

전선피복용 고무압출가공 공정의 최적 경화 및 선출 속도

김 덕 준 · 최 상 순* · 김 태 호†**
성균관대학교 화학공학과, *(주)극동전선 연구소, **성균관대학교 고분자공학과
(1998년 3월 6일 접수)

Optimum Curing and Full-out Velocity in the Rubber Extrusion Process for Electric Cable Manufacture

Duk joon Kim, Sang Soon Choi* and Tae Ho Kim†**

Dept. of Chemical Engineering, Sung Kyun Kwan University, Suwon, Kyungki 440-746, Korea

**Dept. of Polymer Science & Engineering, Sung Kyun Kwan University, Suwon, Kyungki 440-746, Korea

*Kukdong Research and Development Center, Jincheon, Chungbuk 365-850, Korea

(Received March 6, 1998)

ABSTRACT

In electric cable industries, the curing extent of the rubber materials covering the electric cores gives an significant effect on their final performance. The curing extent of rubber is controlled mostly by pull-out velocity of cable in the extrusion process. The final curing extent may be different for different radial positions inside the rubber because of the non-uniform temperature distributions during the curing process. In this contribution, the prediction of curing extent distribution throughout the radial direction of rubber is represented when the cable is passing through the steam curing zone with a fixed pull-out velocity. The prediction of the optimum pull-out velocity for the desired curing extent distribution is also reported. The steady-state heat balance was developed for the curing and cooling processes in which the pull-out rubber was cured by high temperature steam and then cooled by ambient water. A few essential material properties such as density, specific heat, and thermal conductivity were measured to analyze the temperature distribution during the curing and cooling processes. The times to reach 90% curing extent at varying temperatures were measured and used to determine the final cure extent distribution inside the rubber.

I. 서 론

압출기 또는 고압반응기에 의하여 성형, 경화되는

전선피복용 고무는 그 경화정도에 따라 제품의 물성에 커다란 변화를 가져온다. 경화정도가 다르게 제조된 전선이 수요자에게 공급되어지면 제조된 고무제품의 물성 차이로 인하여 시간이 경과함에 따라 최종 제품 성능이 저하하게 되고 심한 경우에는 제품이 크게 손

†대표저자

상되어 공급자에게 커다란 부담을 주게 된다. 제품의 성능에 대하여 수요자로부터 불평을 받는 많은 경우가 피복고무의 경화정도와 깊이 관계가 되는 바, 이 경화처리과정을 적절히 조절함으로써 제품의 성능과 관계된 많은 문제의 해결이 가능하다.

전선피복용 고무의 압출가공 공정은 크게 두 단계로 나누어지는데¹ 초기 압출에 의해 형태가 갖추어지는 성형공정과 이후 고온, 고압의 수증기에 의해 가황경화되는 경화공정으로 나누어진다. 고무의 물성을 결정하는 경화공정에서는 고온의 수증기에 의해 고무피복물의 외부에서 공급되는 열량이 전선피복물을 통과하면서 그 저항(열전도성)에 따른 온도구배를 고무내부에서 나타내게 된다. 경화공정을 거치면서 고무내부의 위치(선축 방향, 방사선축 방향)에 따라 변화되는 온도는 그 온도에서 일정한 경화도에 도달하는 시간을 결정하는 주요한 인자가 되므로 일정한 선 속도로 압출되는 전선케이블 가공공정에서 실제로 전선을 피복하고 있는 고무의 겉과 속의 가황정도가 크게 달라지게 되고 결국 겉과 속의 커다란 물성의 차이를 가져오게 되는 것이다.

본 논문에서는 전선피복용 고무가 일정한 속도로 선출되는 압출경화공정에서 고온의 수증기로부터 고무내부로 열 공급이 진행됨에 따라 변화되는 피복고무내의 온도를 그 위치에 따라 예측하고, 경화과정 중 온도 변화에 의해 형성된 최종 경화정도를 파악할 수 있으며, 또한 그 반대로 압출 후 고무의 일정한 평균경화정도를 유지하기 위한 압출 선속과 경화조건과의 상관관계를 설정하여 고무압출 가공의 최적 운전조건을 확보할 수 있는 방법을 소개하고 이를 압출기를 이용한 실제 고무경화 과정에 적용해 보았다.

II. 이 론

Fig. 1은 성형용 압출기에서 케이블 형태로 성형이 된 후 L이라는 길이를 가진 경화구간에서 수증기에 의하여 가황경화되며 U라는 속도로 선출 중인 케이블

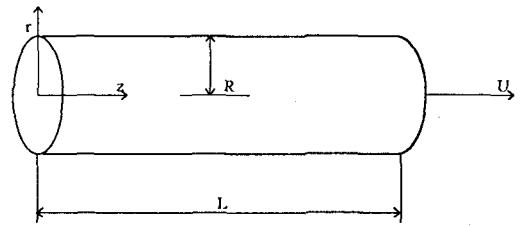


Fig. 1. Schematic of electrical cable of radius R moving with velocity U in the curing zone of length L.

을 나타낸 그림이다. 성형용 전 압출기에서 토출된 전선 케이블은 주위의 고온, 고압의 수증기와 닿게 되고 이때 케이블 표면에서의 고온의 수증기는 시간이 경과함에 따라 일정한 열전달 특성에 의하여 케이블내부로 온도 변화를 일으키게 한다. 즉 압출기에서 케이블이 일정한 속도로 선출될 때 케이블내부의 온도는 케이블의 이동선축인 z와 방사선축인 r의 함수로 나타내어진다. 이러한 열전달 과정은 연속조업 중 정상상태에서 이루어지므로 그 과정을 식으로서 나타내면 식 (1)과 같이 표현되어 진다. 한편, 본 연구에서와 같이 케이블의 외부가 일정한 온도로 유지되는 등온 조업 (isothermal operation)에서 황의 조성이 2PHR 이하이며, 고무피복재의 두께가 작은 경우(본 연구의 경우 0.124cm)에는 경화반응 중 발생하는 반응열이 온도 변화에 미치는 영향은 무시될 수 있다.²

$$\begin{aligned}
 & \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\
 & = k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서 T는 온도, r은 케이블 방사선축상의 길이, θ 는 회전방향으로의 각도를 나타내고 있으며, ρ 는 고무의 밀도, C_p 는 고무의 비열, 그리고 k는 고무의 열전도도를 나타낸다. 한편 식 (2)에서와 같이 본 경화과정 중 방사선상 또는 회전선상축으로의 고무의 움직임은 없고 선축으로만 U라는 속도를 가지고 움직이고

있으며 선상축으로의 열전도 크기는 수증기로부터 케이블의 내부로 전달되어 오는 방사선축방향의 열전도 크기에 비하여 무시할 수 있을 정도로 적으므로 정상 조업 상태에서 식 (1)은 식 (3)과 같이 간단하게 표현될 수 있다.

$$u_r = 0, \quad v_\theta = 0, \quad u_z = U \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \beta \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (3)$$

여기서 $\beta = \frac{k}{eC_p U}$ 를 나타내며 식 (3)에 대한 경계조건은 식 (4)-(6)과 같다.

$$T(r, 0) = T_i \quad (4)$$

$$\frac{\partial T(0, z)}{\partial r} = 0 \quad (5)$$

$$T(R, z) = T_s \quad (6)$$

세계의 경계조건 중 식 (4)는 압출기(케이블 성형 공정)에서 토출된 케이블이 수증기 경화구간으로 들어가는 경계지점에서 고무의 온도는 r방향의 모든 점에서 압출기에서 나오는 케이블의 온도와 같다는 것을 나타내고 있다. 식 (5)는 케이블의 중심에서는 온도 구배를 보이지 않으므로 r의 변화에 따른 온도 변화가 없다는 것을 식으로 나타낸 것이며, 식 (6)은 케이블표면에서의 온도는 수증기의 온도와 같다는 것을 나타내고 있다. 이때 내부에 위치하는 전선 코어는 구리를 많이 쓰게 되며 이 경우 구리의 열전도도는 고무와 비교하여 매우 크므로 코어 내에서의 온도 구배는 거의 무시할 수 있다.

이제 식 (4)-(6)의 세계의 경계조건을 이용하여 식 (3)의 해를 구하고자 한다. 해를 좀 더 수월하게 얻기 위하여 식 (3)의 온도 T를 T_s 와 T_i 를 이용하여 무차원군으로 표현하여 정리하면 식 (7)과 같이 되고,

$$T^* = \frac{T - T_s}{T_i - T_s} \quad (7)$$

식 (7)을 식 (3)에 치환하여 정리하면 식 (3)은 식 (8)과 같이 나타내어진다.

$$\frac{\partial T^*}{\partial z} = \frac{\beta}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T^*}{\partial r} \right) \quad (8)$$

식 (8)을 변수분리법을 이용하여 식 (9)와 같이 r과 z의 함수인 T를 각각의 개체함수인 X와 Y의 곱으로 표시한 후 이를 식 (10), (11)와 같이 eigenvalues를 이용한 Fourier 변환을³ 이용하면 그 해를 구할 수 있다. 식 (12), (13), (14)는 변수분리 후 식 (4), (5), (6)에 대응하여 설정된 T*의 경계조건이다.

$$T^*(r, z) = X(r)Y(z) \quad (9)$$

$$X(r) \frac{dY(z)}{dz} = \frac{\beta}{r} Y(z) \frac{d}{dr} \left(r \frac{dX(r)}{dr} \right) \quad (10)$$

$$\frac{\beta}{rX} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dX}{dr} \right) = \frac{Y'(z)}{Y(z)} = -\lambda \quad (11)$$

$$T^*(r, 0) = 1 \quad (12)$$

$$\frac{dX(0)}{dr} = 0 \quad (13)$$

$$X(R) = 0 \quad (14)$$

식 (11)~(14)로부터 얻어진 해, 즉 케이블내의 각 위치에 따른 온도 분포는 식 (15), (16)과 같이 Bessel 함수와 지수함수가 포함된 복잡한 형태로 나타내어진다.

$$T^*(r, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left[\int_0^R \xi J_0 \left(z_n \frac{\xi}{R} \right) d\xi \right]}{\left[\int_0^R r \left[J_0 \left(\frac{z_n r}{R} \right) \right] d\xi \right]} J_0 \left(\frac{z_n r}{R} \right) e^{-\beta z_n^2 z / R^2} \quad (15)$$

$$T = T_s + (T_i - T_s) \left[\frac{\sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\int_0^R \xi J_0\left(\frac{z_n \xi}{R}\right) d\xi}{\int_0^R \left[J_0\left(\frac{z_n \xi}{R}\right) \right]^2 d\xi} \right]}{J_0\left(\frac{z_n r}{R}\right) e^{-\beta z_n^2 z / R^2}} \right] \quad (16)$$

식 (15)에서 J_0 는 zero order Bessel 함수이며, z_n 은 $J_0(z)$ 를 0으로 만드는 z 값을 나타낸다. T_i 는 케이블이 경화영역에 인입될 때의 초기온도(성형용 압출기에서 선출되는 케이블의 출구온도), T_s 는 수증기의 온도를 나타낸다.

한편 수증기에 의한 가황영역을 거치면 바로 냉각수에 의한 냉각이 시작되는데 이 냉각영역에서의 위치에 따른 케이블온도 변화는 식 (17)과 같이 식 (16)과 비슷한 식으로 표현된다.

$$T = T_w + (T_i - T_w) \left[\frac{\sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\int_0^R \xi J_0\left(\frac{z_n \xi}{R}\right) d\xi}{\int_0^R \left[J_0\left(\frac{z_n \xi}{R}\right) \right]^2 d\xi} \right]}{J_0\left(\frac{z_n r}{R}\right) e^{-\beta z_n^2 z / R^2}} \right] \quad (17)$$

여기서 T_w 는 냉각수의 온도를 나타낸다.

III. 실험

경화과정 중 온도변화, 경화정도의 변화 등을 파악하는데 필요한 여러 종류의 전선 피복용 고무의 물성을 몇 가지 실험을 통하여 결정하였다. 고무의 비열, C_p 은 시차 주사열량계(Differential Scanning Calorimetry, Perkin-Elmer Co.)를 이용하여 결정하였으며 140~230℃의 온도범위에서 10℃/min의 승온속

Table 1. Formulation of N 5-3 Rubber Compounding

Materials	Composition(PHR)
SM R-L	50
SBR-1502	50
ZNO	5
St	2.5
PW	2
Anti 654	1.5
RD	1.2
CTPI	0.6
CaCO ₃	80
White clay	50
Mistarone	30
FEF	30
N-2 oil	10
M	1.65
DM	1.65
S	1.2

도로 질소분위기하에서 측정하였다. 열전도도, k ,는 55~230℃의 온도범위에서 KS F 2265⁴의 규격에 따른 열전도도 측정장치를 이용하여 결정하였다. 고무의 밀도, σ ,는 KS M 3016⁵의 규격에 따라 소수점 3자리까지 측정하였다. 한편 고무의 90% 경화시간, T_{90} ,은 130~200℃의 온도범위에서 Rheometer(Model 2000, Myung-Ji Co.)를 이용하여 측정하였다. 위의 여러 물성치를 여러 종류의 고무를 대상으로 측정하였으나 여기서는 그들 중 본 연구의 모사대상이 된 N 5-3의 배합비를 Table 1에 나타내었다. 참고로 경화 후 N 5-3는 인장강도와 연신률이 각각 1.03kg중/mm², 410%인 기계적 특성을 나타내었다.

IV. 결과 및 토론

1. 전선피복용 고무재료의 물성

Table 2와 3은 여러 전선피복용 고무재료의 열전도도와 비열을 온도의 함수로 나타낸 것이다. 열전도도는 고무의 종류에 관계없이 온도가 증가함에 따라 증가하는 거동을 보이고 있는 반면 비열은 대체적으로

140~200℃의 온도범위에서는 온도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이다가 고온에 이르러서는 증가속도의 감소로 인하여 200℃ 이상의 온도에서는 거의 일정한 값을 갖는 거동을 보이고 있다. 한편 온도변화에 따른 고무의 밀도는 상온에서 측정된 값을 기준으로 일반적인 고무의 열팽창계수인 $220 \times 10^{-6} \text{cm}^3/\text{cm}^3/\text{℃}$ 를 도입하여⁶ 보정하여 줌으로서 온도 변화에 따른 밀도 거동을 예측하였다. 본 논문에서 모사대상으로 삼은 고무의 종류는 N 5-3로서 상온에서의 밀도는 0.9로 측정되었다. 또한 Table 4에서는 여러 고무재료의 경화 온도에 따른 90% 경화시간을 나타내고 있는데 그 거동은 온도의 증가에 따라 지수함수의 형태로 감소하고 있음을 알 수 있었다.

2. 경화공정에 따른 전선피복용 고무내부의 온도 구배 및 경화정도

두 식 (16), (17)로부터 가황작업조건에 따른 케이블내부의 온도 변화를 모사하여 보았다. 본 모사에 필요한 입력인자로서는 경화 및 냉각구간의 길이(가황 경화부분의 길이, 냉각부분의 길이), 케이블의 두께 및 기본물성(고무 피복체의 외경 및 내경, 열전도도, 밀도, 비열), 작업조건(수증기의 온도, 냉각수의 온도, 선출 속도) 등이 해당되며 출력결과로서는 방사 및 선출위치에 따른 온도구배를 얻어낼 수 있었다. 이때 경화온도에 따라 변화하는 고무재료의 기본 물성값들은 Table 2와 3의 온도에 따라 측정된 물성값을

Table 2. Temperature Dependence of Thermal Conductivity for Various Rubber Materials

(Unit : J/cm²Csec)

Mat code Temp.(℃)	N 5-3	N 16	E 28	E 29	N 6	C 18	CSP 114-2	XLPO 8
57.5	0.4100	0.3239	0.2962	0.2856	—	0.3582	0.3671	0.4318
73	0.4052	0.3152	0.2885	0.2764	0.4700	0.3528	0.3573	0.4189
92	0.3820	0.3077	0.2762	0.2675	0.4549	0.3350	0.3458	0.4003

Table 3. Temperature Dependence of Specific Heat for Various Rubber Materials

(Unit : J/g℃)

Mat code Temp.(℃)	N 5-3	N 16	E 28	E 29	C 1-1	C 18	CSP 114-2	XLPO 8
140	1.234						1.265	
150	1.279						1.311	
160	1.328						1.350	
170	1.375						1.396	
180	1.414						1.435	
190	1.465						1.475	
195			1.936					1.732
200	1.494	1.762	1.941	1.822	1.387	1.553	1.522	1.685
205		1.731	1.936	1.828	1.379	1.540		1.719
210	1.533	1.708	1.905	1.811	1.365	1.525	1.541	1.736
215		1.714	1.881	1.800	1.369	1.534		1.723
220	1.554	1.719	1.852	1.786	1.362	1.529	1.547	1.716
225		1.735	1.828	1.778	1.361	1.530		1.703
230		1.734	1.813	1.770	1.354	1.535		1.694

Table 4. Temperature Dependence of T_{90} for Various Rubber Materials

(Unit : second)

Mat code Temp.(°C)	N 5-3	N 16	E 28	E 29	C 1-1	C 18	CSP 114-2	XLPO 8
120							56184	121375
130							49161	69773
135	3520	3740			5116	6109	43153	56860
140	2026	2153	3780	3518	2923	3491	37810	18118
145	1707	1813	3307	3077	2631	3142	31604	16182
150	853	906	2632	2450	1681	2007	4061	10373
155	768	816	2430	2261	1461	1745	3880	8436
160	512	544	1755	1633	1096	1309	3376	2629
165	448	476	1552	1445	950	1135	3210	2252
170	267	283	877	817	548	654	2031	1123
175	245	260	769	716	497	593	1680	977
180	192	204	432	402	402	480	660	540
185	170	181	385	358	307	366	617	481
190	107	113	236	220	182	218	570	295
195	94	100	209	194	153	183	502	261
200					131	157	300	

내삽 또는 외삽하므로써 결정할 수 있었다. 한편 Table 4 즉, 가황경화 온도변화에 따른 90% 경화시간을 기초 데이터로, 가황경화 후 케이블내부의 각 위치에 따른 경화정도를 파악하고 평균화함으로서 수증기의 온도를 변화하였을 때 최적의 압출선속을 결정하여 보았다.

한 예로 Table 2와 3과 같은 기초물성과 Table 4와 같은 경화 특성을 지닌 고무 N 5-3를 Table 5와 같은 작업조건 중 경화 구간(curing zone)에서 가황경화할 때 케이블내부의 각 위치에 따른 온도변화를 조사하여 그래프로 나타낸 것이 Fig. 2이다. Fig. 2는 3차원의 공간그림으로서 온도 T 를 방사선축 방향 r 과 케이블 선축방향 z 의 함수로서 나타내고 있다. 즉, 압출시 케이블을 17m/min의 속도로 당길 때 케이블의 코어를 싸고 있는 고무의 안쪽 반지름 0.376cm에서 바깥쪽 반지름 0.5cm사이에서 $z=0$ 인 지점(성형압출기에서 나오는 지점)의 케이블 온도는 수증기와 접촉하는 외부($r=0.5cm$)를 제외하고는 모두 성형압출 온도인 100°C를 나타내고 있으며 z 가

Table 5. System and Operating Conditions in Curing and Cooling Processes

Pull-out velocity of extruded cable, m/min	17
Length of steam curing zone, cm	4,000
Length of water cooling zone, cm	2,000
Outside diameter of extruded cable, cm	1
Inside diameter of extruded cable, cm	0.752
Steam temperature, °C	200
Cooling water temperature, °C	40
Inlet temperature of extruded cable to the curing zone, °C	100

증가함에 따라 고무 외부로부터 내부로의 열전달로 인하여 내부의 온도가 계속적으로 증가하는 온도구배를 보여주고 있다. 이 경우 경화가 끝나는 지점인 경화구간의 말단 부분에서는 고무의 모든 부위가 수증기의 온도인 200°C를 나타내게 된다. 그러나 고무내부의 각 위치에서 연속적으로 변하는 온도의 영향으로 각 위치에 따라 모두 다른 경화정도를 나타내게 되어 궁극적으로는 각 부위별로 고무물성의 차이를 나타내게 될 것이고 이것이 최종 고무성능을 결정할 수 있는 주

요 요인이 된다. 따라서 경화를 위한 압출과정에 있어서 각 고무내부의 각 위치별로 온도의 변화를 모사하고 이에 따른 경화정도를 파악하는 것이 고무성능의

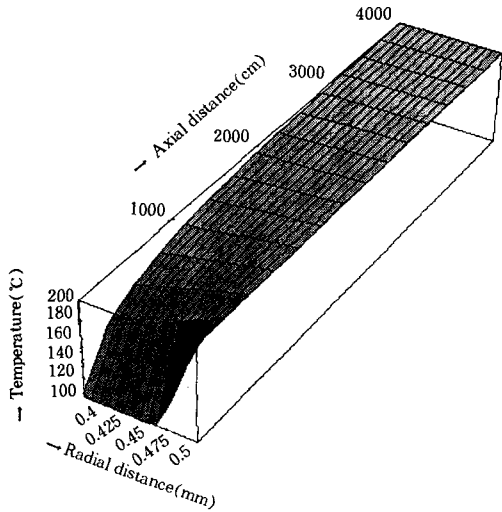


Fig. 2. Temperature distributions of the rubber covering during the cable curing process along the radial and axial directions.

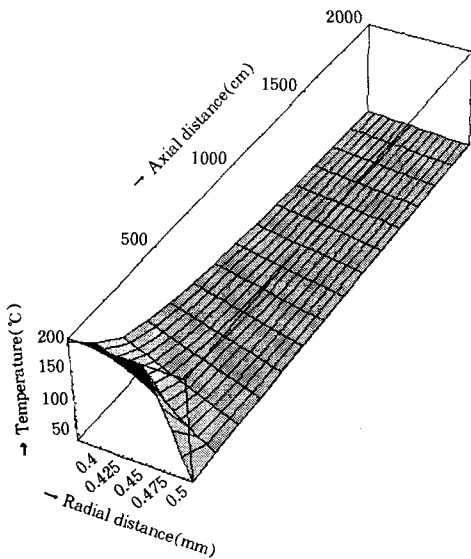


Fig. 3. Temperature distributions of the rubber covering during the cable cooling process along the radial and axial directions.

문제점 파악 및 성능제고 및 생산성 향상을 도모할 수 있는 고무압출 가공의 운전기준을 정할 수 있다는 점에서 매우 중요한 작업이라 할 수 있다.

한편 Fig. 3은 가황경화공정 후 경화된 고무를 냉각시키기 위한 냉각과정에서의 고무내부의 온도변화를 r 과 z 의 함수로 나타낸 그림이다. 냉각과정에서도 역시 고무내부의 온도는 순식간에 냉각수의 온도가 일치되는 온도로 떨어지는 것이 아니라 고무의 성질에 따라 경화용 압출기에서 나오는 고무케이블의 외부가 일정하게 낮은 온도로 유지되는 냉각수와 접촉함으로써 고온의 내부열량이 외부로 전달됨에 따라 피복고무 내부의 각 부위에서 점진적인 온도의 감소가 나타나게 된다. 따라서 이러한 냉각과정 중에도 냉각수의 온도라든지 선출속도에 따라 미소하나마 고무내부의 경화를 유지할 수 있게 된다.

3. 최적 경화도에 따른 최적 선출속도

일정한 온도에서 고무시편의 완전 경화도에 대하여 90%의 경화도를 보일 때의 시간을 T_{90} 이라 하면 각 온도에서의 T_{90} 을 레오메터를 사용하여 얻어낼 수 있다. Table 5에서 사용된 작업 온도를 기준으로 연구 대상이 되는 고무(본 해석에서는 N 5-3)의 T_{90} 데이터를 Fig. 4와 같이 얻을 수 있는 바, 이를 근거로 경

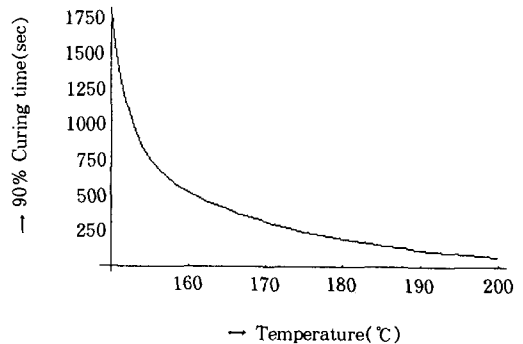


Fig. 4. 90% curing time N 5-3 rubber for varying temperatures. The filled circles indicate the experimental data, and the curve the fitting equation.

화 및 냉각과정 중 일정한 수증기 및 냉각수의 온도에서 선출속도에 따른 최종 경화도를 알아낼 수 있었다. Fig. 4의 T_{90} vs. 온도 데이터를 일치시킬 수 있는 곡선을 식 (18)과 같이 지수형의 식으로 표현하고 이에 해당하는 수식인자를 프로그램에 활용하면 케이블의 방사상의 각 위치에서의 최종 경화도를 구할 수 있다. 즉, 케이블내의 각 지점에서의 온도를 구한 후 z방향으로의 모든 미소 구간에서 앞의 지점에서 다음 지점까지 움직일 때 걸리는 시간과 두 지점사이의 평균 온도를 결정하고 그 시간을 그 온도에서의 T_{90} 으로 나눈 후 이를 모든 미소 구간에서 합함으로써 얻을 수 있다.

$$T_{90} = k_0 + k_1 \exp[-(t-t_0)/t_1] + k_2 \exp[-(t-t_0)/t_2] \quad (18)$$

여기서 $t(^\circ\text{C})$ 는 온도, k_1 와 t_1 (i 는 1 또는 2) 그리고 t_0 는 실험데이터를 일치시키는데 필요한 인자들로써 Fig. 4에선 k_0 와 k_1 , k_2 는 80과 2511, 911.4 t_1 과 t_2 는 12.09, 8,092 그리고 t_0 는 135라는 값들을 얻을 수 있었다.

이를 식으로 나타내면 다음과 같다. 우선 Fig. 5와 같이 i 를 케이블선축 방향으로 N 등분한 점들 1에서 $N+1$ 까지 연속적으로 표현한 grid, j 를 방사선축으로

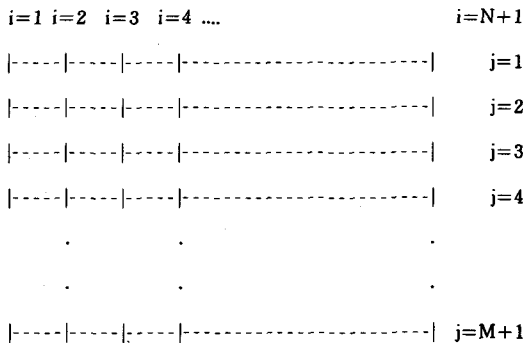


Fig. 5. $(M+1)$ by $(N+1)$ grid matrices for the calculation of degree of curing.

M 등분한 후 각 점들 1에서 $M+1$ 까지 연속적으로 표현한 grid라고 하면, 선축으로 연속되는 각 grid와 grid사이의 평균 온도는 식 (19)와 같이 표현되며 각 구간에서의 미소 경과시간, dt 는 식 (20)와 같이 그리고 그 구간에서의 경화정도는 식 (21)과 같이 미소 경과시간을 그 구간내의 평균 온도에 해당하는 90% 경화시간 T_{90} 으로 나눈 식으로 표현된다. 이제 이렇게 결정된 각 미소 구간에서의 90% 경화시간을 기준으로 한 경화정도(%)를 식 (22)와 같이 압출경화 과정이 끝날 때까지, 즉 모든 미소 구간에 대하여 합하면 이는 케이블의 각 방사선축방향 j 에서의 90% 경화도를 기준으로 한 최종 경화정도를 나타내게 된다.

$$T_{i,j}^{avg} = \frac{(T_{i,j} + T_{i+1,j})}{2} \quad (19)$$

$$dt = \frac{\text{Time}_{tot}}{N} \quad (20)$$

$$d\%curing_{i,j} = \frac{dt}{t_{90}(T_{i,j}^{avg})} \quad (21)$$

$$\%curing_j = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{dt}{t_{90}(T_{i,j}^{avg})} \quad (22)$$

본 시스템에서는 경화 및 냉각구간의 케이블을 z방향으로 60등분, r방향으로 10등분하였으므로 그 결과 얻어진 최종 경화도는 Fig. 6와 같이 r 의 함수로 얻어진다.

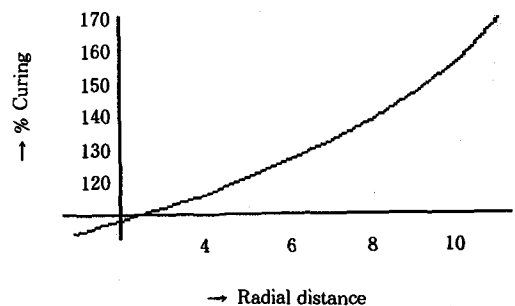


Fig. 6. Final degree of curing as a function of radial distance of rubber.

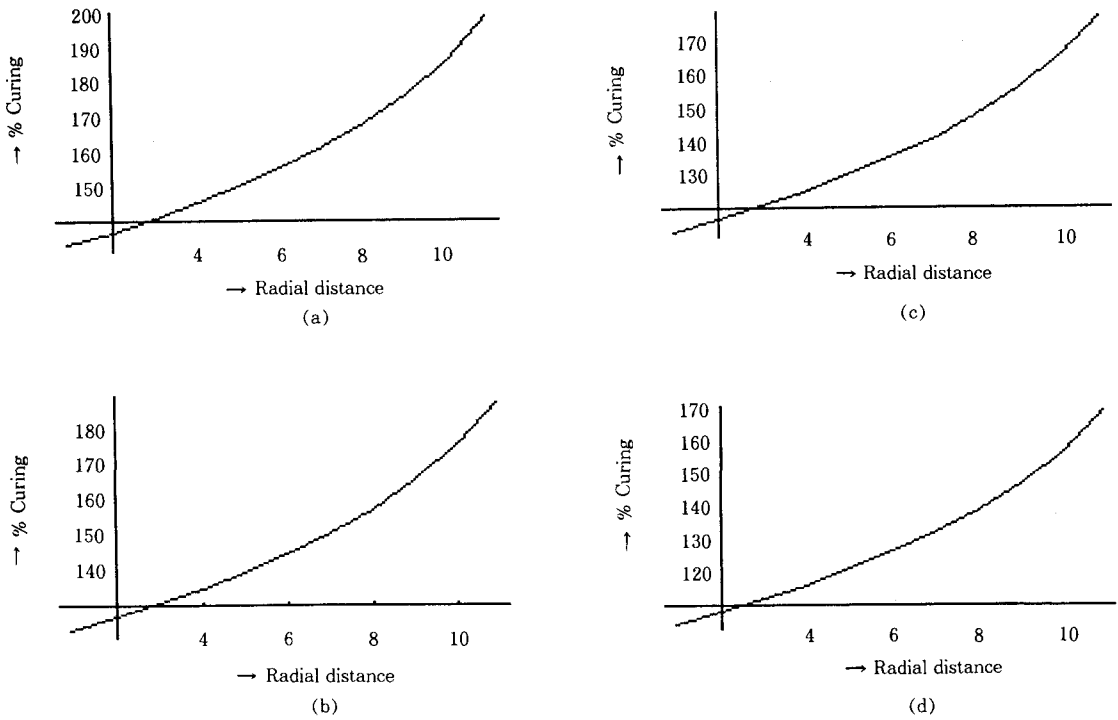


Fig. 7. Optimum full-out velocity for the degree of curing during 95~105% of T_{90} at the inner cable position ; (a) 17, (b) 18, (c) 19, and (d) 20m/min.

또한 어떠한 지점(특히 경화도가 가장 낮아 물성에 큰 영향을 주는 코어와 고무의 경계면)에서 물성상 특정한 경화도가 요구될 때 작업온도에서 그 경화도에 필요한 선출속도가 얼마나 되는지를 계산할 수도 있다. Table 2~5와 같은 고무물성 및 작업조건 그리고 Fig. 4와 같은 경화특성을 가진 고무압출가공 시스템에서 경화정도가 가장 낮을 것으로 예상되는 코어 부근에서의 고무경화도를 수증기 온도에서의 적정경화도인 T_{90} 의 95~105%내에 들게 하기 위한 선출속도를 구해 본 결과 Fig. 7의 (a) 17m/min, (b) 18m/min, (c) 19m/min의 출력과정을 거쳐 (d)에서의 20m/min의 최적 값을 얻을 수 있었다. 즉, 선출속도가 20m/min 미만인 경우에는 고무피복물내부의 모든 위치에서 T_{90} 이상의 충분한 시간동안 경화과정을 거쳤으므로 90% 이상의 경화정도를 보이고는 있으나, 이는 결국 낮은 선출속도로 필요 이상의 경화

정도를 나타내게 되는 결과를 초래함으로써 생산성에 있어서 최적의 운전조건이 될 수 없다는 결론을 내릴 수 있다.

V. 결 론

본문에서는 압출에 의한 전선케이블의 성형가공 공정 이후 경화 및 냉각과정에서 일정한 속도로 선출되는 케이블이 경화 및 냉각매체인 주위의 수증기와 냉각수의 열 공급에 의하여 고무내부의 온도 변화가 일어날 때 이를 고무내부의 방사선 및 선출 위치에 따라 예측할 수 있는 방법을 소개해 보았다. 또한 그 결과로부터 경화 및 냉각과정 중 피복고무 내부의 각 위치에 따른 경화과정 및 그 정도를 예측하고, 더 나아가 수증기 온도를 변화하였을 때 최적경화를 위한 선출속도를 자동적으로 계산할 수 방법 및 그 운영과정을 소

개하였다. 한 예로서 N 5-3라는 고무 피복재를 대상으로 본 모사에 필요한 물성(밀도, 열전도도, 비열)을 측정하고 실제 압출가공에 설정되는 작업조건 하에서 피복고무 내부에서의 온도 변화 및 경화도를 예측해 볼 수 있었으며 또한 원하는 최종 경화도를 달성하기 위한 최적 케이블 선출 속도를 결정할 수 있었다. 본 연구의 결과는 압출에 의해 성형 경화되는 전선제조 산업의 생산성 향상 및 케이블의 성능 향상에 큰 기여를 할 수 있는 기초자료가 되리라 기대된다.

감사의 글

본 연구는 (주)국동전선의 후원아래 이루어졌음을 밝히며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. A. K. Bhowmick, M. M. Hall, and H. A. Benarey, "Rubber Products Manufacturing Technology", pp. 671-686, Marcel Dekker, New York, 1994.
2. G. S. Whitby, C. C. Daveis, and R. F. Dunbrook, "Synthetic Rubber", pp. 395-398, John Wiley & Sons, New York, 1954.
3. P. O'Neil, "Advanced Engineering Mathematics", 4th Ed., Chap. 15 and 16, International Thomson Publishing Co., 1997.
4. KS F 2265, 보온재의 열 전도율 측정방법.
5. KS M 3016, 플라스틱의 밀도 및 비중 시험방법.
6. C. M. Blow and C. Hepburn, "Rubber Technology and Manufacture", 2nd Ed., pp. 346-348, Butterworths, London, 1982.