

고무와 전기적 성질(I)

허 동 섭

1. 고무와 전기

전기는 찌릿하면서 우리몸에 전기를 통하기 때문에 모두 겁을 낸다. 고무롤을 만드는 기술자는 감전을 가끔 체험하고 있으며 전선 제조 공장 기술자들은 전기적 성질도 비교적 잘 알고 있다. 종래의 고무 저서에서 전기적 성질이라 하면, 절연 저항이라든가, 유전률이라든가, 전선 제조 공장 기술자가 흔히 쓰는 용어나 데이터 기록용일 뿐이고, 일반적인 고무 기술에서는 직접적인 관계가 적다. 또 물성론에서도 쌍극자 능률이론을 적용하여 고무의 極性을 논하는 일은 훌륭하지만, 기체나 액체 분자의 분극이 고무의 경우에도 똑같이 적용하는가라고 질문한다면 고무의 탄성 이론처럼 이론에 약한 고무 기술자는 마땅한 설명을 단번에 할 수가 없는 경우도 있다. 그러나 지금의 세상 문명이 “전기 전자의 세계”라는 요즈음에는 導電性고무, 반도체 고무, 磁性고무, 高周波加黃 등 종래와는 다른 방법으로 기술 혁신이 진행되고 있다. 또 고무의 물성론에서도 전자 결합이나 배치 구조를 전자론적으로 설명하지 않으면 요즈음의 젊은 고무 학도들로부터 거리감을 받는 듯한 분위기가 조성되는 일도 가끔 있다. 금속은 고무와는 반대로 대표적인 전기의 導體인 동시에 열의 도체이기도 하고, 빛의 불투명체이기도

하다. 그런데 고무는 전기나 열의 대표적인 절연체이고, 빛의 투명체라는 사실에서 전기적 성질이 열이나 빛의 성질과 다소의 공통점을 가지기 때문은 아닐까하고 생각하면서 그러한 성질의 상관성을 발견하는 것은 곧 기술에 크게 이바지하는 증거가 된다. 일례로 電着植毛작업은 고무引布제조에서 spreader 작업시의 靜電防止와는 반대로 수만 볼트의 電場을 만들어 短섬유를 ⊕로 하전시켜서 ⊖로 하전시킨 고무풀에 흡인시켜 수직으로 植毛시키는 기술이다. 고무 기술자가 고무를 떠나 처음부터 고급 전기 이론만 읽어도 고무와 전기와의 상관성을 이해하는데는 무리가 있을 것이기에 고무 기술을 중심으로 전기적 성질에 대한 해설에 근거를 두었기에, 고무 물성에 대한 전기적인 사고 방식, 다른 물성과 결부시켜 생각하는 방향으로서 고무의 전기적 성질에 대한 흥미와 현장 기술 응용에의 입문이라 해도 과언이 아니다. 시대적으로 고무 기술자들이 전기에 대한 공부를 열심히 해야 할 때가 온 것이라고 생각하면서, 특히 고무(고분자)의 전기적 성질이 실용적으로도 중요하지만 고분자 물질의 구조를 명확히 파악하는데도 유력한 수단이 된다는 것이다.

1.1 전기에 관한 용어 3가지

전기 용어는 복잡 피기한 것은 아니다. 유전률을 예로 들면

(1) dielectric constant 또는 specific inductive

capacity(SIC) 또는 permittivity를 번역하면 誘電 恒數(率), 透電恒數, 媒電恒數등으로 많은 책에 적혀져 우리 고무 기술자들을 당황하게 한다. 또 恒數라고 생각하면 주파수나 온도에서 수치 변화가 없어야 함에도 대단히 심하게 변화되는 경우가 있다.

(2) 絶緣抵抗(ohm/cm)과 傳導度(mho/cm)는 역 수 관계이다. 각국의 고무 관계 데이터를 보면 歐洲에서는 絶緣抵抗으로, 미국은 傳導度로 발표하는 경우가 많아 습관되지 않으면 서로 오인하기가 쉽다. (절연 저항=1/전도도)

정제된 천연 고무 탄화수소의 경우를 예로 들면,
절연저항... 4.36×10^{16} ohm/cm.

전도도... 2.3×10^{-17} ohm/cm.

이처럼 10의 整數乘倍가 있는 데이터는 왼쪽 수치의 1단위 값(order 단위, 즉 2.3)만으로 비교하는 것이 보통이다. 또 대수로 표현하는 방법도 스마트하다. 10^{16} ohm/cm단위(즉 Mega ohm)로 표시하는 경우도 있다. 고체의 체적 저항이라든가 비저항 등 여러가지 용어도 쓰여지고 있으나 ohm/cm 단위와 累乘數만 주목하면 된다.

表-1. 일반적인 전기적 성질

1. 絶緣耐力
耐電壓
破壞電壓
2. 絶연 저항, 비저항 R(역수 1/R은 傳導率)
體積抵抗
表面抵抗
沿層抵抗
3. 誘電率
4. 誘電正接, 力率, 損失率%
5. 耐 Corona性
6. 耐 Arc性
7. 耐 Track性
8. 磁 性

(3) 力率이란 교류 전기에 있어서의 전압과 전류의 位相差 y의 cos y도 값이 적을수록 절연고무가 요구되는 전기적 성질이라는 정도로 숙지해 두면 좋

다.

전기학은 고무기술과는 달리 계산 그대로 되는 것이기 때문에 sin, cos이 자주 이용되어 고무 기술자에게는 더욱 위압되기도 한다. 그러나 고무기술자는 고무기술자 그대로의 방법으로 전기학을 배웠을 것이므로 태연하게 대비했으면 한다. 따라서 여기에서는 表1에서와 같은 광범위한 전기적 성질을 논할 것이 아니고 위에서 기술한 3가지 성질에 한정하여 고무와의 관계를 중시하고자 한다. 다시 말하면 고무의 전기적 3요소만을 말하는 것이다. 더구나 雙極子能率에 관한 자세한 이론을 고무 용액론과 관련이 많으므로 다음 기회로 미루겠다.

定性的으로 탄화수소만으로 된 고무는 非極性고무이고 질소, 황산기, 할로젠 등을 포함한 고무는 極性고무라고 알고 있어도 다음을 이해하는데 도움이 될 것이다.

2. 고무의 靜電氣 現象

에보나이트 막대기(봉)를 고양이 가죽(猫皮)에 문지르면 정전기가 발생하여 종이조각이 에보나이트 막대에 달라 붙는 예는 흔히 볼수 있다.

고무롤로 고무를 素練하는 중, 放電으로 손끝이 저릿하여 깜짝 놀라는 일은 roll man이면 체험하는 일이다.

Spreader에서 고무를 뽑아 낼 때 duct-knife의 뾰족한 끝에서 불꽃 放電이 일어나면서 蒸氣가 약간 발생되고 이어서 고압 corona 방전의 이온화로 接地된다. 그 외에도 calender, 浸漬作業등에서 정전기로 인한 trouble은 고무 공장에서는 매우 잦다.

특히 고무 공장에서의 火災는 거의가 spreader등에서의 정전기로 인한 발생이라고 한다. 現象의으로는 누구나 다 알고 있지만, 그 물성적 본질이나 수량적 내용은 뜻밖에도 모르고 있는 것이 정전기이다. 정전기는 전기학의 입문으로서 어느 것도 자세히 알수 없는 채로 소멸되 버리는 학문이기도 하다.

2.1. 靜電氣의 性別

고무는 본질적으로 전기를 통하지 않는 절연체이

기 때문에 마찰이나 다른 방법으로 발생된 전기가 다른 곳으로 전도되지 못하고 그 장소에 가만히 머무르게 된다. 즉 정전기로서 帶電 한다. 이때 발생한 전기는 활발한 자유 전자의 출입으로 자유 전자가 流入되어 전자의 수가 증가한 에보나이트봉은 ⊖로 되고 전자수가 감소한 고티아틸은 ⊕로 대전된다.

일반적으로 전기의 절연체와 도체를 마찰시킬 경우 절연체는 전자 활동이 둔하게 되고(속박 전자), 도체는 전자 활동이 활발하게(자유 전자)된다. 이처럼 대전될 때 ⊖와 ⊕성질은 확실히 구별해야 하는데 이것이 인력과 척력(異性相引, 同性反撥)이라는 우주의 원리와 상통하는 것이다.

表2는 상식적인 帶電列로서 왼쪽의 도체가 ⊕로, 오른쪽의 절연체가 ⊖로 대전한다고 생각하길 바란다.

表-2. 帶電列

⊕ 고티아틸-毛布-유리-종이-絹-人體-목재-금속-고무-黃-에보나이트 ⊖

물론 엄밀하게는 위의 설명으로 불완전하고 물질의 상태나 유전 상수나 마찰 조건이 일정하지는 않다. 어쨌든 고무와 관계깊은 황은 대표적인 절연물이고 더구나 고무제품 제조와는 불가분의 관계로서 加黃고무의 전기적 성질에 더 없이 중요한 의미를 가지고 있는 것이다(에보나이트의 高絶緣性)

2.2. 靜電氣의 電位差와 量

전위는 정전기와 같이 고압으로 되기 쉬운 경우는 보통 KV(KiloVolt)단위로 표시한다. 그런데도 전기량은 아주 작아서 $10^{-12}C/cm^2$ (C는 Coulomb, 1A의 전류가 1초간에 흐른 전기량, CGS 電磁 단위의 1/10)로 표시된다. 이 정도의 적은 양이 정전기라는 학문의 성가신 특징이다.

고무 공장에서 발생하는 정전기량의 한 예를 表3에 나타냈다.

(1) 앞에서 설명한 고무의 정전기는 원칙적으로

表-3. 고무工場 靜電氣發生例

作業者(운동화 着用)	靜電位(kV)	靜電氣量 (C/cm ²) × 10 ⁻¹²
(1) 고무운반, 일반 취급시	+0.5	+0.5 ~ +1.0
(2) Roll에서 고무시트를 뽑아낼 때	-30	微量
(3) 고무시트를 적재할 때	-20	微量
(4) 고무/휘발유를 침지 도포할 때	-11 ~ -12	-40 ~ -60

⊖로 하전하지만 마찰이 심하지 않을 때에는(일반적인 취급의 경우) 유전 현상, 기타를 ⊕로 하전 변이를 일으키는 경우도 있을 수 있다. 따라서 이 때의 전위 및 전기량은 적어서 별다른 문제는 발생하지 않는다.

(2) 고무 내림 중의 정전기는 素練할 때가 가장 심하다. 특히 롤에서 고무 sheet를 뽑아낼 때 롤면과 고무면 사이에 일종의 공기 콘텐서가 형성되어 30,000V의 전위차까지도 상승한다. 3만 볼트라고 하면 두려움이 앞서겠지만, 전기량은 $1A \times 10^{-12}$ 단위의 미미한 것이므로 손끝이 찌릿한 감각이 올 정도로 안전한 셈이다.

(3) 고무판을 겹쳐 쌓을 경우는 일종의 콘텐서의 축전 작용을 일으키고 또 하중 압력에 의한 Piezo(壓電氣) 효과도 더해져서 의외로 고전압을 갖게 된다.

(4) 고무는 물론이고 고무/휘발유 용액에서 용매가 비극성 탄화수소 일찌라도 격심한 유동 마찰로 인해 정전기가 발생하기 쉽다. 그러나 액체 성질상 고무면과의 접촉이 완벽하고 전압이 낮은 쪽이면 전기량이 많게 된다는 점을 주의해야 한다.

또 고무만의 friction보다 고무 용액을 spreading할 경우는 고전압보다도 고전기량 쪽이 위험하고 불꽃 放電時의 인화 온도가 높아지기 쉽다. 더우기 고무 리布的의 경우는 基布 자체의 friction에 의한 정전기 발생이 결정타가 된다(특히 化纖의 경우)

2.3. 고무技術과 靜電氣

실제로 고무 제품을 사용할 때 발생하는 靜電現象의 한 예를 들면 타이어 주행시에 정전 단위 ⊖6 KV가 발생한다는 보고도 있고(Dawson, p. 431) 炭鑛用 콘베이어벨트의 마찰 전기로 인한 무서운

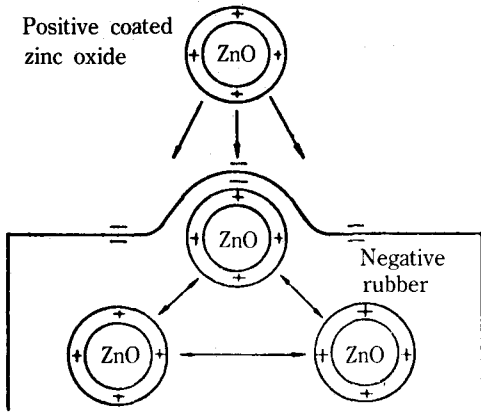


그림 1. 被覆 아연화의 靜電現象

화제의 발생 예도 듣고 있다.

가루 배합제의 分散분제에 대해서도 정전 현상으로 설명하면 흥미있다.

그림1은 산화 아연의 표면을 프로피온산아연으로 coating한 경우 고무와 이종전하의 흡인효과와 산화아연(亞鉛華)끼리의 동종 하전에 의한 반발 효과에 따라 고무와 산화 아연이 양호하게 균등분산된다는 설명이다. “표면 처리 탄산칼슘”의 分散효과로도 實証된다. 또 실리카계 보강제의 활성제로서 DEG나 트리에탄올 아민이나 지방산 아연을 사용하면 分散이 효과적임을 靜電現象으로 살펴보자.

실리카계는 굴절률도 낮고 열적 전도성도 나쁘기 때문에 전기적으로도 불량도체라는 생각이 먼저 들 것이다.

그러므로 고무와 실리카만의 접촉 전위차가 적고 정전기의 발생은 그렇게 기대할 수 없다. 이때 전위차를 높이는 방법으로 실리카에 극성 물질을 조금 첨가하면 전기적 흡인력이 충분히 발휘되어 고무와 실리카가 한층 더 강한 결합으로 된다. Carbon black (C. B)은 어느 정도의 전기 전도성을 갖고 있으므로 원칙적으로 극성 활성제를 필요로 하지 않는다. C. B의 입자 표면은 일종의 극성 물질로 표면 피복되어 있는 것(특히 channel black의 경우)임을 잊어서는 안된다.

이러한 뜻에서 보강제에 관한 연구도 종래와 같이 입장강도를 증가시키는 結果論만 연구할 것이 아니

라 靜電 성질의 거동을 추구하는 이론 방법으로 연구하는 것이 바람직하다.

2.4. 고무의 靜電理論

고체와 고체의 표면 마찰보다 고체와 액체와의 마찰이 帶電되기 쉽다고 했는데 이 문제는 물성론의 입장에서 중요한 의미를 갖기 때문에 좀 더 생각해 보자.

액체는 고체와 달라 유동성이므로 접촉하는 고체의 표면 요철의 形狀에 아주 잘 밀착하는 성질이 있다. 또 액체가 濕潤性일 때에는 액체와 고체간의 접촉이 극히 밀착되고 또 대전량도 방전이 적어지게 되므로 다량의 전기량이 蓄電된다.

고무는 고체 상태이지만 본질적으로는 액체적 성질을 갖고 있는 것이다. 알기 쉽게 타이어를 예로 들어 설명하면 타이어 주행시 고무의 탄성으로 인하여 地面과의 접촉 긴밀성은 곧 다량의 정전기 발생을 의미한다. 그러나 실제로는 다량의 보강성 카본 블랙이 첨가되므로서 절연성이 저하(電導性的 증가)되어 발생 정전기의 접지 방출이 일어난다.

고무의 마찰 帶電流에 관한 고전적 문헌으로는 Richards(*Phys. Rev.*, 22, 122, 1923)의 발표문 정도이다. 넓은 의미에서 접촉 마찰대전이라고 하면 콜로이드 용액중의 분산 매체와 분산질의 대전에 관한 Coehn의 법칙에 의하면 「유전률이 큰 물질과 작은 물질이 접촉할 경우에는 유전률이 큰 쪽이 ⊕에, 작은 쪽이 ⊖로 대전한다」고 하였으며, 라텍스와 같은 경우는 물의 유전률이 80이고 고무의 유전률이 2.8로서 큰 차이가 나므로 큰 문제없이 물이 ⊕로, 고무가 ⊖로 하전된다. 따라서 電解하면 고무는 ⊕극으로 移行한다.

그러나 Richards등의 고무 정전기 실험에 의하면 Coehn의 법칙에 따르지 않고 상대 물질에 무관하게 항상 ⊕로 대전되고 또 마찰 압력의 증가와 함께 전하가 증가하며 포화치에 달한다. 즉 고무의 대전 현상은 접촉 전위차에 따르는 것이 아니고 고무의 壓電氣(Piezo-electrification)에 의한 것으로 고무 분자의 결정 구조에 관계한다는 흥미깊은 발표가 있다. 현재의 고무분자 물성론으로 보면 완전한 이론이지만 당시는 Richards의 이론에 반론이 많

았다. 즉 고무 중의 수분이 주는 영향은 어떤가? 마찰 방법이 일정한가? 측정 방법은 옳은가? 등 심한 반론이 있는 그 후는 고무의 정전기에 관한 연구보고가 적어져 내렸던 것은 유감스러운 일이라고 金子美男氏는 말하고 있다.

2.5. 고무 Micro-phone

壓電氣現象이라는 이야기에 대해 고무 microphone을 생각하자. 고무판에 音波가 닿으면 압전기에 의해 생기는 진동 전압을 常法으로 증폭시키면 된다. 고감도로 할려면 고무 라텍스를 고전압으로 凝固시키거나 전압을 가한 채로 加黃하면 된다. 요컨대 고무의 결정 구조가 방향성을 가지면 압전기를 충실하게 발생시키는데 바람직한 것이다.

그 원리는 음파에 의한 발생전위차를 神經 전류의 刺激으로 대신하는 우리들의 聽覺 mechanism과 매우 비슷한 것이다(그림 2).

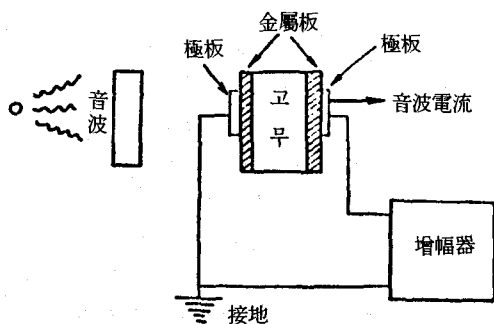


그림 2. 壓電氣를 利用한 고무製 마이크로폰의 原理

2.6. 靜電氣와 기계적 성질의 相似性

고무는 마찰이나 압력뿐만 아니라 伸張時에도 대전된다. 이 사실은 金屬箔檢電器나 네온 점전기에서 용이하게 검출되므로 실험해 보아도 좋다.

이론적으로 곤란(까다로운)하기 때문에 생략하지만 신장에 의한 전기 저항의 증가(도전성 고무에서 설명), 결정화에 의한 압전기의 유발 등에도 관계가 있다.

일반적으로 stress가 작은 경우의 대전량은 Hook의 법칙과 같이 stress에 정비례하지만 st-

ress가 클수록 완만하게 증가하여 포화 대전량에 達하기 때문이다. 또 고무의 伸張 방향성에 대해서도 calender 列理나 빛의 複屈折率에서 볼 수 있듯이 하전량이 異方性도 볼 수 있다.

다음으로 고무를 靜電場에 놓고 외부로부터 고전압을 가할 경우에는 어떻게 볼까? 이 현상에 대해서는 強電場에 있어서의 고무의 비중이 증가된다는 것으로 일축할 수 있지만 전력선의 방향으로 고무는 수축되어 용적 변화를 일으키기 때문에 전기 비축(electrostriction)현상이라고 한다.

요컨대 전기란 고무 이상으로 불가사의하게 나타나는 성질로서 조금만 공부하면 우리가 잘 알고 있는 기계적 성질에 얼마나 유사한 것인가를 납득하게 된다고 생각한다. 고무의 粘彈性論에서 spring과 piston을 사용한 직렬형(Maxwell model)과 병렬형(Voigt model)의 모델을 생각하면 spring을 정전용량, piston을 저항이라고 한다면 立派한 전기 회로가 된다. 어느 학자는 전기적 성질과 역학적 諸量과의 대응성을 表 4로 발표하고 있다.

表-4. 電氣的 諸量과 力學的 諸量의 對應性

電氣的 量	力學的 量
電 荷 q	變 形(位) γ
電 壓 V	力 S
容量의逆數 1/C	彈 性 率 E, G
抵 抗 R	粘 性 係 數 η
Inductance L	質 量 m
電 流 $I = dq/dt$	速 度 $i = d\gamma/dt$
靜電容量式 $C = q/V$	Hook 法則 $\gamma = S/E$
Ohm 法則 $V = IR$	Newton 粘性法則 $S = \eta(dr/dT)$
誘電體余効	彈 性 余 効

정말로 훌륭한 相似性은 없는가? 독자는 고무의 역학적 양에 대해서는 어느 정도의 지식을 갖고 있을 것이므로 兩者의 비교로 어렵다고 생각했을 전기적 성질에 관해서의 敬遠心이 조금씩 없어졌다고 생각한다. 그러므로 본론이라고도 할 수 있는 고무기술상의 전기의 실용적 성질에 관해 살펴 보기로 한다.

3. 원료 고무의 전기적 성질

앞에서 말한 3가지 요소(전기 저항, 유전률, 역률)에 대해 각종 천연고무 및 합성고무의 데이터(表 5~6)를 참조하여 그 개념을 먼저 파악해 보자. 천연고무는 탄화수소로 된 대표적인 비극성 고무로서 저항은 $\times 10^{15}$ 으로 굉장한 전기 절연물이다. 극성 불순물을 제거하면 $\times 10^4$ 이 증가한다. 반대로 all latex의 spreader 고무나 산화 고무와 같이 불순물이 증가하면 저항은 조금씩 감소한다.

유전률은 전기 저항과는 달라서 고무 기술자에게는 그렇게 실감나지 않는 용어다. 절연성이 클(저항치가 큰)수록 정전기는 크게 발생하며 결합력도 증대한다. 즉 Coulomb의 법칙에 의하면,

$$F \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$F = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

의 식에서 ϵ 이 유전율이다. 여기서 유전율은 진공 상태에서 이상적 정전 발생량을 1로 했을 때의 비례값을 뜻한다. 고무는 $\epsilon=2$ 이고, 물은 $\epsilon=80$ 이므로 고무가 물보다 帶電하기 쉽다. 그러므로 유전체 성질이 우수하다고 할 수 있다. 誘導와 導電은 반대이다. 즉 절연저항이 큰 고무는 그 값이 클수록 유전률이 작아진다는 것은 表5 및 表6에서도 알 수 있다.

여기서 유전률 값은 저항값과는 달리 큰 변화를 나타내지 않는 이유는 유전률값 그 자체가 작은데다 보통 수분을 함유한 공기 중에서 측정하기 때문에 정확을 기하지 않으면 안된다. 그러므로 연구 보고의 경우에는 50 사이클, 20°C, 75%RH라는 동일 조건에서의 비교 데이터가 아니면 무의미한 것이 된다.

역률은 알기 쉽게 말하면 교류 전기에서 전압과 전류의 변화에 전될 수 있는 성질이다. 고무로 말하면 늘어나기도 하고, 줄어들기도 하는 경우, 반복되는 변형으로 인하여 발생하는 발열 현상과 비슷한 것이다. 주파수가 증가하면 고무가 가황이 진

表-5. 各種 天然고무의 電氣의 性質(Dawson, p. 55)

種 類	抵抗 $\times 10^{15}$	誘電率	力率(1kc)%
S.S.(老化 3個月)	0.3	2.53	0.19
〃 (老化15 〃)	1.0	2.38	0.16
〃 (老化12 〃) 水洗, 乾燥)	6.0	2.35	0.29
Crepe	5.0	2.43	0.16
〃 [水洗, 乾燥)	4.0	2.36	0.29
Latex spreader 고무	1.0	2.56	0.28
Pale 고무	3.5	2.43	0.14
脫탄백질, 脫脂고무	41.7	2.37	0.02
精製天然고무炭化水素	43.6	2.37	1.6

表-6. 合成고무의 電氣의 性質
(佐竹, 建林: 合成ゴム p. 295, 測定條件同一)

種 類	抵 抗	誘電率	力率%
SBR	$10^{14} \sim 10^{15}$	2.4~2.5	0.1~0.3
NBR	10^{10}	8~12	5~6
CR	$10^9 \sim 10^{12}$	7.5~8.2	3
Thiokol	10^{15}	4.0~4.5	0.5~1.0
IIR	$> 10^{15}$	2.11	0.04
Silicone 고무	10^{11}	3~4	0.04~0.06
Polyisoprene	$> 10^{15}$	2.3	0.04
(參考) 可塑化 PVC	$10^{12} \sim 10^{13}$	3~6	1~10

행될수록 발열이 심하고 저항이 감소하는 것도 이와 비슷하다. 그러므로 천연고무의 역률은 영구 늘음율이 적을 수록 바람직한 성질이 얻어진다.

합성고무의 3요소는 천연고무와는 달라 매우 복잡한 변화치를 나타낸다, SBR, IIR이나 폴리이소부틸렌 같은 비극성 고무는 천연고무와 아주 닮은 양호한 전기적 성질을 갖고 있다. 특히 불포화도가 적은 고무일수록 전자의 활동이 적어 절연성도 우수하게 된다. 그러므로 NBR, CR와 같은 강한 극성기를 갖는 극성 고무는 저항이 10^{10} order로 낮고, 유전률이나 역률은 값이 상승한다.

합성고무도 천연고무와 같이 제조방법에 따라 어느 정도 전기적 성질의 개선도 가능하다. 예를 들면 전선에 많이 사용하는 SBR 1006이나 1007

은 灰分, 水分을 적게 한 것이다. 또 결합 스티렌의 增量으로 절연성이나 역률을 개량하는 방법도 가능하지만 그러나 열가소성인 폴리스티렌(결합스틸렌)의 증가로 내열성이 저하되기 때문에 SBR의 전기적 실용성에는 한계가 있는 것이다.

3.1. 전기적 3요소의 온도 변화

고무의 성질이 온도에 따라 변화되는 것과 같이 전기적 성질에서도 예외는 아니다. 유명한 Roelig의 文獻(日本 고무協誌, 13, 953, 1940)을 보면 저항치는 그림 3에서 처럼 $NR < BunaSS < BunaS < NBR$ 의 순으로 현격하게 증가한다. 특히 스티렌이 많은 Buna SS가 Buna S보다 하강 정도가 급격한 것도 볼수 있다. 또 천연 고무가 합성 고무보다 온도 변화에 따른 저항치의 변화가 적다는 것은 다른 물질, 예를 들면 온도 변화에 따른 인장 강도의 변화율도 비교적 적다는 사실과 일치하고 있다.

온도 변화에 따른 유연율의 변화는 가황고무(결합황 2%)의 경우 表 7에서와 같이 변화가 거의 없다. 그러나 잘 주의해 보면 屈折率에서와 같이 고온으로 될수록 조금씩 감소하는 경향을 나타내지만 비극성 물질의 $\epsilon = n^2$ 인관계식을 생각한다면 정말로 전기적 성질 특히 절연 저항에 있어서 이것 또한 10의 몇승을 달리할 정도로 크게 변화한다.

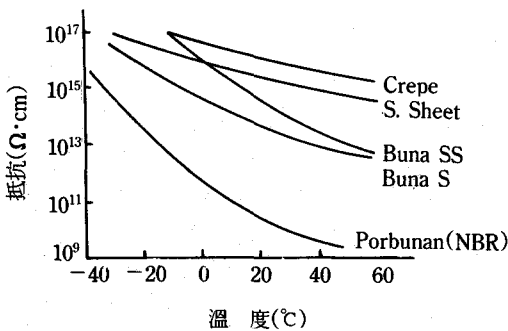


그림. 3. 各種 生고무의 抵抗溫度特性(Roelig)

Dunsheath의 옛 문헌에 의하면(Trans. Inst. Rubber Ind., 2, 460, 1927), 저항의 온도 변화에 대하여 다음의 관계식이 제안되고 있다.

$$R_t = R_0 e^{-\alpha t}$$

단 R_0 ... 0°C 때 걸리는 저항치

R_t ... $t^\circ\text{C}$ 때 걸리는 저항치

가황 천연 고무의 유전률 온도 변화, 60cycle 때,

α ...온도 계수

e ...자연 對數 의 밑수.

역률은 유전률과 달라 꽤 눈에 띄는 변화를 하기 때문에 조심하여야 한다(表 8). 그러면 어째서 고무의 저항이나 역률은 온도에 따라 큰 변화를 나타내는데 비해 유전률만은 거의 변화하지 않는 이유를 물성적으로 고찰해 보자.

表-8. 加黃天然고무의 力率의 溫度變化 (Dawson, p. 421, 60cycle, 結合S 2%)

溫度($^\circ\text{C}$)	30	50	75	100
力率(%)	0.272	0.3702	0.612	1.03

고무와 같은 비극성 물질을 전장에 놓으면 고무 분자내의 \oplus 는 전장 방향으로, \ominus 는 그 반대 방향으로 이동하여 분극(polarisation)되는 현상을 일으킨다. 그 결과로 처음에는 비극성이던 고무가 전장 아래에서는 어느 정도의 극성 고무로 변하고, 그 극성의 강도를 나타내는 μ (쌍극자 능률)은 다음식과 같이 외부로부터 가해지는 전장의 강도 E 에 비례한다.

$$\mu = \alpha E$$

단 α : 분극률(polarisability).

表-7 加黃천연고무의 誘電率 溫度變化 (Dawson, p. 416, 60 cycle 때)

溫度($^\circ\text{C}$)	-75	-40	-20	0	25	45	65	85	105	125	168	195
ϵ	2.45	2.53	2.79	2.74	2.67	2.62	-	2.58	2.56	2.52	2.45	2.40

또 고무분자 전체에 걸리는 분극률을 분자분극 (molecular polarisation) P로 표현하면 다음의 Clausius-Mosotti의 식이 성립한다.

$$P = \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \cdot \frac{M}{d} = \frac{4\pi}{3} N\alpha$$

여기에서 N : 아보가드로 수로서 $6.023 \times 10^{23}/\text{mole}$ 이다.

위 식에서 왼쪽의 ϵ 대신 n^2 를 사용하면 앞에서 설명한 Lorentz-Lorenz식의 파장 무한대(주파수 0)의 굴절률에 의한 분자 굴절이 되고, 온도에 무관한 광학적 분자 용적과 동일한 결과가 된다. 또 오른쪽에서도 온도를 표시하는 항은 없다. 결국 비극성 고무의 분극, 따라서 ϵ 도 온도에 무관하다는 결론에 달하는 것이다.

다음에는 극성 고무의 경우를 생각해 보자. 전장 내에서 고무 분자의 전하 이동으로 분극 현상이 일어나고 원래 가지고 있는 분자의 쌍극도 합세하여 전장의 방향으로 나란히 열거되기 때문에 분극률이 더욱 커진다. 그런데 외부로부터 열이 가해질 경우 새로 생긴 분극은 변화를 받지 않지만 原來의 고유 쌍극자는 분자 교란적 열운동으로 방해되므로 분극 배향이 용이하지 않게 된다. 결국 극성 고무의 분자 분극은 온도의 영향을 많이 받는다는 결과가 된다. 이 때, 분자 분극 P'은 다음식과 같이 복잡하게 되고 왼쪽에 온도의 항이 들어가게 된다.

$$P' = \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \cdot \frac{M}{d} = b + \frac{a}{T}$$

단, $a = 4\pi/3 \cdot N \cdot \mu^2/3K$

$b = 4\pi/3 \cdot Na$

즉, 극성 고무의 유전률에 따라 변화하고 $\epsilon \neq n^2$ 로 되어 버린다. 알기 쉽게 분극의 종류는

비극성 고무는 $P_A + P_E$

극성 고무는 $P_A + P_E + P_0$ 이다.

여기에서 P_A = 원자 분극; 극히 작다($P_E/10$)

P_E = 전자 분극; 안정하다.

P_0 = 배위 분극; 변화한다.

극성론을 알기쉽게 이야기해 보자.

비극성 고무라는 것은 세상 물정을 모르는 純情心으로 전장이라는 이름의 유무에 대해서 솔직하게 행동하지만 극성 고무라는 것은 처음부터 조금 심술궂어서 전장에 있어서도 솔직한 이상으로 마음껏 행동(配位)한다. 고무의 절연 저항이란 일종의 粘度계수나 역률이라는 늘음율과 같은 성질도, 비극성 고무의 경우에서도 온도에 따라 변화하는 것은 당연하다. 극성 고무라는 것은 선천적인 완고한 고집으로 솔직하지 않고 까다로운 망나니이지만 근본은 정직하므로 주파수나 온도에 편승하여 크게 작용한다.

극성 고무의 온도 변화를 나타낸 테이타로서는 적당한 것이 주위에서 쉽게 찾아지지 않지만 애써 찾으면 PVC의 경우(그림 4)와 같다. 좁은 온도 범위에서도 변화가 격심하여 온도 변화에 따른 유전률의 변화는 주목된다. CR이나 NBR도 이와 비슷하게 온도 변화에 따라 유전률이 현저하게 변화하는 온도에 민감한 고무다.

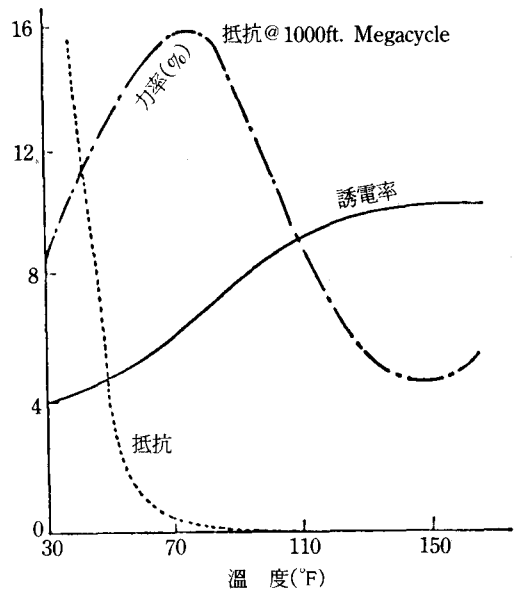


그림 4 極性 PVC의 電氣的性質의 溫度變化

(McPherson : Engineering Use of Rubber, p. 258)

3.2. 주파수의 영향

온도에 따른 영향 외에 교류 주파수에도 큰 변화를 나타낸다.

즉,

- (1) 저항은 고주파로 되면 감소한다.
- (2) 유전률도 주파수가 증가하면 감소한다.
- (3) 역률은 주파수가 증가하면 증가하고 전이현상을 나타낸다.

특히 중요한 것은 천연고무는 저주파에서 역률이 적지만 고주파로 되면 역률이 절정으로 되며 발열이 시작되고 고온시의 절연 저하 때문에 고주파용 전기 재료로서는 부적당하다는 것은 여러분도 이미 알고 있는 것이다.

고주파가황법은 이 발열을 역이용한 것으로 전극 사이에 고무를 넣고 보통 10~30 메가사이클의 전압을 걸어 고무 中の 유전체 손(역률의 증가)에 의하여 고무의 중심부에서 부터 발열 가황이 되는 것으로 두꺼운 고무제품이나 布를 넣은 얇은 고무제품의 가황에 알맞다. 이 때 사용되는 고무 배합물이 역률주파수에 의한 변화가 클수록 단시간에 가황된다.

表-9. Guttapercha의 電氣的性質(Stern : Rubber, Natural and Synthetic, p. 96)

種 類	誘電率	力 率	周波數
精 劑 GP	2.6	0.23	1,000
精 劑 Balata	2.6	0.10	2,000
Bala gutta*	2.6	0.10	2,000
K-gutta*	3.3	1.59	2,000

*注 : Bala gutta ; 정제GP(50%) + 脫단백질고무(40%) + Wax(10%)

K-gutta ; 정제 Balata + 脫단백질고무 + petrolactam

3.3. Guttapercha의 전기적 성질

Guttapercha(GP)와 Balata는 고무보다 오래전인 1848년 경부터 사용되어, 1850년에는 영불해협에 걸쳐 cable에 사용되었다. GP는 가황하지 않으므로 비극성도 강하고, 또 천연 고무의 단백질은 망상 조직으로 되어 있으나 GP등은 수지인 동시에 분리하기 쉬운 결정상태로 존재하기 때문에 흡수량도 적으므로 해저용 전선으로서 특히 주파수가 높은 전선(1,000C), 전화(2,000C)용으로 상용되어 왔다.

표 9는 대표적인 전기적 성질을 나타낸 것인데 천연 고무와 비교하면 역률이 약간 낮은 값을 나타내는 것이 장점이라 해도 지나치지 않으나 해저 온도(4~10°C)에서 결정 안정화되는 GP의 물성을 잊어서는 안된다.

지금 GP나 Balata는 케이블 용으로는 다른 어떤 합성 고무보다 좋다고 말하는 이유는 cis형과 trans형의 전기적 비교라는 흥미있는 물성 문제로 주의를 기울여야 하기 때문이다. 즉 극성적 전기능률만을 생각하면 cis형보다 안정한 trans형이 $\mu=0$ 가깝기 때문이다. 따라서 GP가 일반 고무보다 전기적으로는 우수한 것이다. 이것을 수치적으로 표시한 구체적인 데이터는 발견할 수 없었다.

일례로 Dawson의 책(p. 430)에서, GP와 para 고무를 마찰시켰을 때 GP는 \ominus 로, para는 \oplus 로 하전되었다는 실례를 볼수 있다. 이염화에틸렌의 cis 및 trans 비교는 예로서는 적당하지 않으나 참고로 적어둔다.

