

고무판의 가열 및 냉각시 판 내부의 온도변화

김 승 재[†] · 장 윤 창 · 길상규^{**} · 김 영 주^{*}

전남대학교 환경공학과, *전남대학교 공업기술 연구소, ** (주)금호연구소
(1994년 12월 5일 접수)

Temperature Change Inside a Rubber Sheet During the Process of Heating and Cooling

Seung Jai Kim[†], Yun Chang Jang, Sang Gyu Kil^{**}, and Young Joo Kim^{*}

Department of Environmental Engineering, College of Engineering
Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

*Research Institute of Industrial Technology, CNU, Kwangju 500-757, Korea

**R & D Center, Kumho Co., Inc. Kwangju 506-040, Korea

(Received December 5, 1994)

요약 : 양질의 고무제품을 얻기 위하여 고무를 최적 조건으로 가류시키는 것이 매우 중요하며, 이 공정의 이해와 운전의 합리화 조건을 구하기 위해서 고무 내에서의 열전달 현상을 재조명할 필요가 있다. 여기서는 타이어 제조에 사용되는 고무의 조성파 유사한 얇은 고무시편을 제작하여 시편의 표면을 가열한 후 자연 냉각시킬 때 시편 내부의 온도변화를 측정하였다. 또한 온도 변화에 따른 여러 고무시편의 열전도도의 변화를 측정하였다. 한편 시편 내부의 온도변화를 비정상 상태, 2차원 열전달 경계값 문제로 모델링하여 구한 수치해로 시편 내부의 온도 변화를 예측하고 실험값과 비교하였다. 모델로 예측한 온도는 가열 초기와 자연냉각 말기에는 실험값과 약간의 차이가 있었으나 전반적으로 실험값과 잘 일치하였다. 시편 각 부위 별로 중심부에서 표면 쪽으로 갈수록 가류도가 상승하였고 가류온도가 높을수록 그 폭은 증가하였다. 따라서 제품의 균일한 품질을 얻기 위해서는 가류온도와 그 시간을 최적화 하는 것이 바람직하다.

Abstract : The heat transfer phenomena in a rubber sheet was investigated in this paper in order to evaluate curing process and to attain optimum state of cure, which may determine the quality of a rubber. A piece of rubber sheet which is similar in composition to one used in tire manufacturing, is used to measure the temperature inside during the process of heating and cooling. The variation of thermal conductivity with the change of temperature was measured experimentally. With the measured thermal conductivity and temperature boundary conditions, the temperature change inside sample plates was predicted by solving unsteady state, two-dimensional boundary value problems. The calculated temperature profiles agreed reasonably well with the experimental ones except in the initial period of heating and the final period of cooling. The state of cure increased in the outer layers and its difference at between the center and the outer layer increased with higher curing temperature. In order to improve the quality of rubber products, therefore, the optimum curing temperature and processing time should be selected.

Keywords : heat transfer, rubber, state of cure, thermal conductivity, numerical modeling.

서 론

가류란 열가소성 고분자 물질에 황이나 가교 결합 화합물을 넣고 가압하에 열을 가하여 열경화성 탄성체로 만드는 과정을 말한다. 이는 여러 겹의 고무 화합물을 프레스 내에서 성형시키는 타이어 제조의 중요한 마지막 공정이기도 하다. 고무의 가류에 관한 연구는 19세기 중엽부터 시작되어 1980년대 들어와서는 타이어의 열적특성의 규명을 위한 연구로 진행되어 왔다.

Gehman,¹ Ambelang과 Prentice,² Nengli와 Danyang³ 등은 가류도의 계산과 가류시 열전달 현상에 대하여 수치해를 구하는 이론적 연구를 수행하였고, Kong 등⁴은 가류시 타이어 내부에서 열전달 현상을 물리적 특성인 열전도도와 화학적 특성인 열생성으로 크게 대별하고, 타이어의 열전달기구 (mechanism) 연구에서 가장 기초적이면서도 근본이 되는 것은 열전도도 측정이라고 하였다. Schlanger⁵와 Vergnaud⁶는 타이어의 복잡한 부분을 줄이고 가류시 열전달 현상에 관한 1차원적인 모델을 세워 타이어 내부의 열전달 특성을 수치적으로 해석하는 방법을 보고했으며, 이러한 수치 해석적 방법으로부터 타이어 중심부위에서는 계산값과 실측값이 비교적 큰 차이가 없음을 보여 주었다.

타이어를 구성하는 여러 성분들은 열전도도가 서로 다를 뿐만 아니라, 열전도도는 온도의 함수이고 타이어의 각 부위의 두께와 형태가 다양하여 가류시 내부 온도를 이론적으로 예측하기가 매우 어렵다. 본 연구에서는 단일성분 시편들을 겹친 다층 복합시편 및 타이어의 트레드 형태와 유사한 시편을 제작하여 시편의 경계면과 내부에 위치한 열전대를 이용하여 가열 및 냉각시 시간에 따른 각 부위 별 온도 변화를 측정하였다. 시편 내부의 온도 변화를 비정상상태, 2차원 열전달 경계값 문제로 모델링하여, 시편을 가열한 후 냉각시킬 때 시편 내부의 온도를 이 모델의 수치해를 구하여 예측하고 실측값과 비교한 후, 시편의 각 부위별 가류도를 계산하였다. 열전달 실험에 사용된 각각의 성분

과 같은 시편을 별도로 제조하여 온도변화에 따른 열전도도를 측정하여 온도에측 모사의 데이터로 활용하였다.

이 론

2차원 비정상 상태 열전달에 관한 지배식. 고무 시편의 가류시 가류반응열이 발생할 때 에너지 수지는 다음과 같다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \Delta \cdot k \Delta T + Q \quad (1)$$

여기에서 Q 는 가류반응열이다.

가류반응열(Q)은 가류도 (State of Cure; SOC)에 따라 달라지는데 다음 식으로 나타낼 수 있다.^{3,7}

$$Q = G(1 - 0.02 \cdot SOC) \quad (2)$$

여기서 G 는 온도의 함수로서 열생성의 강도를 나타내며, 이 때 SOC는

$$SOC = \int_0^{t_i} r dt \quad (3)$$

와 같다. 여기서 r 은 가류반응속도, t_i 는 가류시간이다. 동위가류시간 (equivalent cure time)과 온도와의 관계는 Arrhenius식 형태로 나타낼 수 있다.

$$t = t \exp \left[\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (4)$$

여기서 E 는 활성화 에너지로 고무의 경우 21-28 Kcal/mol이며, R 은 기체상수, T_i 은 기준온도, T 는 가류온도이다.

본 연구에서는 동일시편을 가지고 온도조건을 바꾸어 가면서 실험을 반복하였으므로 최초 1회 실험을 제외하고는 Q 의 영향은 무시할 수 있으며 따라서 이 경우의 열전달 지배식은 다음과 같다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_R \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_R \frac{\partial T}{\partial y} \right] \quad (5)$$

여기서 고무의 열전도도(k_R)는 온도의 함수로서 다음 일차식으로 나타낼 수 있다.

$$k_R = a + bT \quad (6)$$

이 식에서 a 와 b 는 상수이다.

밀도와 열용량도 열전도도와 마찬가지로 온도에 대한 함수 형태로 표현을 해야 하나 실질적으로 온도가 증가함에 따라 열용량은 증가하고 밀도는 약간 감소하므로 ρC_p 항은 일정하다고 가정하였다. 한편 Toth 등⁷은 밀도경사결립을 이용한 여러 고무제품의 밀도와 차분주사열량계를 이용한 열용량의 온도의존성을 조사하였다. 온도에 따른 밀도변화는 가류가 일어나는 경우일지라도 무시할 만큼 작았으며, 열용량은 온도에 따라 선형함수로 증가하였다. 다만 가류가 이미 완료된 고무제품의 경우 대부분 그 온도 의존성이 극히 약화되어 큰 열용량의 변화가 일어나지 않았다.

(5)식의 해를 구하기 위해 본 연구에서 적용한 경계조건은 다음과 같다.

<가열단계>

$$T_{s1}(x, y, t) = T_1(t) \quad (7)$$

$$T_{s2}(x, y, t) = T_2(t) \quad (8)$$

<냉각단계>

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{s1} = h_{s1}(T_{s1} - T_1) \quad (9)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{s2} = h_{s2}(T_{s2} - T_2) \quad (10)$$

여기서 h_{s1} , h_{s2} 와 T_{s1} , T_{s2} 는 각각 상, 하 가열판에서의 열전달계수 및 그 온도를 나타내며, T_1 는 자연 냉각시 가열판 경계의 필름온도로서 시편 표면 온도 (T_w)와 실내 공기 온도 (T_a)의 평균값을

사용하였다.

지배식의 수치해. (5)식을 전방차분 근사법을 활용하면 다음과 같은 유한차분식을 얻을 수 있다.⁸⁻¹⁰

$$T_i(t + \Delta t) = \frac{\Delta t}{\rho C_p V_i} \left[\frac{\rho C_p V_i}{\Delta t} - \sum_j k_{ij} \right] T_i(t) + \frac{\Delta t}{\rho C_p V_i} \sum_j k_{ij} T_j(t) \quad (11)$$

위 식으로부터 시편 내부의 어떤 지점, i node에서의 Δt 만큼 경과된 후의 온도를 예측할 수 있다. 시편을 가열할 때, (11)식의 괄호 안에 있는 항의 값이 영보다 작을 경우에는 시간이 경과할수록 시편의 온도가 오히려 내려가므로 물리적으로 의미 있는 온도 값을 얻기 위해서는 (11)식의 괄호 내에 있는 항의 값이 영보다 커야 한다.

$$\frac{\rho C_p V_i}{\Delta t} - \sum_j k_{ij} > 0 \quad (12)$$

시편 내에서의 유한 차분 Δx 와 Δy 가 같다면, 단위 두께당 부피 (V_i)는 $(\Delta x)^2$ 와 같으므로 위 식은 다음과 같이 간편하게 된다.

$$\frac{\rho C_p (\Delta x)^2}{\Delta t} - 4k > 0 \quad (13)$$

혹은

$$\Delta t < \frac{(\Delta x)^2}{4a} \quad (14)$$

본 연구에서 사용한 고무의 열확산계수 a 는 $1.32 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ 이므로 Δx 를 1 mm로 할 때 시간 증분은 1.9초보다 작아야 하며, Δx 를 2 mm로 하면 시간증분은 7.6초 이하가 되어야 한다. 본 연구에서는 Δx 는 2-2.5 mm, 시간증분은 5초로 하여 시편내 온도 변화를 계산하였다.

실 험

실험장치 및 시편. 열전도도 측정은 Holometrix

사에서 제작한 열전도도 측정장치 (모델명 : TC-HM-LT)를 사용하였다. 이장치는 온도 변화 범위가 30-150℃이고, 직경 50 mm인 원판형 시편을 시편 홀더에 넣고 공기 압축식 연동장치로 약 100 psi 정도로 가압한 후 온도에 따른 시편의 열전도도를 측정하고, 측정된 자료들은 IBM PC로 처리되도록 제작되었다. 열전도도 측정용 시편의 구성성분은 Table 1에 수록되어 있으며, 형태는 두께가 2-3 mm이고 직경이 50 mm인 원판형이었다. 시편의 열용량은 Differential Scanning Calorimeter를 이용하여 측정하였으며, 밀도는 고무의 비중을 측정하여 환산하였다.

열전달 실험장치는 Fig. 1에 도시하였다. 이 장치 (Heat Transfer Testing Machine, 제작회사 : 동남 엔지니어링)는 test section, control part 와 data acquisition system (DAS)으로 크게 나눌 수 있다. Test section은 상, 하를 알루미늄 판으로 제작하였고 그 안에 두께 15 mm의 철판을 부착하였으며, 알루미늄 판의 표면에는 온도조절기를 각각 1개씩 설치하여 온도를 30-300℃ 범위 내에서 조절할 수 있도록 하였다. 열손실을 방지하기 위하여 test section 주위는 단열판을 설치하였으며, screw형태의 손잡이를 사용하여 상부판은 상, 하 방향으로 움직일 수 있도록 제작하였다. 시편 내부의 온도는 "J" Type 열전대 (성분 : 철-콘스탄틴, 직경 : 0.3 mm)로 측정하였고, 그 결과는 DAS를 이용하여 분석 처리되었다. 이 장치의 온도 측정의 오차 범위는 ±0.1℃이었다.

Table 1. Composition of Sample Plates for the Heat Transfer and Thermal Conductivity Measurements

Compound	NR	SBR	BR	Carbon	Oil	Sulfur
A	80	—	20	50	5	5.0
B	60	15	25	47	11	3.8
C	40	—	60	67	32	2.5
D	40	30	30	60	16	1.3

where NR =Natural Rubber.
 SBR=Styrene Butadiene Rubber.
 BR =Butyl Rubber.
 unit=PHR(parts per hundred rubber).

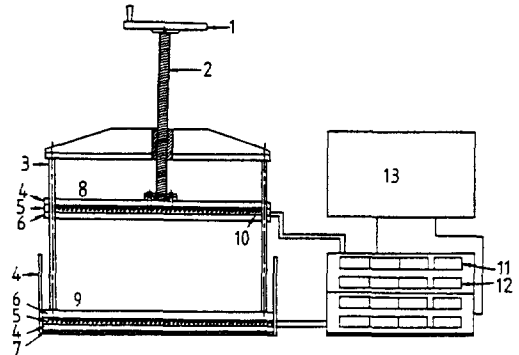


Fig. 1. Schematic diagram of experimental equipment : 1. handle, 2. screw, 3. guide post, 4. adiabetic plate, 5. heater, 6. aluminum plate, 7. fixed plate, 8. upper plate, 9. lower plate, 10. thermo-couple sensor, 11. setting temperature, 12. actual temperature, 13. DAS.

열전달 실험에 사용한 시편의 조성은 실제 타이어의 제조에 사용되는 성분과 유사하며 (Table 1), 크기는 가로와 세로가 각각 200 mm이고 단일 시편 (성분 A)일 때는 두께가 21.0 mm, 얇은 단일 시편을 겹친 다층 복합 시편일 때는 전체 두께가 18.5 mm인 평판형을 사용하였다. 시편 내부의 온도를 측정하기 위하여 시편 표면과 내부에 6-10 개의 열전대를 설치하였다 (Fig. 2a). 또한 트레드 형태를 갖춘 장방형 시편의 열전달 현상을 연구하기 위하여 Table 1에 수록된 성분 중 A와 B를 이용하여 시편을 제작하였으며, 크기는 가로, 세로가 각각 240 mm, 두께 22.5 mm이었다. 이 때의 시편의 형태와 열전대의 위치는 Fig. 2b에 도시하였다. 가류도 계산시 사용되는 활성화 에너지는 rheometer (Monsanto Co., 모델명 : MDR-2000)를 이용하여 온도 범위 150-190℃에서 가류 실험하여 평균값을 구하였다.

실험방법. 열전도도 측정을 위하여 30℃로 유지된 고무시편을 열전도도 측정장치에 넣고 온도를 30-150℃로 변화시켜 온도에 따른 열전도도의 변화를 측정하였다. 열전도도 측정장치에 넣기 전에 고무 시편의 크기를 정확히 측정하였으며, 시편 holder의 표면과 시편간의 접촉 열전달 저항을 최

소화하기 위하여 silicone heat sink compound를 아주 얇게 발라 주었다. 가열시 시편이 열평형에 도달하는데 약 50분이 소요되었으며 온도에 따른 열전도도의 변화가 적기 때문에 20℃ 간격으로 열전도도를 측정하였다.

열전달 실험은 시편과 접촉하는 시편 holder의 상, 하 알루미늄 판을 설정온도 (100-200℃)로 가열한 후, 여러 위치에 열전대를 삽입한 시편을 holder에 넣고 30초 간격으로 각 지점의 온도를 측정하였다. 열전도도 측정 시와 마찬가지로 시편을 측정장치에 넣기 전 크기를 정확히 측정하였으며, 시편 holder의 표면과 시편 사이에는 silicone heat sink compound를 아주 얇게 발라 주었다. 측정한 온도는 DAS에 의하여 입력되어 퍼스컴을 이용하여 분석, 처리하였다. 가열을 계속하여도 시편 내부의 온도변화가 거의 없을 때 시편을 꺼내어

실온에서 자연냉각시키면서 시편 표면과 내부의 온도변화를 측정하였다.

결과 및 고찰

열전도도. 본 실험에 사용된 시편의 조성은 실제 타이어에 활용되는 성분과 유사하며 그 내용은 Table 1에 수록되어 있다. 이 표에 수록되어 있는 4가지 시편을 이용하여 열전도도 측정장치를 이용하여 온도 범위 30-150℃에서 열전도도를 측정하였다. 모든 시편에서 온도가 상승함에 따라 열전도도(k) 값은 직선적으로 감소하였으며, 그 변화를 최소오차법으로 구하여, $k=a+bT$ 의 직선식으로 나타낼 수 있었다 (Table 2). Prentice와 Williams¹¹는 탄소의 함량이 높지 않은 합성 compound에서 온도가 1℃ 상승할 때 열전도도는 0.15%씩 감소한다고 보고하였다. 본 연구에서 탄소의 함량이 47-67PHR 함유된 compound로부터 얻은 결과에 의하면 1℃ 상승함에 따라 0.10% 감소하였으며, 따라서 Prentice와 Williams가 보고한 것과 비교하면 감소율이 약간 낮았다. Table 2에 나타난 네 가지 시편의 열전도도 값은 Hands¹²가 제시한 60PHR 탄소를 함유한 여러 천연고무보다 그 값이 약간 높은데, 이는 본 실험에서 사용한 시편의 복잡한 구성성분에서 그 이유를 찾을 수 있다. 특히 네 가지 시편 중 시편 B와 D가 다른 시편에 비하여 열전도도가 높았다. 그 것은 이 시편들이 다른 시편보다 탄소의 함량이 많고, 또한 천연고무보다 열전도도가 더 높은 SBR과 BR의 함

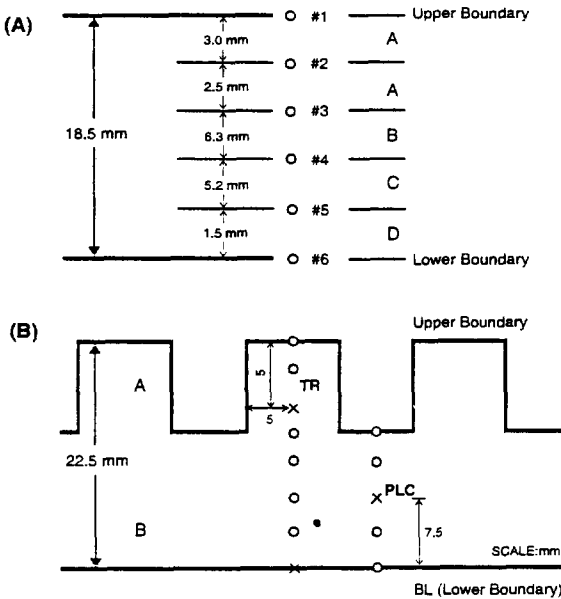


Fig. 2. Cross sectional diagram of sample sheets : (A) A multi-layer of A, B, C, and D rubber sheet and its thermocouples position, (B) Threaded sheet of compound A and B with thermocouples : TR, treaded side; PLC, point of least cure; BL, the opposite side of TR.

Table 2. Thermal Conductivity, Density and Heat Capacity of Sample Plates in the Temperature Range of 50-150℃

Compound	Thermal Conductivity $k(W/m^{\circ}C)$	Density $\rho(Kg/m^3)$	Heat Capacity $C_p(KJ/Kg^{\circ}C)$
A	$k=0.2708-0.00028T$	1121	1.84
B	$k=0.3029-0.00025T$	1161	1.83
C	$k=0.3029-0.00030T$	1134	1.81
D	$k=0.3564-0.00031T$	1228	1.70

량이 더 높기 때문으로 생각된다. 실제로 본 실험실에서 따로 탄소 함량에 따른 열전도도를 실험 측정된 결과, 선형적으로 열전도도가 증가함을 발견하였다. 각 시편의 측정된 밀도와 열용량 값을 Table 2에 같이 나타내었다.

열전달 현상. 고무시편 내에서의 온도변화를 측정하기 위하여 Fig. 1a와 같이 네 가지 성분의 얇은 박편을 붙여서 만든 시편을 제작하였다. 열전달을 설치한 시편을 상, 하판의 온도가 같은 온도(100/100℃와 150/150℃) 유지되는 열전달 장치에 넣어 가열 실험을 행하였다 (Fig. 3a). 가열을 계속하여도 시편 내부의 온도 변화가 거의 없을 때 시편을 꺼내어 실온에서 자연 냉각을 시키면서 온

Table 3. Upper and Lower Plate Temperature During the Experiment and Heat Transfer Coefficient in the Temperature Conditions : A Multilayer Sheet is Used as the Sample

Temperature of Upper Plate (°C)	Temperature of Lower Plate (°C)	Convective Heat Transfer Coefficient $H(W/m^2°C)$
100	100	5.63
150	150	6.55

도 변화를 측정하였다 (Fig. 3b). 또 고무시편의 가열시 시편의 내부온도를 식(11)으로부터 수치해석에 의하여 구하였다. 이 계산에 필요한 시편의 물성 값과 온도변화에 따른 열전도도 값은 Table 2에 수록되어 있으며, 경계조건과 대류열전달계수 (H)는 Table 3에 수록되어 있다. 시편의 자연대류 냉각시 대류열전달계수 (H)는 Prentice와 Williams¹¹가 제안한 $H=C[(T_w-T_a)/L]^{1/4}$ 을 사용하였다. 이 식에서 상수 C 는 모델로 계산한 온도와 실험값이 가장 잘 일치하는 1.32로 하였다. 이 시편의 경우, 여러 성분의 시편이 사용되어서 아주 정확한 내부온도를 이론 식에서 예측할 수는 없었으나, 정성적으로 시간에 따른 온도의 추정이 가능하였다. 본 실험실에서 단일 성분의 시편을 제작하여 실험을 했을 경우 내부온도가 훨씬 더 이론치에 접근하는 것을 발견하였다.

한 쪽 표면에 트레드를 가진 시편 (Fig. 2b)의 양면을 같은 온도 (160/160℃와 200/200℃)로 15분 가열한 후 자연냉각 시킬 때, 시간에 따른 시편 각 부위의 온도를 측정하여 실험값과 함께 Fig. 4에 도시하였다. 또 시편의 내부온도를 Table 4의 경계조건과 대류열전달계수로부터 수치해석에 의하여 구하였다. 이 그림에서 볼 수 있는 것과 같이, 평면측 경계면 (Bladder, BL), 트레드의 내부 (Tread, TR), 최소가류점 (Point of Least Cure, PLC)의 온도는 가열초기에는 계산값이 측정값보다 약간 낮았으나 시간이 경과함에 따라 실험값에 접근하였다. 이는 가열 초기에 시편과 시편 holder 판 사이에 큰 온도차 (110-150℃)가 존재하기 때

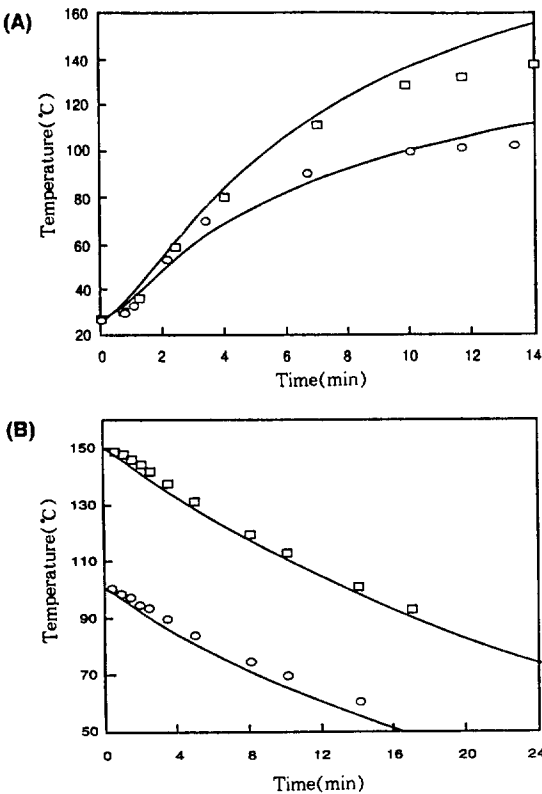


Fig. 3. Measured temperature (symbol) and calculated temperature (line) at the center of the multilayer sample sheet during heating (A) and cooling (B). □, 150/150℃; ○, 100/100℃.

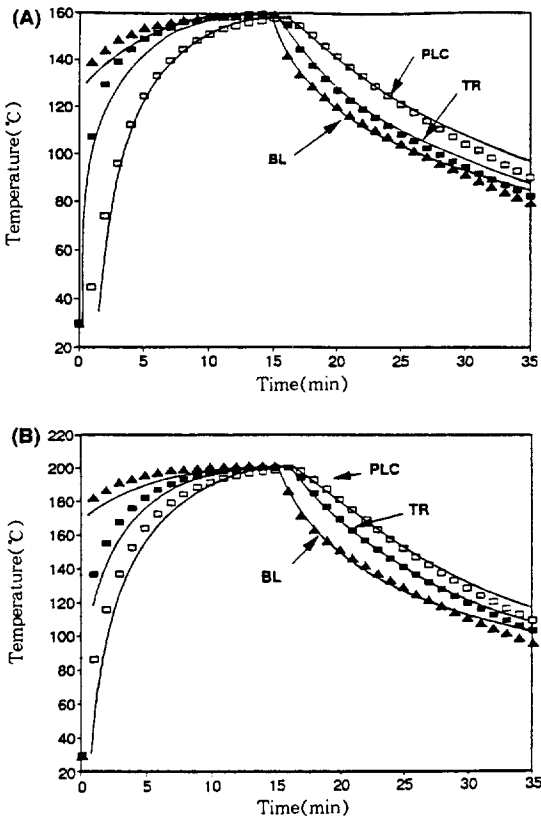


Fig. 4. Measured temperature (symbol) and calculated temperature (line) at various positions of the threaded sheet during heating and cooling at 160/160°C (A) and 200/200°C (B). TR, treaded side; PLC, point of least cure; BL, the opposite side of TR.

문으로 보인다. 평면측 경계면의 온도가 평형에 빨리 도달하는 것은 열전대가 아래 열판에 바로 접촉되어 있는 것을 반영한다. 한편, 냉각시 초기에는 추정온도가 실험값과 잘 일치하였으나 시간이 경과함에 따라 실험값보다 약간 더 높은 값을 보여준다. 이것은 냉각 후기 온도차가 비교적 적을 때 Prentice와 Williams 식으로 산출한 열전달계수가 실제보다 낮게 추정되기 때문으로 생각된다. 만약 대류 열전달계수 값을 시간에 따른 온도의 함수로 고려하면 그 차이는 줄어들 것으로 생각한다. 각 지점에서의 온도 변화는 예상과 같이 가열시에는

Table 4. Upper and Lower Plate Temperature During the Experiment and Heat Transfer Coefficient in the Temperature Conditions : A Treaded Sheet is Used as the Sample

Temperature of Upper Plate(Threaded Side, TR, °C)	Temperature of Lower Plate(the Opposite Side of TR, °C)	Convective Heat Transfer Coefficient $H(W/m^2°C)$
160	160	9.76
200	200	10.42
180	160	9.94
160	180	9.94

PLC의 온도가 가장 느리게 상승하고, 냉각시에는 가장 느리게 하강함을 보여준다.

실제 타이어의 제조 공정에서 볼 수 있는 것처럼 가류시 경계면과 트레드의 온도가 꼭 같은 경우는 드물다. 이에 따라 시편의 양면을 각각 다른 온도(상, 하 판의 온도 : 160/180°C, 180/160°C)로 가열할 때 시간에 따른 시편 내부의 온도 변화 실험을 행하였다 (Fig. 5). 상, 하판을 같은 온도로 가열할 때와 마찬가지로 가열초기에는 약간의 오차가 있었으나 계산값과 측정값이 잘 일치하였다. 시편을 가열할 때 특히 트레드 부분의 측정값이 계산값보다 더 높은 것을 발견할 수 있는 데, 이것은 트레드에 의한 열전달 면적의 증가로 이론보다 더 많은 열전달이 일어나기 때문인 것으로 보인다. 상판을 180°C로 가열할 때에 160°C로 가열할 때보다 PLC의 온도가 약간 더 높은 것이 이것을 증명한다.

가류도. 시편 내의 온도 분포가 열전달 저항에 의해서 균일하지 않으므로 시편 내의 가류도가 일정할 수는 없다. 시편 내부의 가류도 변화를 두께에 따라서 측정하기 위하여 시편 내부의 온도 변화를 측정하고 이에 따른 가류도를 계산하였다. 고무 시편의 가류도를 조절하는 방법에는 두 가지가 있는데, 그 하나는 일정시간 동안 가류시키되 열판의 온도를 변화시키는 방법이 있으며, 다른 하나는 어떤 가류도에 도달할 때까지 가열 시간을 변화시키는 방법이다.¹³ 조성이 Table 1의 A와 같고 양

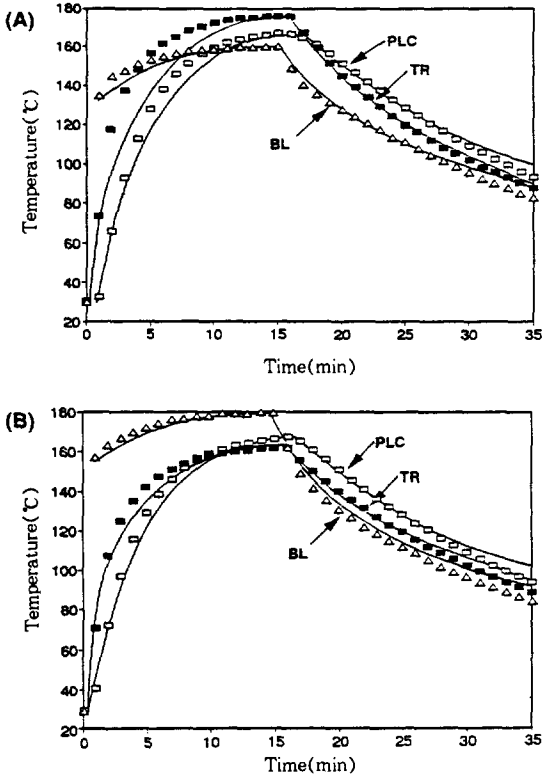


Fig. 5. Measured temperature (symbol) and calculated temperature (line) at various positions of the threaded sheet during heating and cooling at 160/180°C (A) and 180/160°C (B). TR, treaded side; PLC, point of least cure; BL, the opposite side of TR.

면이 평판인 시편 (두께 21mm)을 온도 150/150-190/190°C에서 10°C 간격으로 동일 시간 (12분) 동안 가류한 후 자연냉각 시킬 때, 시편내 여러 지점의 가류도를 식(4)에 따라 구하였다. 가류도는 또한 기준 가류도에 대한 퍼센트로서도 나타낼 수 있다. Fig. 6에서 볼 수 있는 것과 같이 시편의 최내부에서는 가류도가 가장 낮고 그 변화가 거의 없지만, 경계면 쪽으로 접근하면 가류도의 증가율이 매우 커지며, 또한 가류온도가 높을수록 위치에 따른 가류도의 차이가 증가하였다. 한편, 시편 중심부에서 동일한 가류도를 얻기 위하여 위 실험과 같은 온도 조건 (150/150-190/190°C)에서

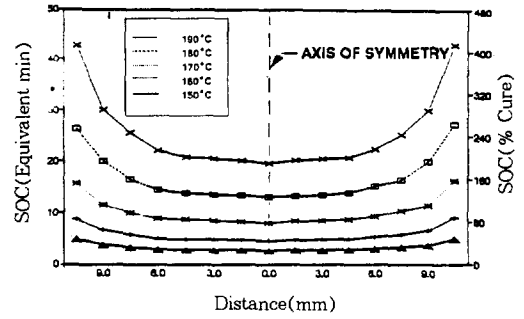


Fig. 6. State of cure (SOC) as the equivalent time and per cent cure inside the rubber plate at the various wall temperatures and the fixed curing time.

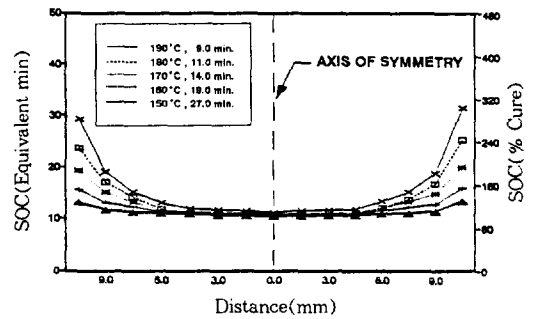


Fig. 7. SOC as the equivalent time and per cent cure inside the rubber plate at the various wall temperatures and the adjusted curing time.

가류시간을 변화시켜가며 (9-27분) 가류 실험을 하였다. Fig. 7에 보인 것처럼 동일한 가류도를 얻기 위해서 가류 온도가 높을수록 시간이 짧았으며, 가류도는 중심부가 가장 낮았다. 또 온도가 상승함에 따라 시편의 중심부와 표면의 가류도의 차이가 증가하였다. 위에서 볼 수 있듯이 온도가 낮을수록 가류시간이 길어지는 대신에 시편 내부에서 균일한 가류도가 형성되는 것을 관찰하였다. 따라서, 고무의 균일한 가류로 양질의 제품을 생산하기 위해서는 저온에서 장시간 가류시키는 것이 바람직하나, 이것은 에너지 효율 및 생산성과 연관되므로 최적 가류온도와 가류시간을 선택하는 것이 좋다고 생각된다.

결 론

타이어의 제조공정에서 결정적인 고무의 가류반응을 규명하는 데 고무의 내부온도 변화를 예측하는 것은 매우 기본적이고 중요한 일이다. 고무의 가열과 자연냉각시에 시편의 실제 온도를 측정하고, 이를 비정상상태 2차원 열전달 경계값으로 추정된 수치해와 비교한 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 온도가 증가함에 따라 시편의 열전도도는 직선적으로 감소하였다.
2. 온도변화에 따른 열전도도 값을 고려한 비정상상태 2차원 모델은 고무를 가류시킬 때 직접 실험을 하지 않고 초기조건, 그리고 system의 물성값 만을 가지고 고무내부의 온도변화를 비교적 잘 예측할 수 있었다. 시편을 가열하거나 자연냉각시킬 때, 비교적 낮은 온도에서는 계산값과 측정값이 다소 차이를 나타냈으나, 온도가 상승함에 따라 계산값과 측정값이 거의 일치하였다.
3. 시편 각 부위 별로 중심부에서 표면 쪽으로 갈수록 가류도가 상승하였고 가류온도가 높을 수록 그 폭은 증가하였다. 따라서 제품의 균일한 가류를 얻기 위해서는 가류온도와 그 시간을 최적화하는 것이 바람직하다.

감사의 글. 이 논문은 1993년도 한국 학술진흥재단의 공모과제연구비에 의하여 연구되었음.

NOMENCLATURE

- A : Cross-sectional area normal to the direction of heat flow (m^2)
- a, b : Constant (-)
- Cp : Heat capacity ($KJ/Kg \text{ } ^\circ C$)
- E : Activation energy of the reaction ($cal/g\text{-mole}$)
- G : Intensity of heat generation which depends on temperature (W/m^3)

- H : Convective heat transfer coefficient ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
- h : Heat transfer coefficient ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
- k : Thermal conductivity ($W/m \text{ } ^\circ C$)
- PHR : Part per hundred of rubber (PHR)
- Q : Rate of volumetric heat generation (W/m^3)
- R : Gas constant ($cal/g\text{-mole K}$)
- r : Reaction rate (equivalent min/min)
- SOC : State of cure (equivalent min)
- t : Time (min)
- T : Temperature ($^\circ C$)
- V : Volume (m^3)
- Δx : Length of node i (m)
- Δy : Length of node j (m)
- Greek letters
- ρ : Density (kg/m^3)
- α : Thermal diffusivity (m^2/sec)
- Subscripts
- a : Ambient
- e : Effective
- f : Film of heating plate
- i : Index of central node
- j : Index of surrounding node
- R : Rubber
- r : Reference
- S1 : Upper plate
- S2 : Lower plate
- t : Final
- w : Heating plate wall

참 고 문 헌

1. S. D. Gehman, *Rubber Chem. Tech.*, **40**, 37 (1967).
2. J. C. Ambelang and G. A. Prentice, *Rubber Chem. Tech.*, **45**, 1195 (1972).
3. Z. Nengli and Y. Danyang, "Simulation of Tire temperature History and Cure Extent in Rubber

- Articles”, p. 930, Heat Transfer Science Tech., 1987.
4. D. Kong, J. L. White, F. C. Weissert, and N. Nakajima, *Rubber Chem. Tech.*, **60**, 140 (1986).
 5. H. P. Schlanger, *Rubber Chem. Tech.*, **56**, 304 (1983).
 6. J. M. Vergnaud, “Process Monitoring and Simulation of Production Process”, International Rubber Conference, Moscow, 1984.
 7. W. J. Toth, J. P. Chang, and C. Zanichelli, *Tire Science and Tech.*, *TSTCA*, **19(4)**, 178 (1991).
 8. W. H. McAdams, “Heat Transmission”, 3rd ed., p. 31, McGraw-Hill, New York, 1954.
 9. P. Vandoren, “Minicomputer Technique for Simulation of Heat Transfer and Cure Level in the Thick Rubber Elements”, p. 398, Kautschuk and Gummi Kunststoffe 37, Jahrgang, Nr., 1984.
 10. J. P. Holman, “Heat Transfer”, 6th ed., p. 635, McGraw-Hill, New York, 1986.
 11. G. A. Prentice and M. C. Williams, *Rubber Chem. Tech.*, **53**, 1023 (1980).
 12. D. Hands, *Rubber Chem. Tech.*, **50**, 480 (1977).
 13. A. Accetta and J. M. Vergnaud, *Rubber Chem. Tech.*, **56**, 689 (1983).