

전선이중피복용 동심압출 die내의 고분자 물질의 이동현상에 관한 유변학적 해석

박용민 · 박헌진* · 이기준

서울대학교 공과대학 화학공학과

*선경인더스트리 연구소

(1990년 4월 17일 접수, 1990년 11월 26일 채택)

Rheological Analysis of Polymeric Melt Flow in a Coextrusion Wire Coating Die

Yong-Min Park, Hern Jin Park* and Ki-Jun Lee

Department of Chemical Engineering, Seoul National University

*Sunkyoung Industries, R & D Center

(Received 17 April 1990; accepted 26 November 1990)

요 약

LDPE와 PS를 피복물질로 사용하는 전선이중피복 공정에서 동심압출 전선피복 die내에서의 고분자 물질의 유동현상을 Newtonian fluid model과 Carreau model을 사용하여 유한요소법으로 수치해석하였다. 피복물질의 상대적 위치의 바뀜과 조업조건의 변화가 유동장에 미치는 효과를 조사하였으며 고분자 물질의 점성분산에 의한 온도상승을 고려하기 위해서 비등온 해석을 수행하였다. 계면의 위치는 점도가 작은 LDPE가 외층 피복물질로 쓰였을 경우에 die의 외벽 쪽으로 더 접근함을 알 수 있었으며, die내의 전체 압력강하는 점도가 큰 PS가 외층을 이룰 때가 LDPE가 외층을 이루는 경우보다 2배 정도 컸으며 각각 전선속도의 0.40, 0.45승에 비례하여 증가하였다. Die내에서의 최고온도 상승은 충격점 부근의 전선표면에서 생겼으며 이는 전선속도가 증가할수록, 점도가 큰 물질이 전선과 접촉하고 있을수록 더 큰 값을 보였다.

Abstract—This study is to analyze the flow behavior of Newtonian and Carreau model fluids in a coextrusion wire coating die by finite element method. The effects of the change of the relative position of the coating materials and the operating conditions on the flow fields and investigated. A nonisothermal analysis is also carried out to take into account the temperature rise due to viscous dissipation. The interface is positioned closer to the outer die wall when the lower viscous component forms the outer layer. The total pressure drop for the PS/LDPE system is nearly twice as large as that of the LDPE/PS system at the same wire velocity. The wall shear stress increases as the wire velocity increases and the PS/LDPE system has the larger value than the LDPE/PS system for both isothermal and nonisothermal conditions. The maximum temperature and the die exit temperature increase as the wire velocity increases. And the temperature rise due to viscous dissipation of molten polymer is higher when the higher viscous component forms the inner layer.

1. 서 론

동심압출 공정은 물성이 다른 두 고분자 물질을 한 단계로 압출하는 공정으로써, 실제 산업에서 이중섬유, 플라스틱 필름, 튜브 등의 생산이나, 전선피복 공정 등에 많이 사용되고 있다. 동심압출 전선이중피복 공정은 전기적 절연성이 좋은 고분자 물질을 내층으로, 화학적 저항이 강한 물질을 외층으로 도입하여 한 단계로 전선에 피복함으로써 상당한 조업 비용의 절감을 이룰 수 있는 기술이다.

동심압출 공정에서는 일반적인 압출 공정에서 발생하는 문제점 외에도 계면의 불안정성, 계면의 이동 등의 문제점이 발생하며, 한 겹으로 피복하는 공정에 비해 다음과 같은 추가적인 변수를 요한다. 1) 두 피복물질간의 점도비나 탄성비 등의 상대적인 유변학적 성질의 비율, 2) 계면의 위치, 3) 피복 두께비.

이 분야에 대한 연구는 Han, Shetty 등[1-3]에 의해 시작되었으며, 전선피복 공정에 대해서는 Han과 Rao [4]에 의해 시작되었다. Basu[5]는 유한 차분법으로 이 공정에 대해 수치 모사를 하였는데, 전선피복 die는 형태가 복잡하고, 경계조건의 급격한 변화에 따른 응력 특이점의 존재 등으로 인하여 일정한 mesh를 사용하는 유한차분법 보다는 유한요소법이 더욱 효과적이다[6-8].

본 연구에서는 Newtonian fluid model과 Carreau model을 사용하여 PS와 LDPE를 대상물질로 하여 die 내에서의 유동현상을 점도의 온도 의존성을 고려하여 유한요소법으로 수치해석하여 피복물질의 배치의 변화나 유변학적 인자의 변화, 그리고 조업 조건의 변화 등이 유동장과 계면의 위치에 미치는 영향을 연구하였고, 또한 점성분산에 의한 온도 상승을 설명하기 위해 비등온 해석을 수행하였다.

2. 이 론

2-1. 지배방정식

동심압출 전선피복 die내에서의 고분자 용융체의 유동운동을 나타내는 식을 세우기 위해서는 다음의 가정이 필요하다. 1) 유동은 정상상태 유동이며, 2) 중력은 무시하고, 3) 유동은 die의 중심선에 대하여 대칭이며, 4) 유체의 밀도, 열용량 및 열전도도는 일정하며, 5) die 벽과 전선표면에서는 안 미끄러짐(noslip) 경계조건을 적용한다. 이상의 가정하에서 다음의 지배방정식을 얻을 수 있다.

연속식 :

$$\nabla \cdot \underline{V} = 0 \quad (1)$$

운동식 :

$$\rho \underline{V} \cdot \nabla \underline{V} = -\nabla P + \nabla \cdot \underline{\tau} \quad (2)$$

에너지식 :

$$\rho C_p \underline{V} \cdot \nabla T = k \nabla^2 T + \Phi \quad (3)$$

본 연구에서 유변상태식으로는 높은 전단속도에서 점도의 전단박화 현상을 잘 나타내는 다음과 같은 Carreau model을 선택하였다[9].

$$\underline{\tau} = \eta \dot{\underline{\gamma}} \quad (4)$$

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \{1 + (\lambda \dot{\underline{\gamma}})^2\}^{(n-1)/2} \quad (5)$$

점도의 온도 의존성은 다음식을 사용하여 나타내었다.

$$\eta = \eta_0 \exp \{-b(T - T_0)\} \quad (6)$$

2-2. 경계조건

수치모사에 사용된 경계조건은 다음과 같다. 입구에서는 내층과 외층 피복물질이 3:4대 1의 유량비를 가지고 완전 전개된 층류의 형태로 유입되는 조건을 적용하였고, die의 벽과 전선표면에서는 안 미끄러짐 경계조건을 적용하였으며, 계면에서는 응력의 연속성과 수직방향의 속도의 연속성을 적용하였고, 하류에서는 반경 방향의 속도와 축방향의 응력과 열속이 없다는 조건을 적용하였다. 온도에 대한 경계조건은 die 외벽에서는 등온조건, die 내벽과 전선표면에서는 단열조건을 적용하였다.

2-3. 수치모사

유한요소법으로 수치해석하기 위해서 앞의 지배방정식을 Galerkin식화하여 다음의 식을 얻었다.

$$\begin{aligned} \rho < r \psi_j; V_r V_{r,r} + V_z V_{r,z} > + < r \psi_j; r; \\ -P + 2\eta V_{r,r} > - < \psi_j; P > + < \psi_j; 2\eta V_{r,r} > \\ + < r \psi_j, z; \eta (V_{r,z} + V_{z,r}) > = < r \psi_j; \tau_r > \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \rho < r \psi_j; V_r V_{z,r} + V_z V_{z,z} > + < r \psi_j, z; \\ -P + 2\eta V_{z,z} > + < r \psi_j, r; \eta (V_{r,z} + V_{z,r}) > \\ = < r \psi_j; \tau_z > \end{aligned} \quad (8)$$

$$\rho C_p < r \psi_j; V_r T_r + V_z T_z > - < \psi_j, r; k T_r >$$

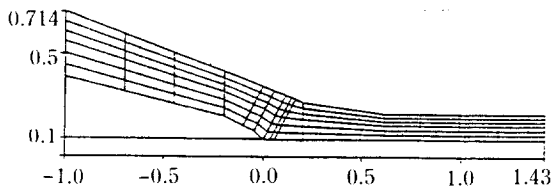


Fig. 1. Wire coating coextrusion die geometry and finite element grid system.

Table 1. Rheological properties of LDPE and PS used in the calculations (at 443°K)

	LDPE ¹⁾	PS ²⁾
Density (g/cm ³)	0.78	0.99
Power-law index	0.45	0.45
Zero-shear rate viscosity (g/cm·sec)	4.1 * 10 ⁴	6.3 * 10 ⁴
Infinite shear rate viscosity (g/cm·cm)	0	0
Heat capacity (erg/g·K)	2.7 * 10 ⁷	2.1 * 10 ⁷
Thermal conductivity (erg/cm·sec·K)	3.3 * 10 ⁴	1.3 * 10 ⁴
Time constant (sec)	0.95	0.49
b value of equation (6)	0.00948	0.03

¹⁾Union Carbide Corp., DYNF-1

²⁾Dow Chemical Co., STYRON 678

$$+ \langle \phi_{j,z}; kT_z \rangle = \langle r\phi_j; \Phi \rangle + \langle r\phi_j; q_b \rangle \quad (9)$$

에너지식을 풀 때는 진동을 줄이기 위해서 upwind 유한요소법을 사용하였다[10, 11]. 수렴판정은 평균 상대오차가 10^{-7} 이하인 범위로 하였으며 산술식계를 풀기 위해서 전선소거법과 연속반복법을 사용하였다. 이 때 계면의 위치는 계면에서의 경계조건을 만족시키는 값을 반복계산을 통해 구하였다.

3. 결과 및 토론

본 연구에 사용된 전선피복 동심압출 die의 형태와 유한요소 격자계는 Fig. 1과 같으며 피복물질로 선택한 LDPE와 PS의 유변학적 성질들은 Table 1에 나타내었다.

3-1. 등온해석

Fig. 2는 전선속도가 100 cm/sec일 때 LDPE가 외층 피복물질인 경우(LDPE/PS계)와, PS가 외층 피복물질인 경우(PS/LDPE계)에서의 유선을 나타낸 것이며, Fig. 3은 이 경우에서의 압력장의 분포를 나타낸 것으

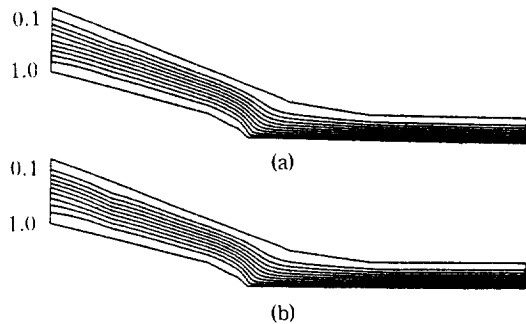


Fig. 2. Streamlines with wire speed of 100 cm/sec (a) LDPE/PS, (b) PS/LDPE system.

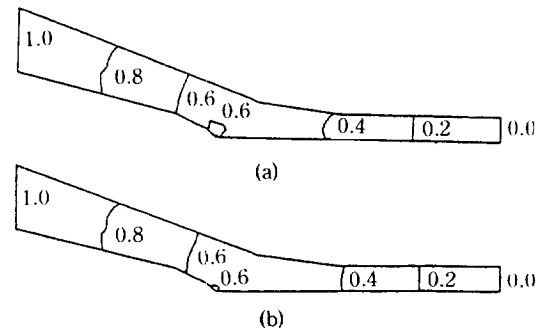


Fig. 3. Pressure distribution with wire speed of 100 cm/sec, the marked values are $P/\Delta P_{total}$ is $1.300 \cdot 10^7$ dyne/cm² for the LDPE/PS system (a), and $2.570 \cdot 10^7$ dyne/cm² for the PS/LDPE system (b).

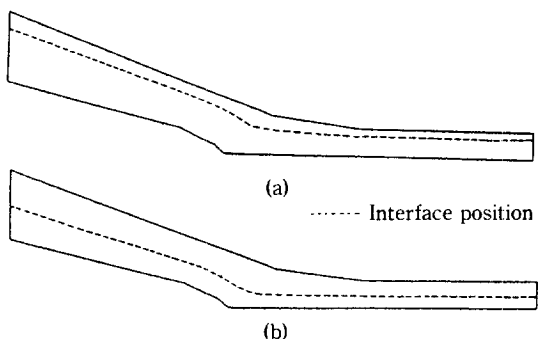


Fig. 4. Interface position along the coating die with wire speed of 100 cm/sec (a) LDPE/PS, (b) PS/LDPE system.

로써 이 두 경우에서 나타나듯이 피복물질의 배치에 바뀌더라도 유선과 압력장은 비슷한 경향을 보임을 알 수 있다.

Fig. 4는 die내에서의 계면의 위치(α)를 나타내는 것

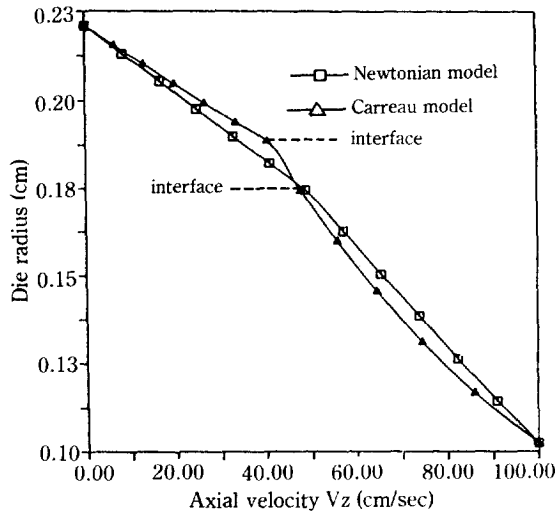


Fig. 5. Comparison of velocity profiles at the die exit between the Newtonian model and Carreau model for the LDPE/PS system with wire speed of 100 cm/sec.

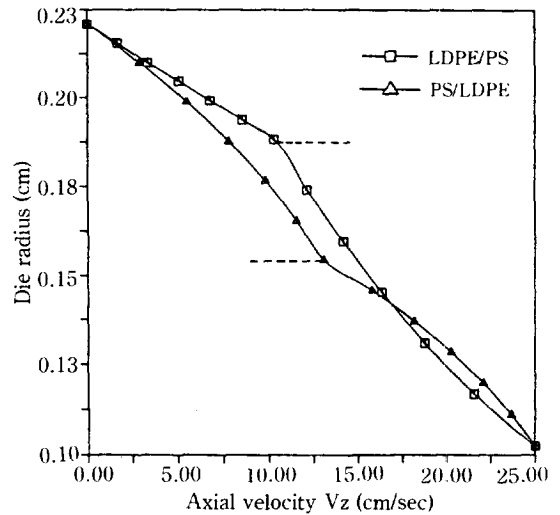


Fig. 7. Comparison of velocity profiles at die exit between the LDPE/PS and the PS/LDPE system with wire speed of 25 cm/sec.

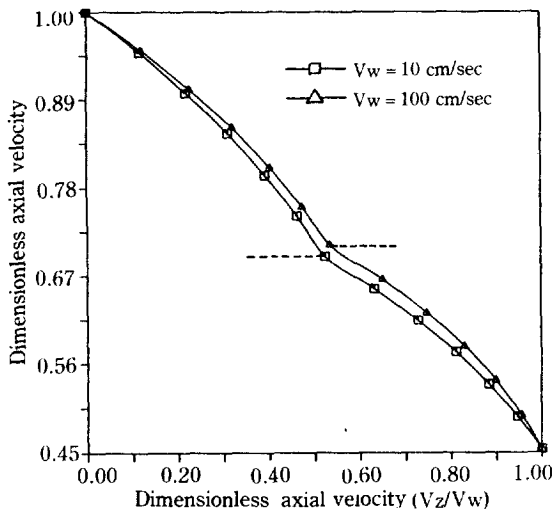


Fig. 6. Velocity profiles at the die exit as function of wire speed for the PS/LDPE system.

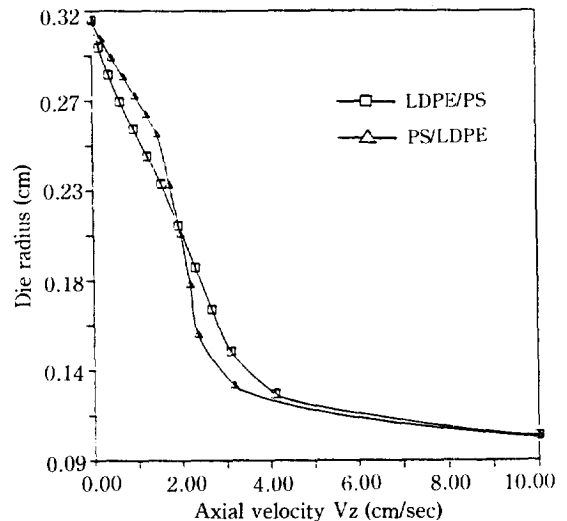


Fig. 8. Comparison of velocity profiles at the impact point between the LDPE/PS and the PS/LDPE system with wire speed of 25 cm/sec.

으로, 무차원화된 α 의 값은 LDPE/PS계에서는 0.725, PS/LDPE계에서는 0.440이었으며, 이 값은 전선속도의 변화에 큰 영향을 받지 않았다. 이 결과는 저점도 물질이 외층을 이룰 때 계면의 위치가 바깥벽 쪽으로 더 접근한다는 Basu의 결과와 잘 일치하였다. 계면은 두 피복물질간의 점도비, 탄성비, 응력비 등이 어떤 임계치를 초과하면 불안정성을 보일 수 있지만 본 연구에서

다른 범위는 이 임계치를 초과하지 않았으므로 계면의 불안정성에 대해서는 고려하지 않았다.

Fig. 5는 LDPE/PS계에서 Newtonian과 Carreau model fluid에 대한 die 출구에서의 속도 프로파일의 비교를 나타내는 것으로 Carreau model이 유체 점도의

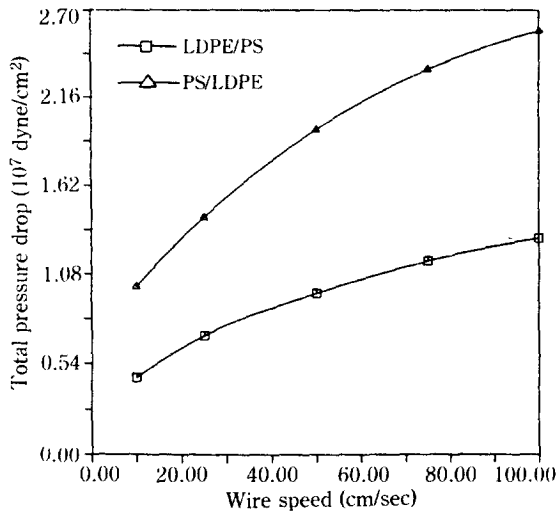


Fig. 9. The change of total pressure drop for various wire speeds.

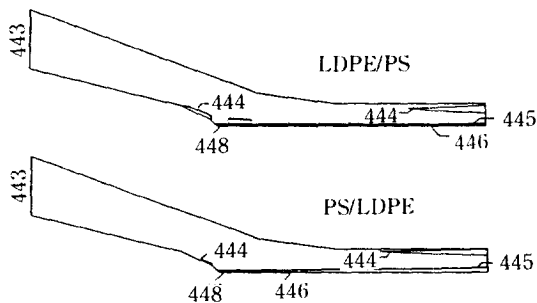


Fig. 10. Comparison of temperature distributions for the LDPE/PS and the PS/LDPE system with wire speed of 25 cm/sec.

전단박화 현상에 의하여 더 평탄한 프로필을 보임을 알 수 있었다.

전선의 속도가 die 출구에서의 속도 프로필에 미치는 영향을 알아보기 위하여 PS/LDPE계를 대상으로 하여 속도가 10 cm/sec일 때와 100 cm/sec일 때를 비교한 결과 전선의 속도는 속도 프로필이나 계면의 위치에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다(Fig. 6). 반면 속도 프로필과 계면의 위치는 피복물질의 배치에 크게 의존함을 알 수 있었다(Fig. 7).

Fig. 8은 고분자 물질이 전선과 만나는 충격점에서의 속도 프로필을 나타내는 것으로써 유체가 전선과 만나는 순간 전선의 속도로 끌리는 모습을 보여주고 있다.

Fig. 9는 전선속도에 따른 전체 압력 강하의 변화를 나타내는 결과로써 전체 압력 강하는 PS/LDPE계와

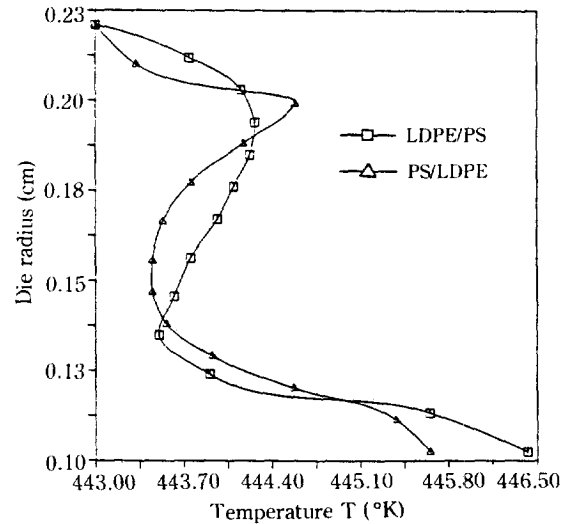


Fig. 11. Comparison of the temperature profile at the die exit between the LDPE/PS and the PS/LDPE system with wire speed of 25 cm/sec.

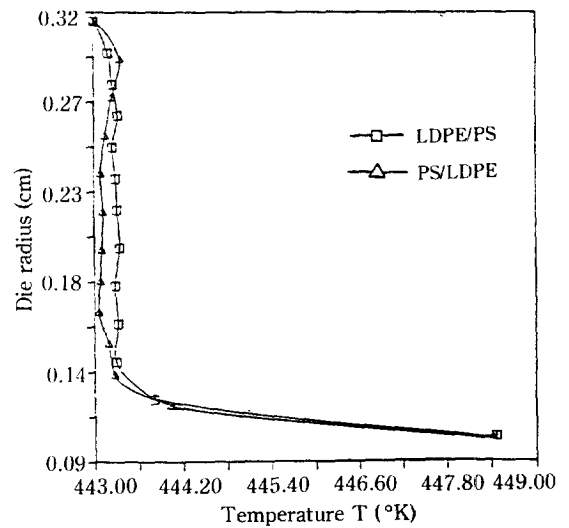


Fig. 12. Comparison of the temperature profile at the impact point between the LDPE/PS and the PS/LDPE system with wire speed of 25 cm/sec.

LDPE/PS계에서 각각 전선속도 증가의 0.4와 0.45 승에 비례하여 증가하였으며 점도가 큰 PS가 외층을 이룰 때가 LDPE가 외층을 이루는 경우보다 더 큰 값을 가짐을 알 수 있었다. 그러므로 점도가 작은 물질을 외층 피복물질로 도입하면 조업비용을 줄일 수 있음을

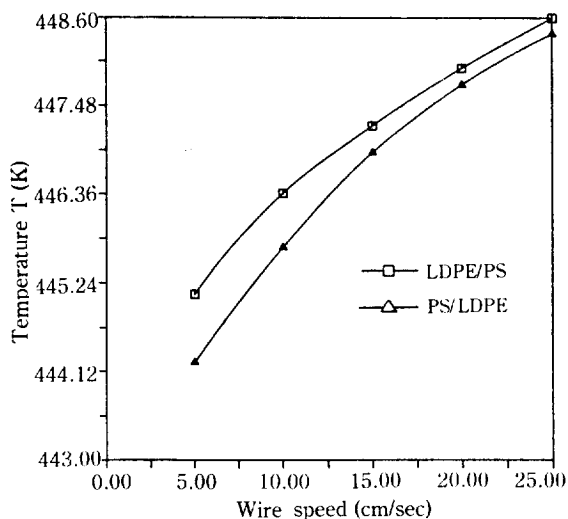


Fig. 13. Comparison of the maximum temperature rise between the LDPE/PS and the PS/LDPE system for various wire speeds.

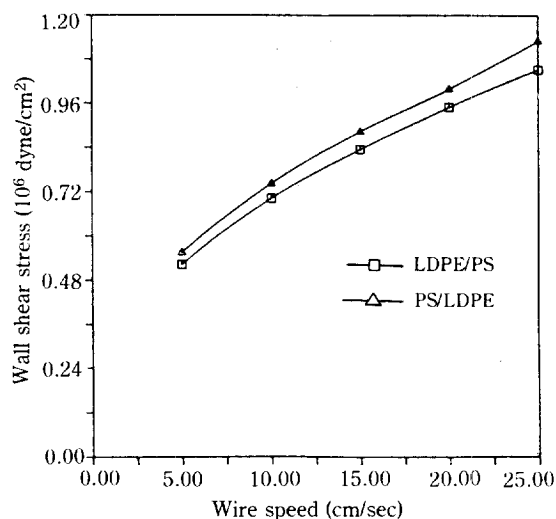


Fig. 15. Outer wall shear stress at the die exit for various wire speeds under nonisothermal condition.

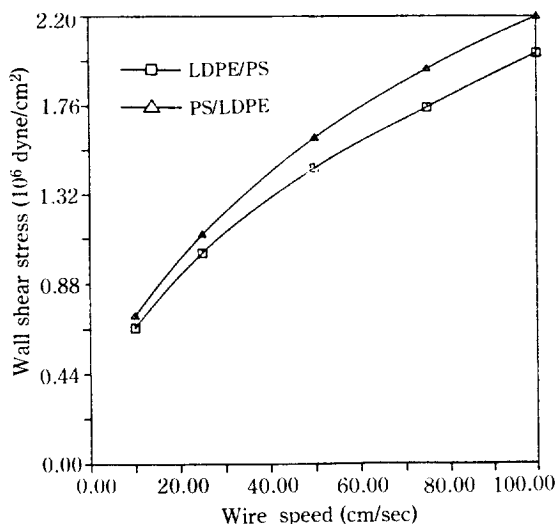


Fig. 14. Outer wall shear stress at the die exit for various wire speeds under isothermal condition.

알 수 있었다.

3-2. 비등온 해석

전선피복 공정에서 점성분산에 의한 온도 상승이 명백하므로 비등온 해석이 요구된다. Fig. 10은 die내에서의 온도 분포를 구한 결과로써 충격점 근처에서 최대 온도 상승이 일어남을 알 수 있었다.

Fig. 11과 12는 각각 출구와 충격점 부근에서의 온도 프로필을 나타내며 Fig. 13은 전선속도와 피복물질의 배치에 따른 die내에서의 최대 온도 상승을 나타내는 것으로써 점도가 큰 물질이 전선과 접촉할 때 온도 상승이 더 커짐을 알 수 있었다. 그러나 온도가 증가함에 따라 점도의 온도 의존성에 의해 PS의 점도가 LDPE의 점도보다 더 큰 비율로 감소하므로 그 차이는 줄어든 경향을 보였다. Fig. 14와 15는 die 출구에서의 외벽 전단 응력을 나타내는 것으로 이 값은 전선속도가 증가함에 따라 증가하며 점도가 큰 물질이 외층을 이룰 때 더 큰 값을 가짐을 알 수 있었다.

4. 결 론

1. 유체의 속도 프로필과 계면의 위치에 전선의 속도 변화는 큰 영향을 미치지 않지만 피복물질의 상대적 위치의 변화는 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.
2. 무차원화 된 계면의 위치 α 는 LDPE/PS계에서는 0.725, PS/LDPE계에서는 0.440이었다. 이로부터 저점도 물질이 외층을 이룰 때 계면의 위치가 die 외벽쪽으로 더욱 접근함을 알 수 있었다.
3. PS/LDPE계에 대한 전체 압력 강하는 LDPE/PS계에서의 값보다 2배 정도 큰 값을 가졌으며 각각 전선속도의 0.4와 0.45승에 비례하여 증가하였다.
4. Die 출구에서의 외벽전단 응력은 전선속도에 비례하여 증가하였으며 PS/LDPE계에서 더 큰 값을 가

졌다.

5. Die내에서의 최대 온도 상승은 충격점 부근의 전선표면에서 생겼으며, 점성이 큰 물질이 내충을 이룰 때 더 큰 값을 가졌다.

NOMENCLATURE

C_p : heat capacity of fluid [erg/g $^{\circ}$ K]
 k : thermal conductivity of fluid [erg/cm \cdot sec $^{\circ}$ K]
 n : power-law index of Carreau model
 P : pressure
 q_b : heat flux normal to the boundary
 T : temperature [$^{\circ}$ K]
 T_o : reference temperature [$^{\circ}$ K]
 t_r : r-component of the contact force vector
 t_z : z-component of the contact force vector
 \underline{V} : velocity vector
 V_r : r-directional velocity [cm/sec]
 V_z : z-directional velocity [cm/sec]
 V_w : wire speed [cm/sec]
 $\dot{\gamma}$: rate of strain tensor [1/sec]
 η : apparent viscosity [poise]
 η_0 : zero shear rate viscosity [poise]
 η_{∞} : infinite shear rate viscosity [poise]
 λ : time constant of Carreau model [sec]
 ρ : density of fluid
 $\underline{\tau}$: stress tensor
 Φ : viscous dissipation function

ϕ_i : linear interpolation function

ψ_i : quadratic interpolation function

REFERENCES

1. Han, C.D.: "Rheology in Polymer Processing", Academic Press, New York (1976).
2. Han, C.D.: "Multiphase Flow in Polymer Processing", Academic Press, New York (1981).
3. Han, C.D. and Shetty, R.: *Polym. Eng. Sci.*, **16**, 697 (1976).
4. Han, C.D. and Rao, D.: *Polym. Eng. Sci.*, **20**, 128 (1980).
5. Basu, S.: *Polym. Eng. Sci.*, **21**, 1128 (1981).
6. Caswell, B. and Tanner, R.I.: *Polym. Eng. Sci.*, **18**, 416 (1978).
7. Mitsoulis, E.: *Polym. Eng. Sci.*, **26**, 171 (1986).
8. Kim, D.P.: M.S. Dissertation, Seoul National Univ., Seoul, Korea (1987).
9. Bird, R.B., Armstrong, R.C. and Hassager, O.: "Dynamics of Polymeric Liquids", 2nd ed., Vol. 1, John Wiley, New York (1987).
10. Christie, I., Griffiths, D.F., Mitchell, A.R. and Zienkiewicz, O.C.: *Int. J. Num. Meth. Eng.*, **10**, 199 (1982).
11. Gallagher, R.H., Zienkiewicz, O.C., Oden, J.T., Cecchi, M.M. and Taylor, C., eds.: "Finite Elements in Fluids", Vol. 3, Wiley, Chichester, England (1978).