配合고무의 限界內에서 試驗室 磨耗試驗의 結果를 說明하기 爲하여 作成된 經驗的인 發表에 依하면 磨耗速度는 어떤 標準化된 方法으로 決定된 摩擦係數에 比例한다고 하였다. Sand paper 上에서 磨耗試驗을 行한 結果로부터 Ratner 및 Melnikova는 다음 式을 誘導하였다.

$$\Delta V = CN\eta\mu t/\sigma \quad (1)$$

여기서 v 는 時間 t 에 있어서의 密積損失, N 은 正常負荷, μ 는 摩擦係數 η 는 Stiffness의 逆數, σ 는 引張強度, 그리고 C 는 주어진 磨耗에

對한 常數이다. Zapp는 小型의 回轉 滑走式 바퀴를 試驗片으로하여 얻은 Butyl 고무의 磨耗試驗結果를 說明하기 爲하여 아래와 같은 關係式을 誘導하였다.

$$\text{磨耗損失} \sim \frac{\text{動的 Modulus}}{\text{破壞에너지}} \times \text{摩擦} \quad (2)$$

動的 Modulus는 強制振動의 實驗值에 依해서 決定되고 破壞에너지는 Stress-strain 曲線下에 있는 面積이며 摩擦測定值는 磨耗試驗機의 電磁式 移動裝置에 주어진 電氣에너지로부터 決定된다.

고무의 Modulus는 式(1) 및 (2)에 關係된다는 것은 注目할만한 事實이다. Zapp는 力學的으로 보다 더 軟質의 고무가 表面粗雜度에 훨씬 더 잘 一致된다는 前提下에 試驗한 結果 나타난 Modulus 依存度를 說明하였으며 고무가 軟하면 集中的인 應力의 強度를 減小시킨다고 하였다.

一般的으로 고무에 對한 摩擦力은 接着에서 나오는 分力 및 表面粗雜度에 依한 고무의 分解로 일어나는 에너지 損失 등으로 構成된다. 接着에서 나오는 分力은 表面의 不規則性 및 粗雜度 그리고 少量의 接觸面積 以外 고무의 相似性에 依해서 決定됨으로 接觸部의 眞面積에 比例한다.

하나의 不規則한 現象은 高率의 磨耗를 일으킬 수 있는 거칠은 表面을 가진 고무의 摩擦力이 實際的인 接觸面積의 差異때문에 平滑한 表面의 摩擦力보다 一般的으로 더 낮다는 것이다. 切線方向의 힘의 函數 및 溫度에 對한 速度의 依存度로서 고무의 미끄러짐 速度 (Sliding velocity)에 關하여 研究한 結果로부터 고무 摩擦의 接着成分은 活性에너지를 가지고 있는 分子의 速度作用이라고 說明하였으며 따라서 이 點에 있어서 이와같은 理論은 粘性流動과 비슷하다.

또 고무의 摩擦係數는 Sliding velocity에 對하여 複雜한 依存度를 나타내고 있다. 異物이 없는 乾燥한 表面에서 아주 느린 速度로 摩擦이 일

어날 때 그 계수는 속도가 증가함에 따라 증가하고漸漸 더 증가하여 最高値에 達했다가 아주 빠른 속도에서는 다시 떨어진다.

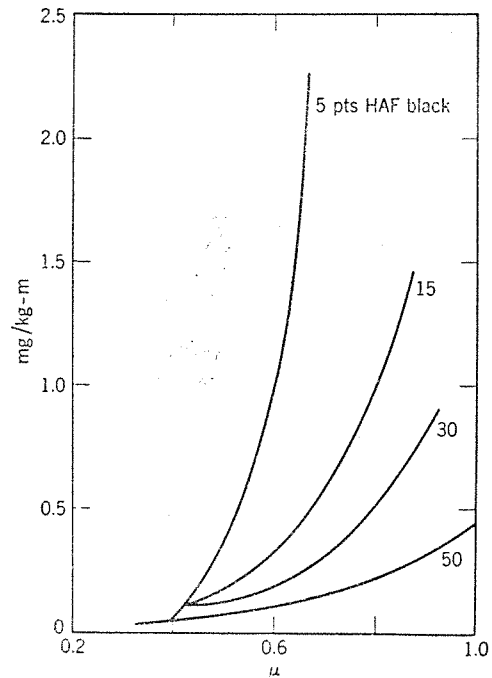
그러나 거치른 表面에서는 이와같은 傾向이 그렇게 甚하지는 않다. 摩擦係數의 速度 依存度에 依해서 가끔 고무가 Sliding 할 때 Stick-slip 運動現象이 일어나는 것을 볼 수 있다. 타이어의 磨耗를 줄이는 것은 重要하고 逆說의인 可能性 및 이와 同時에 牽引力을 改良시키는 方法等이 고무에 對한 Stick-slip 摩擦의 分析結果가 밝혀졌다. 낮은 摩擦係數의 Sliding 에 對한 抵抗力은 Stick-slip 運動을 일으켜서 週期的 最高點에서 苛酷한 磨耗 때문에 附隨되는 높은 摩擦係數의 Sliding 抵抗力보다 더 크다.

Sliding 을 일으키는 靜的 摩擦 또는 힘의 概念이 고무에 對하여 어떤 實際的인 意味를 가지고 있는가에 對하여서는 確實한 論據가 없다. 摩擦機構가 粘性流動이라면 이미 說明한바와 같이 靜的 摩擦을 定義하는데 있어서 이와같은 難點은 容易하게 解明될 것이다. 고무摩擦의 分解成分은 明白하게 機械的 Hysteresis 와 直接的인 關係가 있다. 고무가 단단한 表面上에 露出되어 있는 突起部와같은 障害物上에서 미끌어지거나 구를 때(Rolling)는 고무는 分解되고 分解에 必要한 얼마간의 일(Work)은 消失되거나 또는 熱로 變化한다. Rolling friction 이나 潤滑性 摩擦의 境偶 摩擦의 分解成分은 接着成分보다 一般的으로 훨씬 더 重要하다. 勿論 磨耗는 摩擦係數가 높아짐에 따라 나타나는 에너지의 消耗가 必要하게 된다.

摩擦의 分解成分은 接着成分처럼 磨耗에 對하여 重要的 意味를 가지고 있다고는 생각되지 않고 있다. 고무摩擦의 接着 및 分解成分은 모두 그 性質이 粘彈性이므로 적어도 고무加黃體에 있어서 摩擦係數가 速度 및 溫度 依存度에 對하여 典型的인 粘彈性 變形原則에 따른다는 것은

當然한 것이다.

摩擦, 磨耗 및 補強間의 關係는 여러가지 面에서 模糊하지만 分明히 비슷한 點이 있기는 하다. Boonstra 및 Dannenberg 는 磨耗試驗의 過程에서 摩擦 測定値를 算出하여 이와같은 關係에 對하여 몇가지 報文을 發表하였다. (그림 2) 는 磨耗効率(單位에너지當 重量損失) 및 SBR 에 Carbon black 混入量을 變數로하였을 때의 摩擦係數間에 일어나는 依存度를 說明한 것이다. 주어진 配合고무에 對한 摩擦係數의 變動은 Slip 比(%)로 나타나는 계수의 依存度 때문에 생긴다.



(그림 2)

Carbon black 混入量이 적을 때 磨耗効率は 단지 0.60의 摩擦係數로 急激히 上昇하고 있으나 HAF black 50部로 補強된 고무는 1.00 以上の 계數로서 磨耗効率의 急上昇은 볼 수 없다. 摩擦係數가 낮을 때는 磨耗効率は 補強과는 거의 關係가 없다.

(다음號에 繼續)