

타이어의 磨耗과 高速의 引張強度

廉 弘 燦

序 言

고무의 耐磨耗性 問題는 고무工業 特히 고무가 타이어에 利用되면서부터 많은 研究와 實驗을 하여 왔으며 그 方法은 다음 세가지로 區分할 수가 있다.

1. 普通의 實驗室의 方法에 依한 物理性을 測定하여 磨耗에 對한 經驗的인 結果와 磨耗에 影響을 주는 因子를 얻는 方法.

2. 促進狀態下에서 實驗室的으로 磨耗를 測定하는 方法.

3. 磨耗의 Mechanism을 利用해서 實驗하여 磨耗의 理論的인 結果를 誘導하는 方法.

上記 方法中 둘째 方法이 널리 利用되어 왔고 많은 種類의 磨耗試驗器를 發展시켜왔다. 그러나 우리의 見解로는 모든 면에서 만족할만한 方法은 아직 發見하지 못하였으며 長期間發生되는 諸現象을 짧은 時間內에 축소시켜 판단함으로써 어느 정도 측정이 可能할 지라도 어려운 問題가 介在되어 있다.

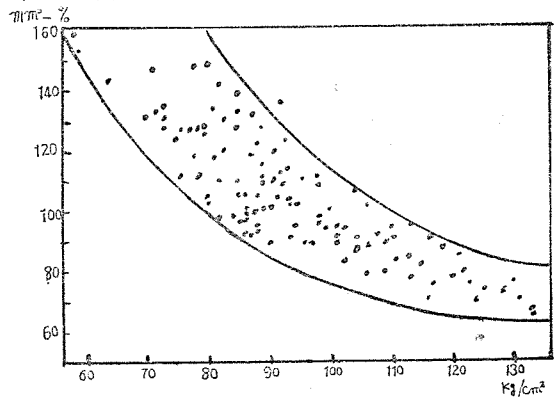
셋째 方法에서는 磨耗機構를 各 構成因子로 區分하여 이들을 磨耗에 關한 物理的인 關係式을 맺는 方法으로 Schallmach 에 依하여 이루어졌다.

Schallmach 等의 研究結果로 고무의 磨耗는 Viscoelastic(粘彈性) 性質에 依한다 하였다.

첫째 方法에서는 보통의 實驗室的인 방법에서

1. 序 言
2. 摩 擦
3. 粘彈性
4. 高速, 高溫의 引張試驗
5. 磨 耗

얻은 磨耗와 引張強度, 硬度, 反撥彈性等과의 關係가 새로운 合成고무의 出現으로 좋은 結果를 얻지 못하였고 實際磨耗와 一般物理值와는 대단한 差異가 있다는 것은 周知의 事實이다. 磨耗過程은 주로 고무表面에서 적은 고무粒子가 分離되는 現象이며 이는 表面에서의 摩擦伸長等에 依한 表面破壞이다. 그런데 보통의 引張試驗은 常溫下에서 引張速度가 10%/sec 이지만 實際 타이어에서 局部的伸張速度는 상당히 크며 走行時 伸張速度는 2×10^4 %/sec 로 磨耗와 關聯하여 檢討한 바 있고, 타이어局部溫度가 200°C 가 됨을 보았다. 이와 같은 結果로 우리는 타이어의 磨耗는 高溫과 高伸張速度에서 物理的 破壞에



(그림 1) $\log W = f(\log V, 100^\circ\text{C 와 } \log V = 1.5 \times 10^4 \text{ %/sec})$ 마모시험

依하여 發生하는 Thermal-oxidative 過程이라는 結論을 내릴 수 있었다. (그림 1)은 100°C에서 引張速度 $1.5 \times 10^4 \%$ /sec에서의 引張強度와 磨耗(DIN 53516방법)와의 關係를 보여주고 있다. 이에 依하면 磨耗損失은 高溫, 高引張速度에서의 引張強度에 反比例함을 알 수 있다.

그러나 磨耗過程에서 더 重要的 것으로서 생각하여야 할 것은 摩擦로서 摩擦法測을 考慮하여야 할 것이다.

摩 擦

고무의 摩擦은 一般原理에서 求할 수는 없고 實驗으로 決定하며 Adhesive 摩擦과 Sliding 摩擦로 區分할 수 있어 Sliding 摩擦은 Adhesive 摩擦과 병행한다. Coulomb 法測에 따른 摩擦力 $F = \mu N$ (F: 마찰력, N: 荷重, μ 는 摩擦係數)는 彈性體에서는 不完全한 것으로 摩擦係數 μ 가 速度뿐만 아니라 溫度에도 影響이 크기 때문이다. 摩擦은 Adhesive 項과 Deformation 項으로 나누어 생각할 수 있으며 Adhesive 摩擦은 주로 摩擦表面에, Deformation 摩擦은 주로 Viscoelastic 性質과 Molecular kinetic 에 따라 影響을 받는다.

摩擦係數를 測定한 結果(그림 2)를 보면 摩擦係數 μ 와 Dynamic resilience(動的 反撥彈性) Rd와는 直線的인 關係를 보여 주고 있다. (여기서 Rd는 Roelig 方法에 依한 振動 試驗으로 부터 求하였으며 初期 Energy에 對한 半 Cycle 후의 回復 Energy의 比이다. (別表 2 참조)

그림에서 다음 式을 設定할 수 있다.

$$\mu = -aRd + b \tag{1}$$

a, b는 상수

(1)式을 Rd와는 無關인 常數 a' 를 갖는 式으로 變形

$$\mu = a'(1 - Rd) \tag{2}$$

여기서 a' 를 구하기 위해 再試驗하여 a' 를 F_1/N 로 代值하여 (2)에 代入하면,

$$\begin{aligned} \mu &= F_1/N(1 - Rd) \\ &= F_1/N[1 - \exp(-\pi E''/E')] \end{aligned} \tag{3} \quad \because \text{別表참조}$$

$$\mu = \underbrace{F_1/N}_{\text{I 項}} - \underbrace{F_1/N \exp(-\pi E''/E')}_{\text{II 項}} \tag{3a}$$

여기서 I 項은 Adhesion 摩擦部分

II 項 Deformation 摩擦部分이 된다.

- E' : Loss modulus Kp/cm²
- E' : Dynamic young modulus Kp/cm²
- F_1 : 摩擦力 Kp
- N : 無直荷重

이 關係式을 他者의 結果와 比較한다면 Bulgin, cowork 에 依해 얻은

$$\mu = (C.F/H)(E''/E') \tag{4}$$

- C: 摩擦面에 따른 常數
- H: 硬度

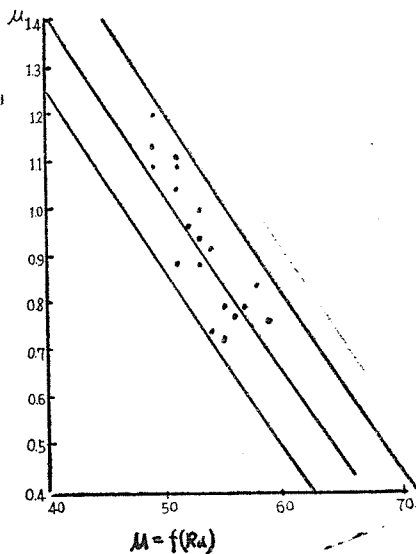
(3a)의 $\exp(-\pi E''/E')$ 를 $1 - \pi E''/E'$ 로 하면 (3)은,

$\mu = (F_1/N)(\pi E''/E')$ 가 되고 (4)의 常數 C는 摩擦面의 特性에 別로 必要하지 않은 것 F_1 에 포함되며, 硬度는 無直荷重(N)에 比列될 것이기 때문에 우리의 式과 一致가 되는 것이다. 또 Lavrentev 와,

$$\mu = (C.SN/N)[1 - \exp(BN/E)] \tag{5}$$

- C: 常數
- B: 表面不規則性因子
- S_n : 全接觸面

와 比較하여 F 대신 C.SN으로 代置되고 보면 BN과 $\pi E''$ 와의 差異가 되는데 이것에 대하여는 우리의 式이 決定하기 어려운 因子를 包含하지 않으므로 有利하다.



(그림 2)

摩擦係數의 速度와 溫度影響

摩擦係數의 影響을 주는 主要度의 試驗結果로는 Dynamic young modulus(E')와 Loss modulus(E'')로 配合師들은 特別히 配合表에서 考慮하여야 할 것이다.

Loss modulus는 彈性體의 可塑性遲延(Plastically retarding) 部分의 測定值이며 Dynamic viscosity(η)와는 다음의 關係가 있다.

$$E'' = \eta \cdot \omega \tag{6}$$

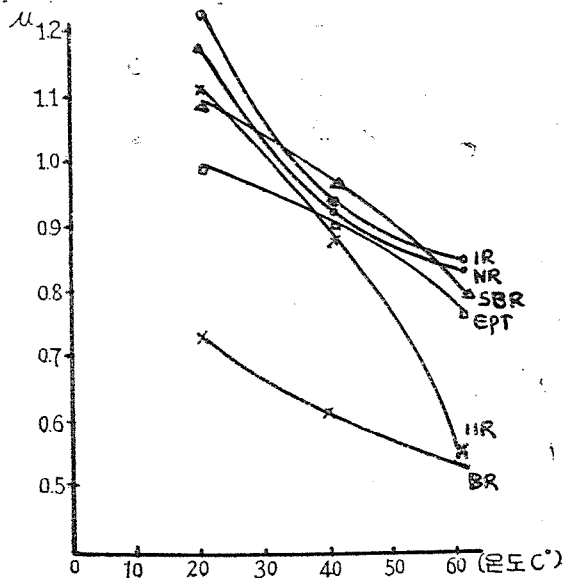
여기서 $\omega=0$ 면 $Rd=1$ 이 되며 Sliding 마찰은 없다. 즉 움직이지 않으면 摩擦은 없는 것이 된다. ω 가 增加하거나 同時에 η 가 적어지면 各고무의 速度에 따른 特性值까지 反撥彈性(Rd)은 적어지며 係數 μ 는 커진다. 즉 E'' 와 같이 μ 는 Max를 通한다. 이와 같이 (6)式은 內部摩擦(η)과 外部摩擦(μ)과의 關係를 表示한다.

Dynamic young modulus(E')는 고무의 架橋度(Network)와 다음과 같은 關係를 갖는다.

$$E' = (3CRT/M_c) (1 - 2M_c/\bar{M}_{cs}) \tag{7}$$

- P: 密度
- R: Gas 常數
- T: 絕對溫度
- M_c : 한 架橋 사이의 平均分子量 (Cross-link)
- \bar{M}_n : 架橋되지 않은 사이의 平均分子量

고무의 架橋度가 크면 즉 M_c 가 극히 적고 \bar{M}_n 가 크면 2項은 無視되며 \bar{M}_n 가 크게 되면 摩擦係數에 不安全하게 影響을 주어 溫度가 上昇하면 Young modulus(E')는 커지며 反撥彈性(Rd)은 커지며 係數(μ)는 적어진다. 6種의 고무에 대하여(配合表는 別表 1참조) 試驗結果 이를 確證하였고 (그림 3)과 같다.



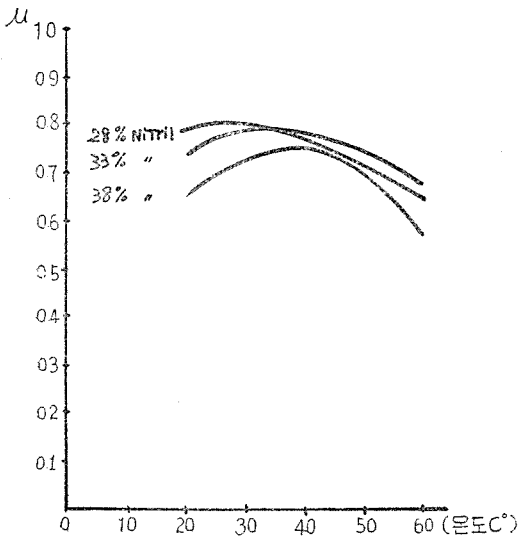
(그림 3) $\mu=f(T)$ 乾마찰

前述한 바와 같이 摩擦은 Molecular-kinetic 過程으로서 摩擦面의 各分子 Chain이 어느 Potention energy를 克服하여 계속變化하며 分子接着의 亂性 에너지는 10~20 K cal이고 分子振動은 10⁷ cycle/sec이다. 10 cycle/sec의 各 에너지에 對하여 10~15°C의 溫度移動이 된다고 假定한다면 摩擦係數의 Max는 各 고무의 冷却溫度 보다 85~90°가 높은 것이고 이에 依하면 Optimum 摩擦係數는

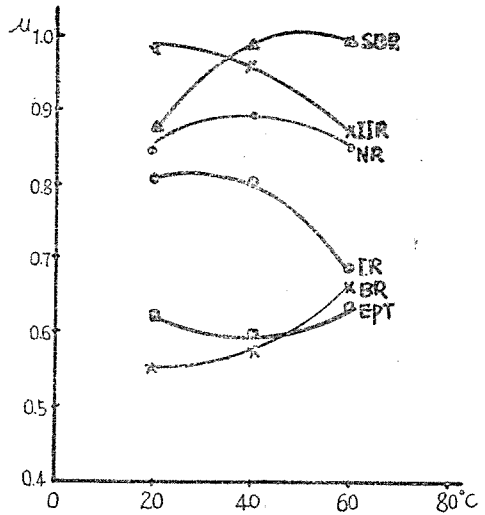
NR, IR, BR 에 對하여는 20°C 以下에 있을 것이고 SBR, EPT, IIR 은 20~30°C 에 있다. 우리의 實驗으로는 이것을 測定하지 못하였으나 NBR 에 對하여 Nitril 含量에 따른 Max μ 의 移動은 (그림 4)와 같이 發見하였다. (7)式은 溫度影響은 勿論 더 重要한 因子로서는 Network density, 即 Network 와 密接할 수록 Mc 는 적고 Rd 는 커지고 摩擦關係(μ)는 적어지며 逆으로 Mc 가 커지면 μ 도 커진다. 또한 Cross-link 型과 分子構造에도 影響이 있어 우리의 實驗結果를 例로 들면 Sulfur 加黃인 경우 $\mu=1.4$, Peroxide 의 경우 1, 2, Peroxide 量이 2倍인 경우 1.04 였다.

摩擦係數의 走路上의 影響

濕潤道路(Wet road)上的 摩擦係數는 (그림 5)와 같다. 이는 推論에 依한 (3a)의 I項의 Adhesion 摩擦部分이 별 影響을 주지 못하고 一般的으로 Max μ 가 溫度上昇方向으로 移動함을 알 수 있다. 그 理由는 여러가지로 摩擦面의 젖음은 摩擦熱을 계속 減少시키고 또한 冷却作用도 이루어지기 때문에 溫度가 上昇하면 고무表面張力은 勿論 물의 粘



(그림 4) $\mu=f(T)$ 乾마찰 NBR



(그림 5) $\mu=f(T)$ 습윤마찰

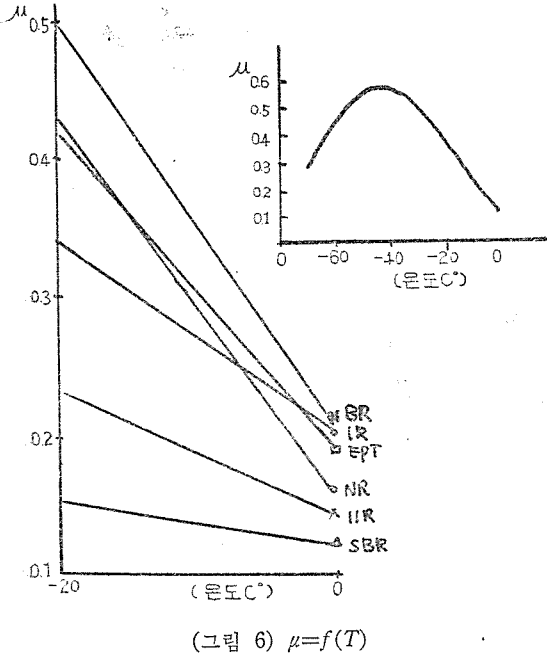
도가 보다 減少되어 물에 依한 젖음效果는 改善되는 것이다.

한편 氷板上的 潤滑試驗은 (그림 6)과 같다. 0°C 에서는 물과 얼음이 共存함으로 모든 고무의 摩擦係數는 낮고 이는 (3a)의 I項 Adhesion 摩擦部分의 낮은 수치를 갖고 Deformation 部分(II項)도 보다 적은 數値를 갖기 때문이다. 溫度가 下降함에 따라 얼음層이 딱딱하고 顯微鏡觀察이 거칠은 關係로 摩擦係數는 Max를 上昇한 다음 下降한다. 이 Max μ 는 고무의 Damping max 溫度와 비슷한 溫度에 있으며 Micro-brown 運動의 凍結과도 關聯이 있다.

配合劑에 따른 影響

摩擦係數는 彈性體自體와 熱力學的 性質에 따라 다름으로 적당한 고무를 混合하는 熟練에 따라 摩擦關係에 影響을 준다. Cross-link 程度, 構造가 重要하며, 柔軟劑는 Adhesive 마찰을 감소시키는 반면 Optimum 위치가 낮은 溫度方向으로 移動시킨다(Nitril 고무). 카야본블랙이나 Silica 等은 初期 Young modulus 의 增加 即, Mc 는 減少하나 結果

로서 Loss modulus(E'')도 增加하므로 摩擦係數는 增加하나 減少하지는 않는다. Silica filler는 카아본블랙보다 E'' 또는 η 가 增加하므로 높은 摩擦係數가 된다.

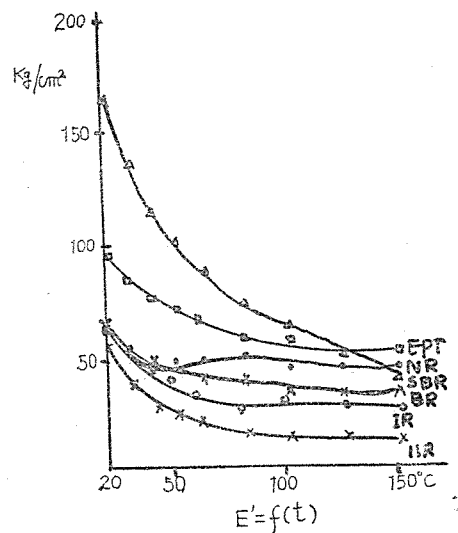
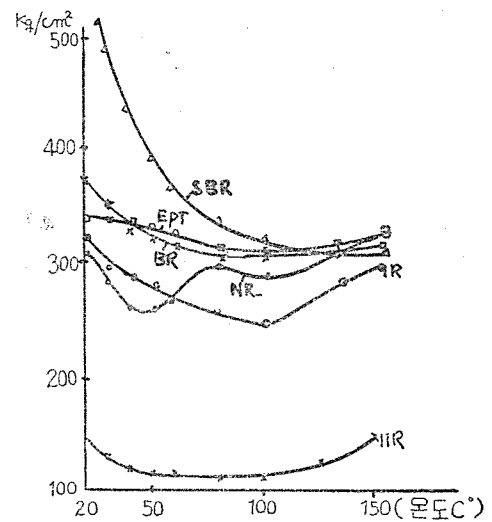


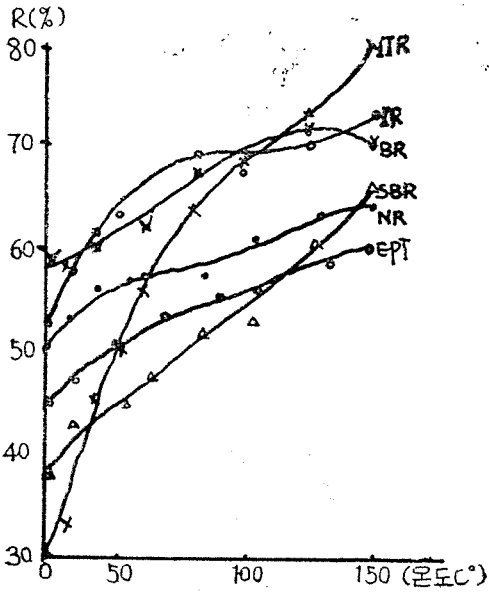
粘彈性 (Viscoelastic properties)

前述한 摩擦過程에서 粘彈性은 重要な 意味를 가지며 에너지變形測定으로 表示한다. 復合 Modulus 中 假想的 部分인 Loss modulus (E'')는 週期的 變形에 있어 回復할 수 없는 變形 에너지의 測定值이며, 實部分인 Dynamic modulus(E')는 變形에 있어 回復할 수 있는 에너지 測定值가 된다. 反撥彈性(Rd)은 初期에 全에너지에 對한 測定器에서 半 Cycle 振動後의 回復된 에너지의 比이다.

或者는 Rd 가 1/4 또는 完全振動의 것이 라는 사람도 있으나 어떤 數值라도 一定할 수 없고 溫度나 振動數에 依한다. 하여간에 粘彈성을 摩擦過程에 利用 說明코자 한다면 무엇보다도 各種 고무의 溫度에 따른 傾向을

考慮하여야 한다. 우리의 見解로는 아직 充分한 推論式은 이룩하지 못하였으나 E'' , E' , Rd 는 이 溫度에 對한 傾向을 表示하면(그림 7, 8, 9)와 같다. (이 測定은 Roelig damping 裝置로 16.6 cycle/sec에 依한 振動測定으로 <別表 2>에 記術한 方法으로 測定하여 變形換算한 것이다)





(그림 9) $R_d=f(T)$

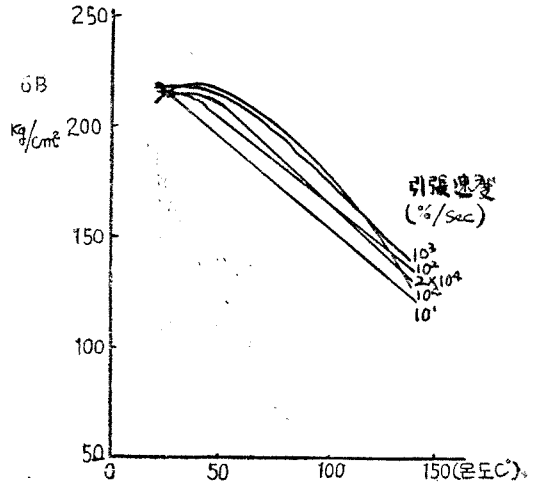
※ 고무配合表는 <別表1> 室溫以下는 摩擦을 考慮함에 不必要하므로 表示않음.

高速, 高溫의 引張試驗

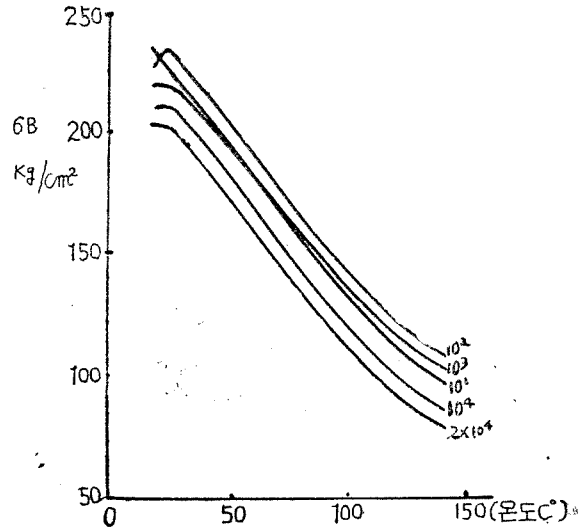
엄밀히 말하여 磨耗는 摩擦과 共存하고 粘彈性과도 關係가 있을지라도, 모든 摩擦過程이 磨耗를 意味하는 것이 아니고, 磨耗損失은 摩擦面이 거칠어지고 局部的인 變形과 應力(Stress)으로 破壞되어 積은 粒子로 分離되어야 發生하므로 磨耗는 引張強度와 關聯이 있는 것이다. 그러나 普通의 實驗室測定으로 磨耗와 關係를 얻으려는 努力은 確實한 結果를 얻지 못하고 特히 타이어 磨耗의 경우 고무粒子의 分離는 高速, 高溫에서 發生함으로써 우리가 實驗한 結果로는 高速, 高溫下의 引張強度와 磨耗와의 關係를 發見하였고 더우기 絕對引張強度보다는 溫度와 引張速度의 影響이 크다는 것을 알았다.

各種 고무에 對한 試驗結果는 (그림 10~15)와 같다. 이 結果를 全體的으로 考察하면

結晶化고무의 경우 引張速度의 增加는 同一溫度下에서는 引張強度가 低下됨을 볼 수 있고, 純粹한 非結晶고무는 反대로 增加함을

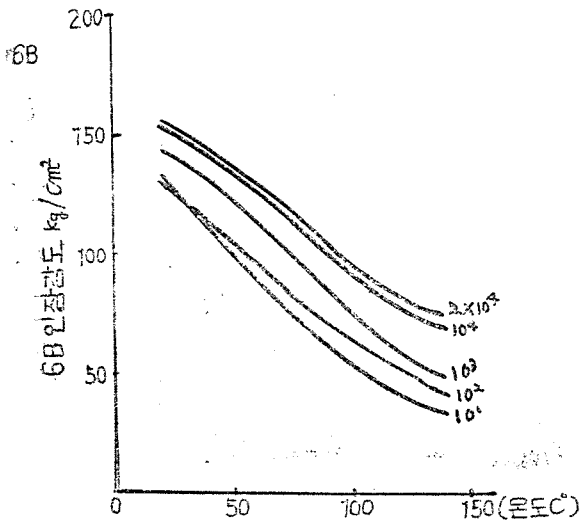


(그림 10) $\epsilon_{\Sigma B}=f(T)$ NR + ISAF

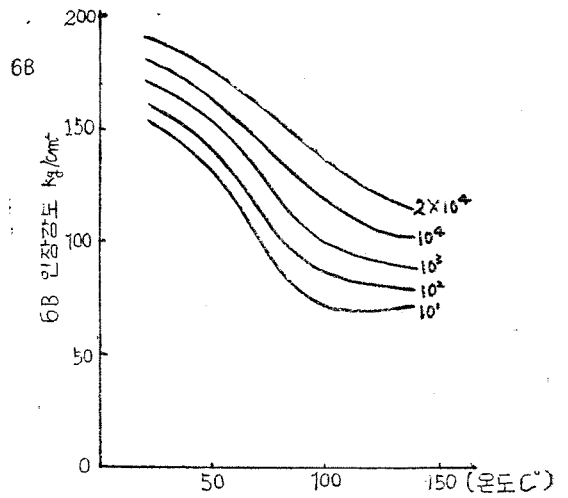


(그림 11) $\Sigma B=f(T)$ IR + ISAF

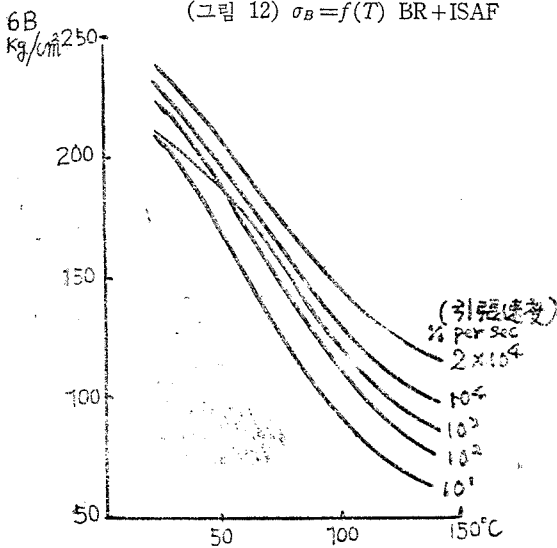
볼 수 있다. 이 增加程度는 고무의 粘度函數가 되어 높은 粘度의 것은 뛰어나게 上昇한다.



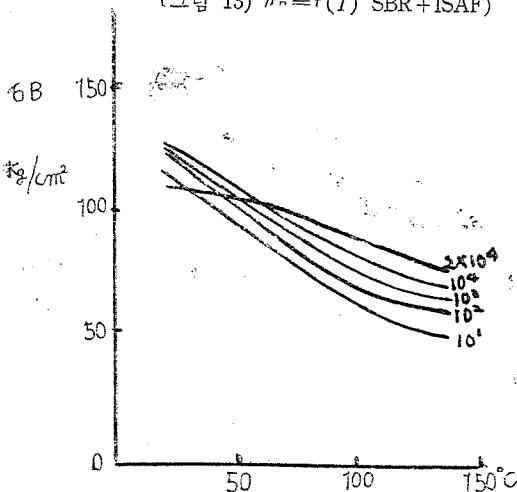
(그림 12) $\sigma_B = f(T)$ BR+ISAF



(그림 15) $\sigma_B = f(T)$, IIR+ISAF



(그림 13) $\sigma_B = f(T)$ SBR+ISAF



(그림 14) $\sigma_B = f(T)$, EPT+HAF

摩 擦

以上은 磨耗에 影響을 주는 因子에 對하여 말하였고, 計算에 根據를 두어 關係式을 얻어야 할 것이다.

磨耗는 理論과 實試驗에서 얻은 結果로서 고무의 反撥彈性, Slip, 硬度, 實地接觸面 등의 函數關係가 있고 Slip는 摩擦 즉 Sliding 摩擦의 函數이며 硬度는 Young modulus에 關係되고 實地接觸面은 거칠은 面으로 全表面은 아니다. 結果로 다음 式을 쓸 수 있고

$$W = f(R_a, \mu, E, S) \quad (8)$$

Zapp의 Lamborn 磨耗試驗器로 Butyl 고무 試驗結果로 摩擦力, Young modulus와 破壞 Energy 關係를

$$W = E\mu N \int_0^{\sigma_B} \sigma de \quad (9)$$

로 表示하여 磨耗에 있어서 破壞 에너지 혹은 引張強度의 重要함을 表示하였고 우리 結果 (그림 1)과 비슷한 見解를 보였다. 우리는 더 近似한 關係를 얻기 爲한 여러 反復試驗으로 얻은 結果로는 絕對 引張強度보다는 σ_{B1} 에 對한 σ_{B2} 의 比(σ_{B1} : 常溫과 인장속도 10%/sec 下의 인장강도 σ_{B2} : 100°C,

引張速度 10⁴%/sec 下の 引張強度)가 더 重要한 意義가 있다는 것을 發見하였다. 또한 粘彈性(R_d, E', E'')도 溫度의 影響을 考慮하여 常溫과 100°C 에서의 差異를 考慮하여 純反復 試驗으로 우리는 다음과 같은 關係를 얻었다.

$$W = \frac{\mu N \Delta R_d (\Delta E' / \Delta E'') l}{\sigma_{B_2} / \sigma_{B_1} \rho} \quad (10)$$

- W: 磨耗損失 mm³
- N: 荷重
- l: 거리
- P: 밀도

여기서 l, p, N은 우리 試驗結果로 一定하여 計算에서 省略하여도 되며 따라서

$$W = \frac{\mu \Delta R_d (\Delta E' / \Delta E'')}{\sigma_{B_2} / \sigma_{B_1}} \quad (10a)$$

가 된다. 이 關係式에서 計算한 磨耗損失은 다음 表와 같다.

<表 1> Calculated Abrasion Values

Elastomer	μ	ΔR	$\Delta E'$	$\Delta E''$	σ_{B_1}	σ_{B_2}	$W \times W =$	100×100
NR	1.20	14	136	44	238	179	692	100
IR	1.24	17	79	37	215	136	712	103
BR	0.77	15	51	23	123	82	365	53
SBR 1500	1.11	15	230	103	230	137	571	83
EPT	1.04	12	75	39	155	81	421	67
IIR	1.13	40	40	30	155	105	888	128

※ 고무配合表는 別表 1.

A: 천연고무를 100으로 基準한 磨耗損失

上記 關係式은 비교적 무난하거나 혹심한 조건하에서 磨耗손실을 구할 수 있으며 원만한 條件에 대하여는 낮은 溫度와 引張速度가 적용되며, 반면에 특별히 苛酷한 조건 하에서는 그 이상의 溫度나 引張速度가 적용되어야 할 것이다. 上記結果는 우리가 이러한 方面에 처음 발로한 것으로 앞으로는 같은 方式으로 引張強度等 附加的인 必要性을 考慮하여 磨耗와 其他 物理性과 關係를 명확히 할 必要가 있는 것이다.

<別表 1> Compound Recipes

Rubber	NR	IR	BR	SBR	I500	EPT	IIR
	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Stearic acid	3.0	3.0	2.0	1.5	1.0	1.5	
Zinc oxide	3.0	3.0	5.0	5.0	5.0	5.0	
HAF black	—	—	4.8	—	50.0	—	

ISAF black	45.0	45.0	—	48.0	—	60.0	
Antioxidant 4010Ⓞ	1.0	1.0	1.0	1.0	—	—	
Antioxidant PANⓈ	1.5	1.5	1.0	1.0	—	—	
Highly aromatic oil	4.5	4.5	4.0	4.0	15.0	—	
Highly naphthenic oil	—	—	4.0	4.0	10.0	5.0	
Coumaron resin	—	—	2.0	2.0	—	—	
Paraffin wax	0.6	0.6	1.0	1.0	—	—	
Sulfur	2.5	2.5	1.8	1.8	1.5	2.0	
Elastopar	—	—	—	—	—	0.5	
Vulkacit CZⓉ	0.45	1.0	1.3	1.3	—	—	
Vulkacit MⓁ	—	—	—	—	0.5	—	
Vulkacit MT/CⓀ	—	—	—	—	—	1.5	
Vulkacit LDAⓁ	—	—	—	—	—	1.0	
Vulkacit Thiuram MSⓈ	—	—	—	—	1.5	—	
Vulkalant AⓈ	0.8	0.8	—	—	—	—	

Cure.: 30—40 min at 151 c

NR: RSS.#

IR: Natsyn.

BR: Buna Hüls eB

SBR: 150

IIR: Polysar Butyl 301

EP: Unsaturated.

Ⓞ N-phenyl-N'-cyclohexyl-P-phenylenediamine (Byer)

Ⓣ N-cyclohexyl-2-benzothiazole Sulfenamide

Ⓛ Mercapto benzothiazol

Ⓚ Combanation of 2-mercapto-benzothiazol with Tetromethyl Thiuram disulfide

Ⓛ Zinc diethyl dithio carbanate

Ⓢ Tetramethyl thiuram monosulfide

Ⓢ Diphenyl nitrosamine

<別表 2> 주로 Roebg Machine 에 의한 數值임

- I. ① Spring Constant: FK, kg/cm
- ② Dper=100 Drel Dper: percentage Damping. Diel: Relative Damping.

II. 계산에 의한

① 絕對 Young modulus

$$E = |E| = [(E')^2 + (E'')^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$E = FKl_0/q \quad q: \text{라면 cm}^2$$

② Loss factor d:

$$Drel = (\pi \sin \delta) / (\pi/2) + 2$$

$$\sin \delta = 2 \cdot Drel / (\pi(1 - Drel/2))$$

$$d = \tan \delta = \sin \delta (1 - \sin^2 \delta)^{-\frac{1}{2}}$$

③ Dynamic young modulus E' 와 Loss modulus E''

는 $d = E''/E'$ 와 $E[(E')^2 + (E'')^2]^{\frac{1}{2}}$ 로 부터

$$E' = E / (1 + d^2)^{\frac{1}{2}} = E \cdot \cos \delta$$

$$E'' = d \cdot E / (1 + d^2)^{\frac{1}{2}} = E \sin \delta = y \cdot \omega$$

④ Dynamic uiesilience Rd

$$Rd = \exp(-\pi d) - \exp[-\pi(E''/E)']$$

for small D:

$$Rd(\%) = 100(1 - \pi d) \text{ 는}$$

Din 53512에 대한 Refound elactcitiy 와 같다.

筆者: 陸軍技術研究所 고무研究室勤務