고무의 加黃 및 熱傳導論(其二)

李仁圭* 許東燮**

3장 基礎 熱傳導論 및 그 計算

고무 技術者 들이 간혹 전열에 關한 問題에 부딧쳐 보면 책마다 相當한 數學知識을 Master 해야만 理解할 程度의 複雜하고 골치 아픈 方程式을 써 놓고 있다. 이런 경우에 取할 보편적이거나 賢明한 方法 이라면 그 問題를 풀려고 하지 않고, 獨特하게 整理된 經驗法則이나 早見表 等을 直接 理解하거나, 진지한 思考는 아니라 할지라도 活用해보는 일일 것이다. 이 Chapter 에서는 Rubber Journal[35]에 기재 된 바에는 傳熱計算과 참고 도표에 關한 기초적인 說明을 하고 이들이 고무工業에 어떻게 應用 되는 가에 關하여 說明 하고자 한다. 이 內容이 勿論 이 分野의 精髓라 하는 것은 아니고 다만 傳熱 理論과 그 問題點에 關한 數많은 文獻 및 條項들을 抽出하고 또 그 自身이 실제로 밝혀낸 內容으로 되어 있을 뿐이다. 이 內容들은 다른 Chapter의 內容과 連結하여 使用 한다면 平均 水準의 고무 技術者라면' 전열의 기초 원리와 가황 特性을 理解하고 각계 分野에 알맞게 應用 하므로서 좋은 利得을 가져 오게 할 수 있을 것으로 믿는다. 아래는 이 Chapter에서 使用될 記號, 意味 및 Dimension을 모았다(H=熱單位 L=길이, M=질량, t=시간, T=溫度) 標準 命名과 相反되는 몇 가지가 있기는 하나 混同되기 쉬운 Greek 記號보다 頭文字를 따서 쓰는 것이 나은 것으로 理解 된다.

A=面積(L^2)

$B_n=\cot B=mB$; B_1, B_2 等의 解

1次, 2次等 方程式의 根(Dimensionless)

C=比熱($H \cdot M^{-1} \cdot T^{-1}$)

D=熱擴散(L^2, t^{-1})

h=傳熱 係數($H \cdot L^{-2} \cdot t^{-1} \cdot T^{-1}$)

k=熱 傳導度($H \cdot L^{-1}, t^{-2}T^{-1}$)

l=Slab의 半 厚度(L)

L=Slab의 厚度$=2l$; 보통距離(L)

M=數理의 변환수=2, 3, 4등(Dimensionless)

m=抵抗比$=k/hl$ 또는 $2k/hL$(Dimensionless)

N=Nusselt Number$=hl/k$ 또는 l/m(Dimensionless)

N_s=數理의 表面 변환수(Dimensionless)

n=距離比 r/l 또는 x/L(Dimensionless)

Q=熱量(H)

r=球心 또는 Cylinder軸 으로 부터의 距離(L)

R=球 또는 Cylinder의 둘레

T=溫度(총괄 적인 것)즉 物件의 中心 또는 中央 位置의 溫度(T)

T_s=주위 溫度(加熱媒)(T)

T_s'=표면 온도(h가 不定 일때는$=T_s$)(T)

T_0=最初 또는 기초 온도(T)

T_x=表面에서 어느 거리 x인 點의 溫度(T)

T_c=加黃의 溫度 係數(Dimensionless)

t=時間(t)

x=거리(총괄적인 뜻)

X=Fourier變數, Dt/L^2 또는 Dt/l^2(Dimensionless)

Y=進行中의 溫度 變化$(T_s-T)/(T_s-T_0)$(Dimensionless)

Rubber는 熱의 不良導體이므로 結果的으로 加黃時는 厚度에 正比例 하지 않고 실제로 厚度의 거의 自乘에 比例 하고 있다. 이 章에서는 두께로 因하여 均一

* 朝一工業株式會社
** 國立工業標準試驗所 有機化學試驗科

하게 加熱 되지 않는 고무 製品의 熱 傳導 問題에 關한 理論的 檢討에 重點을 두었고 이 검토는 一般的으로 外部 熱源에 結付되며 誘電 加熱 같은 方法도 適用 되지 않는다.

理 論

고체의 加熱과 冷却은 그 物體內의 어떤 點의 溫度는 時間과 位置에 따라 變하기 때문에 非 定常 狀態 Unsteady State 熱 傳導 라고 알려져 있다. 加熱 하는 途中 化學 反應이 일어 나는 경우 例를 들면 고무 加黃에 있어서 열전도는 반응 속도가 근소한 온도 變化에도 비교적 급속히 상승 하기 때문에 특히 重要 하다 이와 관련된 기초적 理解는 出發點으로서 단순한 傳導로 부터 可能 하다. Steady Conduction의 Fourier法則을 보면 다음과 같다.

$$\frac{dA}{dt}=-kA\frac{dT}{dL} \qquad (1)$$

여기서 dA/dt : 時間에 따른 熱의 移動 速度

A : 熱이 移動하는 方向에 對한 수직 面積

dT/dL : 移動 方向의 距離에 따른 溫度 變化 速度, 負記號는 熱 移動이 溫度 變化率에 反對 方向임을 表示

이 微分 方程式에 쓰여진 記號는 앞에 列記 되어 있고, 또 一般式 이므로 單位는 주어 지지 않고 있다. k는 열 傳導度로 그 物體의 材質에 따라 다르다. 만일 例를 들어 두께가 L인 板狀 物體를 가정 하고 한쪽 面의 溫度를 T_2라 하고 다른 쪽 온도 T_1 보다 높다고 가정하면 이 板狀 物體를 通하여 移動한 熱量은 다음과 같이 될 것이다.

$$Q=\frac{kA(T_2-T_1)}{L} \qquad (2)$$

非 定常 狀態 傳熱의 경우를 보면 기초 적인 Fourier 式은 部分的인 微分으로 된다.

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{k\partial^2 T}{c\rho\partial L^2} \qquad (3)$$

$k/c\rho$는 材料의 熱 擴散이 여기서는 記號 D로 表示한다. c와 ρ는 一般的인 意味로 비열과 밀도를 각각 意味한다. 式 (3)은 溫度 變化 速度는 熱 擴散의積과 같고 거리에 따른 溫度 變化 句配의 變化 속도와 같음을 뜻한다. 換言하면 k는 物體를 通하여 熱이 移動하는 速度이고 D는 物體를 通하여 溫度가 變化하는 速度이다. 代表的인 값은 다음과 같다.

c=BThU/lb·°F or cal/gr°C

k=BThU/ft·hr·°F or cal/cm·sec·°C

ρ=Lb/ft³ or gr/cm³

D=ft²/hr or cm²/sec

그래서 D는 溫度 단위와는 無關하나 실제 溫度에 꼭 獨立的인 것은 아니다. 理論的으로 그 값은 k, c및 ρ로 부터 計算 될수 있지만 이들은 溫度에 依存 하고 있고 正確히 決定하기 어려우며 몇 가지는 直接 測定 하는 편이 나을 때도 있다. 고무의 경우 상당히 일찍 부터 溫度에 따른 열 확산의 변화를 시험 하려는 企圖[1,2]가 溫度 上昇에 따라 어떤 配合物의 값이 증대하는 것으로 보고 이루어 졌다. 그러나 잘못된 가설이 계산결과를 無用化 시키고 말았다. 그 뒤에는 단순한 非定常 傳導 方法을 利用하여 [3]에서도 실온에서 135°C(280°F)에 이르는 溫度 범위에 걸쳐서 D의 값이 별로 變化하지 않음을 알게 되었다. D와 k는 이와 같은 方法으로 모두 測定되어 왔지만 近代에 와서는[4,5] D값은 溫度 上昇에 따라 감소 한다고 보고 되었었다. 이 事實은 Rubber의 比熱이 溫度 上昇과 더불어 相當히 增加하는 事實에 歸納된다. 大部分의 計算에서, 平均値가 정상적인 가황 온도 범위에서 一般的으로 使用되고 있다. 이는 어떤 變化가 計算에 使用된 樣態의 精密度에 比較하여 적기 때문에 可能한 것이다. gas, 금속, 植物性, 材料, 斷熱材 및 鑛物等의 광범위한 資料를 보면 고무 처럼 D의 값이 낮은 것이 없는데 이는 위에 열거한 材料로 만든 유사한 物件보다 均一한 溫度에 까지 加熱하는데 더욱 긴 時間이 소요됨을 意味하는 것이다. 이런 일들은 고무를 加熱 하려 할때는 신중하지 않으면 안된다는 것을 反證하는 것이라 하겠다. 이런 D의 代表的인 단위(length²/time)는 ft²·hr⁻¹, in²·min⁻¹ 또는 cm²·sec⁻¹이고 이들 단위는 다음과 같은 方法으로 換算할 수 있다.

$1\ ft^2\cdot hr^{-1}\times 2.4=2.4 in^2\cdot min^{-1}\times 0.1075=0.262 cm^2\cdot sec^{-1}$

文獻 上에 나온 平均 値를 위 단위로 表示해 보면

Natural Rubber Gum Stock

$0.00075 cm^2.sec^{-1}=0.0075 in^2.min^{-1}=0.003 ft^2.hr^{-1}$

Tread Stock		
0.001	0.01	0.004
高充塡 Stock		
0.0075	0.015	0.006

와 같이 되어 있다. 이 값들은 Polymer에 따라 달라지나 D는 항상 充塡해 줄 수록 높아 진다. 여기서 高充塡配合物이 純 고무 보다 一定한 溫度까지 加熱 하는데 2倍 또는 그 이상 빠르다고 하는 點을 알수 있는데 이는 뒤에 나오지만 어느 物質의 잠복 時間은 D에 역비례 하기 때문이다. 加熱된 物體 內에서의 溫度變化에 인한 知識은 主로 ① 분석적인 방법 ② 圖表에 依한 方法 ③ 數表에 依한 方法 및 ④實測에 의한 方法의 4가지 方法으로 얻을 수 있는데 처음의 3가지 方法을 고찰해 보기로 한다.

正確한 풀이

Fourier의 部分式 (3)을 풀면 2가지의 分明한 條件을 定할 수 있는 해답을 얻게 될 것이다. 처음 어떤 Slab를 그 양면에서 가열 한다면 加熱媒의 온도까지 漸次的으로 溫度가 上昇할 것이다. 그 다음은 表面에 熱傳達이 느리고 그래서 表面 溫度는 加熱 Cycle에서 上昇하게 됨을 알게 될 것이다.

表面 抵抗의 無視

처음의 경우는 열 전달에 對한 表面저항은 실제로 없고 均質의 Slab에서의 溫度 분포는 쉽게 이루어 질 수 있다.

$$\frac{T_s-T_x}{T_s-T_0}=\frac{4}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\sin[(2n-1)\pi x/2l]e^{(2n-1)^2\pi^2Dt/4l^2}}{2n-1} \qquad (4)$$

여기서

T_x= 평면의 온도(Slab 表面에서의 거리 x인)

T_s=加熱 媒의 Slab 表面의 溫度

T_0=Slab의 最初 溫度

l= Slab 두께의 半$=\frac{1}{2}L$

D=Slab 構成 재료의 熱 擴散

t=加熱 時間

이 式은 다음과 같이 變形 될 수 있는데 $\frac{T_s-T_x}{T_s-T_0}=$

$$\frac{4}{\pi}\left[\sin\frac{\pi x}{L}\cdot e^{-\pi^2 x}+\frac{1}{3}\cdot\sin\frac{3\pi x}{L}\cdot e^{-9\pi^2 x}+\frac{1}{5}\cdot\sin\frac{5\pi x}{L}\cdot e^{-25\pi^2 x}\cdots\cdots\right] \qquad (5)$$

여기서 $X=Dt/L^2$(또는 $Dt/4l^2$)으로 하여 方程式을 簡單히 하였다. 一般的으로 이 式에 다른 項은 加熱 Cycle($Dt/L^2\geq 0.06-0.08$)에서, 短 時間 후에는 無視할 수 있게 된다. 豫想 되는 가장 단순한 경우라면 어떤 길이와 폭의 Slab양면에서 加熱 하는 것이라 할 수 있는데 이때 T_x의 최저치는 중앙面이고 $x=l$로 될 것이다. 그러면 中央部 溫度는 다음과 같이 주어지게 된다.

$$\frac{T_s-T}{T_s-T_0}=\frac{4}{\pi}\left[e^{-\pi^2 x}-\frac{1}{3}e^{-9\pi^2 x}+\frac{1}{5}e^{-25\pi^2 x}-\frac{1}{7}e^{-49\pi^2 x}\cdots\cdots\right] \qquad (6)$$

여기서의 T는 Slab의 中央 面의 溫度이다. 左邊의 값(時間이 0 일때의)열 평형에서 0으로 저하되고 이 比는 使用된 溫度 단위에 영향을 받지 않는다. 어떤 일정한 Slab의 경우 式 (6)은 아래와 같이 된다.

$$\frac{T_s-T}{T_s-T_0}=f(X)=Y \qquad (7)$$

이때 $X=Dt/l^2$, $f(X)$은 式 (6)의 우변의 함수이다. Newman[6]은 Dimension이 a, b 및 c인 六面體의 中央部 온도를 각 방향의 Y値를 곱하여 計算 할 수 있다고 설명할 수 있다. 위 式의 第1項은(여기서 T는 이 Block의 幾何學的 中心의 溫度를 表示한다)다음 式과 같이 된다.

$$\frac{T_s-T}{T_s-T_0}=\frac{64}{\pi^3}\cdot e^{-\pi^2 Dt}(a^{-2}+b^{-2}+c^{-2}) \qquad (8)$$

이 式은 보통의 型作業에 活用할 수 있고 위와같은 하나의 指數로서의 用法은 적은 物體에 좋은효과가 있고 큰 물체의 가황에서 초기 또는 별로 重要하지 않은 단계를 제외한 모든 온도의 계산에 適合하다. 이 內容은 이 章의 후반에서 說明 하겠다.

式 (8)은 試驗 試片의 加黃에 適用[4]하였는데 이 式으로 부터 計算된 溫度가 Thermocouple로 測定한 것보다 높게 나오는 때도 있었다. 이는 主로 mould의 各 面이 갖는 加熱 能力이 서로 같지 않고 特히 大氣 쪽에 노출된 面에서는 더욱 그러 했기 때문이었을 것이다. 이 外에 생각해야 할 또 하나의 문제는 고무를 mould에 넣고 닫는 그 순간부터 加熱이 始作 되고 이것이 위에 말한 것과 같은 結果를 가져 오게 했을 것으로 본다.

計 算

式 (6)과 (8)을 고무 技術者가 다만 計算尺만 가지고 活用할 수 있다는 例를 쉽게 들어 計算해 보기로 한다

例題 1 두께가 1″인 어떤 고무 配合物의 中央面에서의 溫度 上昇을 알기 爲하여 外部에서 兩面에 150°C(302°F)의 熱을 加했다고 하자. 고무의 최초 온도는 21°C(70°F)이고 $D=0.008\text{in}^2\text{min}^{-1}$으로 한다. 이들 수치를 式 (6)에 代入 해 보면

$$\frac{302-T}{302-70}=\frac{4}{\pi}\left(e^{-At}-\frac{1}{3}e^{-9At}+\frac{1}{5}e^{-25At}\right)$$

가 되고 이 중 $A=\pi^2 D/L^2$이다.

위의 경우 $D=0.008$, $L=1$ in 따라서 $A=0.079$가 되고 式은

$$\frac{302-T}{232}=1.273\left(e^{-0.079t}-\frac{1}{3}e^{-0.71t}+\frac{1}{5}e^{-1.97t}\right)$$

$$\therefore\ 302-T=295\left(e^{-0.079t}-\frac{1}{3}e^{-0.71t}+\frac{1}{5}e^{-1.97t}\right)$$

$$\therefore\ T=302-295e^{-0.079t}+98.3e^{-0.71t}-59e^{-1.97t}$$

Table 2를 보면 T_1, T_2 및 T_3는 지수 1, 2 및 3項을 각각 使用하여 계산한 溫度이고 式은 다음과 같은 形態로 된다.

$$T=302-295/U+98.3/V-59/W$$

이 式의 $U=e^{0.079t}$ $V=e^{0.71t}$ $W=e^{1.97t}$이고 따라서

$T_1=302-295/U$,

$T_2 = T_1 + 98.3/V$

$T_3 = T_2 - 59/W$가 된다.

檢 討

T_1, T_2 및 T_3 모두 plot하지 않았지만 T_3는 Fig. 3에 두께 1″인 고무 Slab을 Thermocouple로 측정 하여 기 록한 실제 온도를 함께 plot해 보았는데 mould의 側面에서의 熱이 別로 효과가 없음을 보여 주고 있다. Heating Cycle의 초기에는 온도 상승 속도가 急速하여서 對數 graph를 써 보았다. Table 2에서 보면 T_1의 plot는 95.5°C(200°F) 以上의 溫度라면 豫想되는 作業 形態에는 충분하나 第2項 및 계속 되는 項 에서는 크게 기여하지 못했음을 알 수 있을 것이다. 다만 여기서의 計算은 正常的인 조작 속도로 10 in 표준 계산척으로 해낸 것임을 말해 준다. 따라서 이 수치가 정밀한 것이라고 할 수 없으나 error가 크다 해도 0.5°F 이하일 것

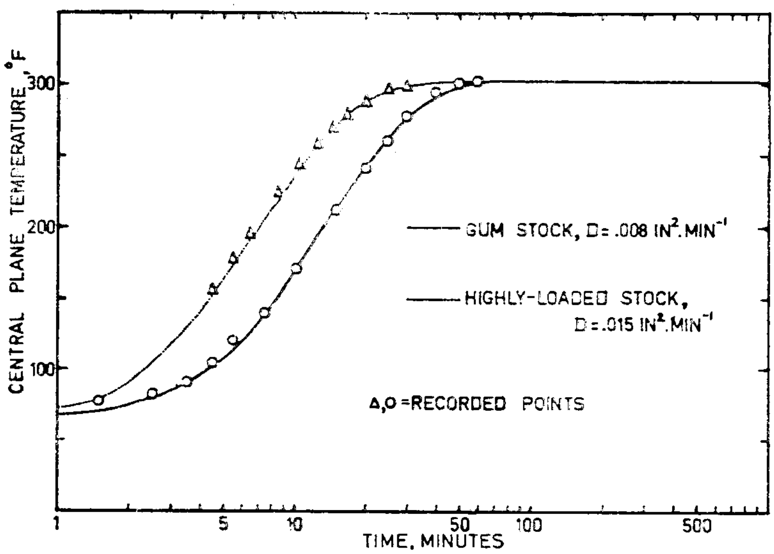

Fig. 3. Mid-plane temperature plots for 1-inch thick infinite slabs

表 2 例 1의 계 산(결과는 Fig. 3에 plot)

t (min)	$.079t$	U	$295/U$	T_1	$.71t$	V	$98.3/V$	T_2	$1.97t$	W	$59/W$	T_3
0	0	1	295	7	0	1	98.3	103.5	0	1	59	46.3
1	0.079	1.082	272.6	29.4	0.71	2.035	48.3	77.1	1.97	7.17	8.2	69.5
2	0.158	1.171	251.9	50.1	1.42	443	23.8	73.9	3.94	51.2	1.2	72.7
5	0.395	1.484	198.8	103.2	3.55	34.7	2.8	106.0	9.85	N	—	106.0
10	0.79	2.202	134.0	168.0	7.1	12.0	0.1	168.1	19.7	N	—	168.1
20	1.58	4.85	60.8	241.2	14.2	N	—	241.2	39.4	N	—	241.2
50	3.95	51.9	5.1	296.3	35.5	N	—	296.3	98.5	N	—	296.3
100	7.9	2700	0.1	301.9	71	N	—	301.9	197	N	—	301.9
200	15.8	N	—	302	142	N	—	302	394	N	—	302
500	39.5	N	—	302	355	N	—	302	985	N	—	302
1000	79	N	—	302	710	N	—	302	1970	N	—	302

이다. 이는 물론 이 과정의 고찰에는 精密이라는 點에서는 거리가 있다 하겠다. 몇 가지의 간단한 Rule을 記述해 본다.

(i) A의 값을 決定하고 계속 되는 項마다 9, 25, 等을 곱했다.

(ii) 第 2, 6및 10번째 에서의 값은 Slide Rule을 사용치 않고 取했다.

(iii) e는 Slide Rule을 한번 Setting하고 몇 차례 읽어 取 했다. 例 $t=1$, 10, 100 및 1000

(iv) N은 그 값이 아주 커서 계속 되는 계산 에서는 無視 할 수 있었다.

(v) e는 $e^{0.01}$에서 e^{10}까지는 直接 Slide Rule에서 取했고 지수가 작은 것은 數表를 볼 필요 없이 e^x는 $1\cdot x$ 式을 썼다. 예를 들면 $e^{0.01}$은 1.01(실제 로는 1.01005)로 했다. 사실상 $e^{0.1}$(1.1052)쯤 되면 그 차가 겨우 확실 해지고 있다.

모순이 분명한 點도 있다. 최초의 온도가 21°C(70°F)로 가정 되어 있고 계산은 指數 方程式의 첫 項에는 7°C 두 번째는 105°C, 세번 째는 46°C를 주었다. 많은 項이 70°C에 가까운 값을 얻도록 해야 했기 때문이다. 그러나 세 項에 1分當 계산 온도는 정확 할 것으로 보인다. 다시 말하면 이 온도 범위 에서는 T_0의 정확한 값이 알려져 있으므로 重要 하지 않으며 고무 材料의 Curing試驗 에서는 어떤 모순도 重要 하지 않다고 할 것이다.

例 題 2

두께가 1″인 어떤 Slab의 양면에서 최초 온도 21°C(70°F)의 것을 150°C(302°F)의 熱을 加할 경우 中央面의 온도를 구해 본다. 이 Slab는 高充塡 배합물이고 $D=0.015\text{in}^2\cdot\text{min}^{-1}$이다. 이 경우는 例 1에서와 마찬가지로 代入해 보면 다음과 같이 될 것이다.

$$T=302-295e^{-0.148t}+98.3e^{-1.332t}-59e^{-3.7t}+\cdots\cdots$$

앞에 말한 方法 대로 해가면 table 3과 같이 계산되어 나온다. T_3 값을 Fig 3에 plot 해 보았는데 이 Graph의 點은 $D=0.015\text{in}^2\cdot\text{min}^{-1}$로 판단되는 고무 배합물의 크기가 10×9×1″인 Slab에 Thermocouple을 삽입시켜 두고 위 條件에 따라 加熱 하면서 측정한 온도이다. 이 시험에 사용한 고무 配合은 다음과 같다(重量部)

NBR	100
Carbon black	150
Soft Clay	40
DBP	15

이 들을 순 고무재질의 것과 비교하면 표면 온도가 所期 溫度에 到達하는 時間은 分明히 차이가 나는데, $D=0.015$인 Compound의 경우, 순 고무를 어떤 溫度까지 上昇 시키는 時間의 半 밖에 걸리지 않으며 熱 擴散速度와도 一致 하는 것이다.

例 題 3

최초 온도가 21°C인 Tread 고무의 6″ Slab($D=0.01\text{in}^2\cdot\text{min}^{-1}$)을 兩面에서 150°C(302°F)의 熱을 加할때 中央 面에서의 溫度를 求하라.

이 경우의 式은 아래와 같이 된다.

$$T=302-295e^{-0.00274t}+98.3e^{-0.025t}-59e^{-0.0685t}$$

여기서는 앞에서 한 것과는 달리 時間 간격을 더 길

表 3　　例 2 의 계산표(결과는 Fig. 3에 plot)

t (min)	$.148t$	U	$295/U$	T_1	$1.332t$	V	$98.3/V$	T_2	$3.7t$	Z	$59/Z$	T_3
0	0	1	295	7	0	1	98.3	105.3	0	1	59	46.3
1	0.148	1.159	254.5	47.5	1.332	3.75	26.0	73.5	3.7	40.4	1.5	72.0
2	0.296	1.344	219.5	82.5	2.644	14.3	6.9	89.4	7.4	N	—	89.4
5	0.74	2.095	140.8	161.2	6.66	775	0.1	161.3	18.5	N	—	161.3
10	1.48	4.38	67.4	234.[illegible]	13.32	N	—	234.6	37	N	—	234.6
20	8.96	19.3	15.3	286.7	26.64	N	—	286.7	74	N	—	286.7
50	7.4	1630	0.2	301.8	66.6	N	—	301.8	185	N	—	301.8
100	14.8	N	—	302	133.2	N	—	302	370	N	—	302
200	29.6	N	—	302	266.5	N	—	302	740	N	—	302
500	74	N	—	302	666	N	—	302	1850	N	—	302
1000	148	N	—	302	1332	N	—	302	3700	N	—	302

表 4　　例 3의 결과

t(min)	20	50	100	200	300	400	500	600
T_3 (°F)	67.6	71.7	86.2	131.7	172.3	230.2	227	245
t (min)	700	800	900	1000	1100	1200	1500	2000
T_3 (°F)	258	269	2769	283	287.5	291	296.7	300.8

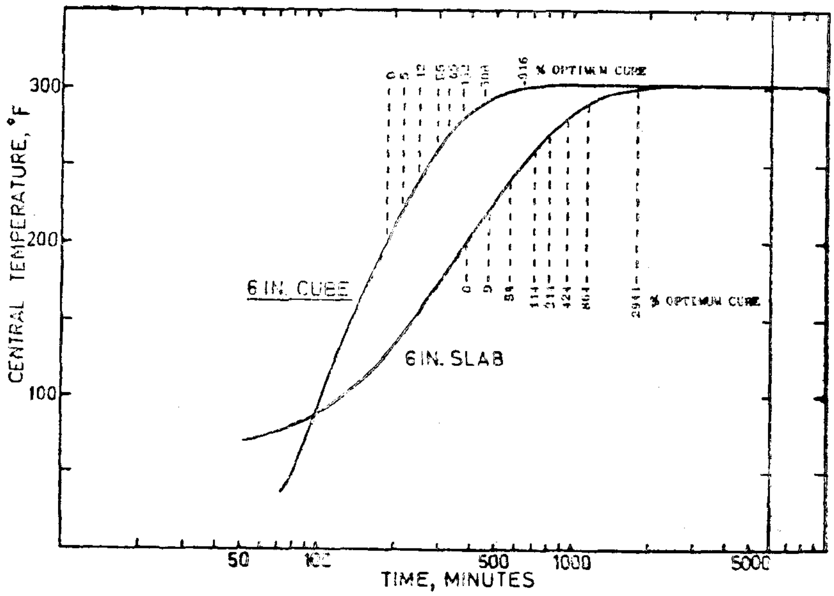

Fig. 4. Central temperature plots for 6-inch cube and infinite slabs. (D=0.01in²·min⁻¹.)

게 하여 plot해 보았다. 計算은 表示하지 않았지만 T_3 값은 表 4에 表示 하였다.

이때 T_1은 300分에 78°C(172.3°F)였고 200분 후의 T_2는 55.4°C(131.7°F) 였음을 알 수 있고 가황 온도를 硏究하는 面에서 보면 95.5°C(200°F)가 충분히 되는 곳을 임의로 보아도 T_1은 아직 여유가 있게 된다. 위의 Table 4에 나온 結果를 Fig.4에 그려 보면 된다. 이 그림을 보고서 가황 량을 이 章의 뒤에서 說明 하는 方法으로 計算해 낼 수 있게 된다.

本章에서 계속 임의로 例述한 표준강도에서 가황 時間이 100分인 배합은 約 700分 後에 完全히 가황이 되고 그 때의 溫度는 約 127°C(260°F)에 도달 할 것이다. 물론 이것은 가황 Cycle을 이 點이라고 규정 한다면 冷却 時에 일어 나는 가황의 進行은 고려하지 않은 것이다.

例 題 4

최초 온도가 21°C(70°F)인 Tread Stock(D=0.01in²/min)의 6″ cube중심의 온도 상승을 求하라. 가열은 150°C의 온도로 6回 전부 가열 한다.

(해) 方程式 (8)을 使用 하면

$$T_3=302-478e^{-0.00822t}+159e^{-0.074t}-96e^{-0.206t}$$

로 되고 t=70 부터 그 후의 계산치는 다음 表 5와 같이 된다.

이 結果는 Fig.4에 Cure state와 같이 plot 했는데 이 計算에 따르면 이 Compound는 130°C(266°F)에서 Cure

表 5　　예제 4의 T_3値 (6″ Cube의 Tread Stock)

t(min)	70	100	200	300	400	500	700	1000
T_5(°F)	33.3	91.6	209.2	261.2	284.1	294.2	300.5	301.9

time이 100分으로 추정 된다. 이 그림은 또한 130°C에서 相當하는 가황량을 식으로 表示 하고 있다. 가황 상태(State of cure)面에서 보면 다음과 같은 內容은 퍽 興味 있는 일이 되고 있다.

1. 이 Cube의 中心은 350分이 되어서야 완전히 가황되었고(到達 溫度는 135°C=275°F) 反面에 Slab는 700分에 도달 온도는 130°C(260°F) 가황되는 點이다. 이는 물론 Cube 쪽이 溫度 速度에 도달하기 以前에 Cube가 완전히 가황 되는 것이다.

2. Slab가 149°C(300°F)에 이르러 Optimum Cure의 거의 3000% 程度 熱을 받았고 反面 Cube는 900%밖에 안 되었다.

3. 150°C(301.9°F)에 도달 하는 時間은 잠복 時間(Incubation time)이라는 것이다. 이것은 그 物體의 中心部 온도가 外部로 부터 加하는 溫度에 충분하게 密接해져서 그 物體 全體가 均一한 溫度에 存在 하게 되는데 所要되는 時間의 尺度라 할 수 있다. 이러한 定義는 Fig.3과 4에서 보는 바와 같이 중심부의 온도가 一定 時間에 표면 온도에 近接 하는 時間을 plot하여 만든 것이며 理論的으로는 時間은 無限大에 이르는 것으로 조금 애매한 것이기도 하다. Fig.3 에서는 2種의 配合의Incubation time을 中心部 온도가 약 143°C(290°F)인때에 各各 20分, 40分으로 되었는데 이는 Fig.3 에 plot된 實驗 結果로 실증 되고 있어 各 時間에 걸친 計算 溫度에 잘 일치 하고 표면 온도의 도달이 이 Cycle에서 明白하게 늦은 것을 알 수 있다. 方程式(6)을 검토 하면 표면 온도가 높으면 높을 수록 고무로 傳達되는 熱量이 커지며 따라서 Incubation time도 短縮 됨을 알 수 있을 것이다. 다만 이것은 고무를 가황 하는데 加해진 溫度라는 點에서는 그렇지만 傳達된 熱量이 크면 클수록 도달된 온도는 높아지는 것이다. 이러한 主要한 點들을 說明 하기 위하여 表面 溫度가 各各 다른 경우의 中心部의 計算 溫度를 Fig.5에 表示하였다. 이는 두께가 1″인 Tread($D=0.01 in^2/min$)의 Slab로 최초 온도가 21°C(70°F)로 양면에서 (1)200° (2) 240° (3) 280° (4) 320° 및 (5) 360°로 가열한 경우 計算한 것이다. 第一 指數項 $e^{-0.0987t}$는 어느 경우나 $t=60$에서 아주 커지고 Incubation time도 一定하게 된다. 예를 들면 $t=60$에서는 표면 온도가 200°와 360°일때 계산된 중심 온도는 각각 표면 온도 이하인 199.6°와 359.2°, 0.4° 0.8°이었다. 가열체로 부터 제거 되었을 때 고무 자체의 냉각 Curve는 방정식(6) 또는 (8)로 계산될 수 있는데 예를 들면 예제(2)에서 방정式 (6)은 표면온도 21°C(70°F) 최초 고무 온도 150°C(302°F)였을때 使用하였고

全體 온도가 302°였을때 쓸만한 값어치가 있는 것이고 冷媒가 실제로 70°일 것으로 가정 하고 있는 것이다.

冷却 方法 역시 아주 重要한 것으로 예를 들면 停滯되어 있는 공기보다 流動 하는 空氣가 훨씬 좋은 것으

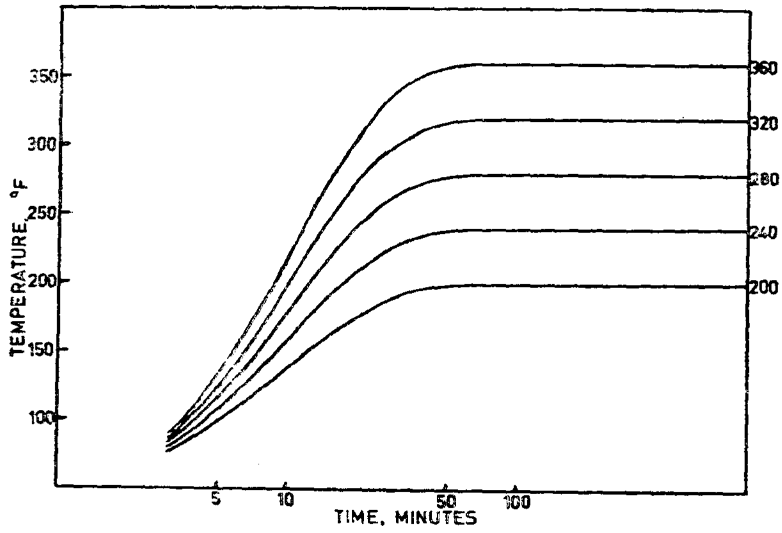

Fig. 5. Mid-plane temperature plots for 1-inch slab of tread stock with Various impressed temperatures.

로 이 때문에 方程式 만으로는 정확한 結果를 計算해 내기는 어렵다. 그러나 대략 측정 함으로서 고무의 실제 냉각이 열의 전도, 대류, 복사에 의해서 이루어 지지만 이 方法이 適切한 것이라는 것을 알수 있을 것이다. Mould에서 꺼낸 고무가 실온까지 一般的인 冷却을 시킬때의 열 전도 계수가 약 2BThU/ft²·hr·F°(다음 Section 에서 설명)이라는 것은 이미 알려져 있기도 하다[7].

한편 예제 2의 계산 에서의 온도 강화(여기에 기록되지 않았음)는 실제로 冷却이 일어 나는 속도 보다 빠르게 나타나고 있다.

表面 抵抗의 有限性

여러가지 Heating 조작을 하는 동안 고무 材質에 대한 열 전도의 비율은 그 물체의 표면에는 一定 時間등의 온도 상승은 가열 Cycle이 게시한 연후에 일어나는 것이라 하겠다. 例를 들면 찬 고체를 熱 gas속에 넣어 둔다면 gas를 교반해 주지 않아도 접촉된 표면의 gas는 즉시 냉각이 일어나는 것이다. 비슷하게 표면의 녹 Scale 또는 Steam 加熱 Press의 열판에 잠긴 응축수 등은 철판을 통해 고무 쪽으로 Steam의 열이 전달 되어 가는 속도를 저하시키고 있는 것이다. 가장 간단한 例로 어떤 Slab에서 그 열전도 계수가 h라 하면 다음과 같이 표시할 수 있을 것이다.

$$-k(T/X)=h(T_s-T_s') \text{ at } x=0 \qquad (9)$$

이 式에서는 T_s'는 Slab 실제 표면 온도이고 만일 h가 부정확한 경우 加熱媒의 온도인 T_s에 일치하지 않는다. 항수 h는 Heat trausfer cofficient이며 그 단위는 BThU/ft²·hr·°F이거나 cal/cm²·sec·°C로 되어 있고 加熱體와 材料面 사이의 熱 傳導의 척도인 것이다 열전도 k는 수학적인 검토 에서만 h의 一定한 값이 채용되고 수 특히 지금 설명한 바와 같은 경우라면 D처럼 重要하지 않게 된다. 만일 어떤 Slab를 양면에서 가열할 때에는 溫度—時間 方程式을 다음과 같이 表示할수 있다.

$$\frac{T_s-T_x}{T_s-T_0}=4\sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{\sin 2Bn}{2Bn+\sin 2Bn}\right)e^{-Bn^2Dt/l^2}$$

$$\cdot\cos[Bn(1-x)/l] \qquad (10)$$

여기서 $\cot B=mB$를 Bn로 하며 이들값 B_1, B_2 등은 第一次, 第二次 등으로 이 方程式의 根이 되며 $m=k/hl$ 이 된다. 두개의 變數(Fourier modulus인 $X=Dt/l^2$과 $m=k'/hl=N^{-1}$, N은 Nusselt Number)의 함수가 되는 것이다. m가 어떤 값을 갖는 경우 根 B_1, B_2등은 圖上에서 구해질 수 있다. 萬一 h가 不定 이라면(즉 表面抵抗을 無視할 수 있을때) 根은 $\pi/2, 3\pi/2$ 등이 되고 $x=l$ 즉 중앙면)이라면 方程式 (10)은 方程式 (6)에 일치하게 된다. 환언하면 方程式 (10)은 一般的인 관계이고 h가 고정이든 부정이든 간에 응용 될수 있는 것이다. 이러한 해법은 Schneider가 제안한 方法에 기초를 둔 것이다.

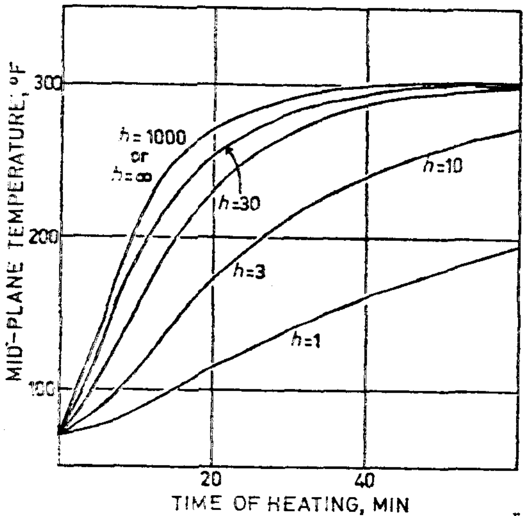

Fig. 6. Mid-plane temperatures for 1-inch slab of rubber having $D=0.012\text{in}^2\cdot\text{min}^{-1}$, using different values for h, the heat transfer coefficient in British units.

방정식은 부정형 Slab에서와 마찬가지로 입체적인 방법으로도 유도될 수 있지만 여기에서 설명은 생략하였다 이 단계에서 더 이상 수학적인 방법을 이야기할 필요는 없지만 Fig. 6을 보면, h의 값이 가지는 뜻을 분명히 알 수 있을 것이다. (다음호에 계속)