報 文

一般報文

(昭和 59 年 9 月 27 日受理)

インフレーション成形のスケールアップ に関する研究*

〔II〕スケールアップの考え方

出光石油化学株式会社商品開発研究所 金井 俊 孝
東京工業大学有機材料工学科 清水 二郎

STUDIES ON SCALE-UP OF TUBULAR FILM EXTRUSION [II] THE SCALE-UP RULE

By Toshitaka Kanai ^{*1} and Jiro Shimizu ^{*2}

^{*1} (Research Center for Products Development, Idemitsu Petrochemical Co.
Ltd., 1660 Kamiizumi, Sodegaura-machi, Kimitsu-gun, Chiba, Japan)

^{*2} (Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology, O-okayama,
2-12-1 Meguro-ku, Tokyo, Japan)

By using the theoretical equations on tubular film extrusion, we presented a scale-up rule for setting the conditions which make the stretch stress constant both in MD (machine direction) and in TD (transverse direction). The rule originated from a concept of the maximum stretch stresses at the frost-line level. The rule was applied to HDPE tubular film extrusion under the different film thickness and width. The melt behavior in tubular process, the orientation factors of films, and the physical properties of films were independent on film width and thickness under the scale-up conditions. That is, the scale-up rule worked well.

We are able to predict the film processability and film physical properties for the large scale tubular film process, once the tubular film extrusion is carried out by using the small scale machine and a small amount of resin.

(Received September 27, 1984)

1. 緒 言

インフレーション成形は、プラスチックフィルムの成形法の中で最も多く利用されており、LDPEをはじめとしてHDPE、L-LDPE、PPおよびPSなどの汎用ポリマーのフィルム成形法として広く用いられている。この成形法は、ブロー比、ドローダウン比、フロストライン高さ、成形温度などの成形条件により、得られるフィルム物性が大きく変化しやすい¹⁻³⁾。前報⁴⁾では、同一

*この報文を「フィルム成形の動力学的研究(第3報), Studies on dynamics of film extrusion (Part 3)」とする。

押出機を用いて広幅フィルムあるいは厚物フィルムを成形する場合、単に広幅あるいは厚物化したのではフィルム物性の低下が起こることを示し、その延伸効果を発現するような条件で成形することが重要であることを示した。

広幅化する場合において、フィルム物性を低下させずに成形することが、重要な検討項目である。また、小型機での成形結果を用いて大型機での成形性およびフィルム物性を予測することは、時間および原料の節約の面から有用で、さらにパイロットプラントで得られた樹脂の少量試験サンプルを評価することにより、生産機への成形予測を行なうことは、原料の改良開発の面から非常に重要である。

こういった状況において、インフレーション成形におけるスケールアップの考え方を確立することは、成形条件とフィルム物性間の関係における多くの疑問を解決し、また小型機および大型機の相関性を把握できることとなり、実験の効率化、少量サンプルによる大型機での成形予測が可能となる。さらには、最適成形条件を把握する上で重要な手段となる。

そこで、本報では、前報⁴⁾での広幅厚物フィルムに関する延伸効果の発現に関する結果を参考にし、インフレーション成形におけるスケールアップの基本的な考え方を検討し、これに基づいて実験を行ない、理論と実験とを比較することにより実際に利用可能なスケールアップの考え方を明らかにする。

2. 理 論

インフレーション成形の理論解析については、最初Alfrey⁵⁾による報告があり、その後PearsonとPetrieら^{6~8)}によって詳細に検討されており、膜理論を用いて動力学的見地から研究が展開されている。これらの理論は、等温ニュートン流体、等温粘弾性流体の場合におけるインフレーション成形の解析を取り扱っている。その後の一連の報告として、HanとPark¹⁰⁾さらにWagnerら^{11,12)}により非等温に関する理論解析を中心とした研究が行なわれ、より実際に近い場合が取り扱われている。

最近では、熱伝達係数や結晶化を考慮し、さらに成形条件を変化させた場合の理論解析が行なわれ、より応用面を重視した研究が、金井、Whiteら^{13,14)}によって報告されている。

インフレーションにおけるスケールアップを考えるには、まずインフレーションに関する理論式を考える必要がある。図1で、1をフィルムの流れ方向(MD)、2を流れと直角方向(TD)、3を厚み方向(ND)とすると、歪速度テンソル $\mathbf{d}$ は非圧縮性流体において、次のように記述される。

$$d_{11} = -\frac{1}{R} \frac{dR}{dt} - \frac{1}{H} \frac{dH}{dz} = \frac{Q \cos \theta}{2\pi RH} \left(-\frac{1}{H} \frac{dH}{dz} - \frac{1}{R} \frac{dR}{dz} \right) \quad (1)$$

$$d_{22} = \frac{1}{R} \frac{dR}{dt} = \frac{Q \cos \theta}{2\pi RH} \left(\frac{1}{R} \frac{dR}{dz} \right) \quad (2)$$

$$d_{33} = \frac{1}{H} \frac{dH}{dt} = \frac{Q \cos \theta}{2\pi RH} \left(\frac{1}{H} \frac{dH}{dz} \right) \quad (3)$$

Q : 吐出量, R : z の位置におけるバブル半径,
 v : バブル速度, H : z の位置におけるバブル厚み,
 θ : バブルと z 軸とのなす角

Fig. 1. Schematic of blown film process

MDの延伸応力を σ_{11} 、TDの延伸応力を σ_{22} さらに厚み方向の延伸応力を σ_{33} とすると、応力と歪み速度の関係式は、ニュートン流体の仮定下では一般に式(4)が成り立ち、さらにバブル表面においては $\sigma_{33}=0$ が成り立つので、式(5)および式(6)が得られる。

$$\sigma_{ij} = -P \delta_{ij} + 2\eta_0 d_{ij} \quad (4)$$

$$\sigma_{11} = -P + 2\eta_0 d_{11} = 2\eta_0 (d_{11} - d_{33}) \quad (5)$$

$$\sigma_{22} = -P + 2\eta_0 d_{22} = 2\eta_0 (d_{22} - d_{33}) \quad (6)$$

一方、インフレーションバブルの力のバランス式を膜理論^{6~14)}を用いて書き表わすと、次式が成り立つ。

$$F_L = 2\pi RH\sigma_{11} \cos \theta + \pi (R_L^2 - R^2) \Delta P \quad (7)$$

$$\Delta P = \frac{H\sigma_{11}}{R_1} + \frac{H\sigma_{22}}{R_2} \quad (8)$$

F_L : バブルの引張り張力, ΔP : バブル内部圧力,

R_1, R_2 : バブルの曲率半径,

R_L : フロストラインにおけるバブル半径($=R_E$)

熱バランス式で、バブルの冷却は、冷却空気による熱伝達および雰囲気とバブルの温度差による放射冷却により行なわれると仮定すると、次式が成り立つ。なお、ここではスケールアップ則の簡略式を得るため、結晶化の項を無視し、熱伝達係数 h をバブル冷却過程で一定とした。

$$\rho C_P Q \cos \theta \frac{dT}{dz} = -2\pi R [h(T - T_A) + \epsilon \lambda (T^4 - T_s^4)] \quad (9)$$

ρ : 熔融樹脂密度, C_P : 樹脂の比熱,

T : バブルの温度, T_s : 雰囲気温度,

T_A : 冷却風温度, h : 熱伝達係数,

ϵ : 放射係数, λ : Stefan-Boltzmann 定数

また、無次元数を下記のように定義した。

$$r = \frac{R}{R_0}, \quad w = \frac{H}{R_0}, \quad l = \frac{z}{R_0}, \quad s = \frac{T}{T_0} \quad (10)$$

R_0 : ダイの半径, T_0 : ダイ出口の樹脂温度
無次元数を用いて、バブルの力のバランス式、熱バランス式を表わすと、次のようになる。

$$\frac{w'}{w} = -\frac{r'}{2r} - \frac{\eta_0 (A + r^2 B) \sec^2 \theta}{2\eta} \quad (11)$$

$$2r^2 (A + r^2 B) r'' = \frac{3r'\eta}{\eta_0} + r \sec^2 \theta (A - 3r^2 B) \quad (12)$$

$$s' = -rC \sec \theta (s - s_a) - rD \sec \theta (s^4 - s_a^4) \quad (13)$$

$$r' = \frac{dr}{dl} = \tan \theta \quad (14)$$

ただし、 w' , r' , s' は、 l に関する w , r , s の一次微分を表わし、 r'' は二次微分を表わす。

$$\frac{\eta}{\eta_0} = 2 \exp \left(E_a \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \right) \quad (15)$$

η_0 : 温度 T_0 におけるゼロ剪断粘度

E_a : 活性化エネルギー E の無次元数, $E/(R_g T_0)$

R_g : ガス定数

上記に用いた無次元数 A , B , C , D は、次式で表わされる。

$$A = \frac{R_0 F_L}{Q \eta_0} - B \left(\frac{R_L}{R_0} \right)^2 \quad (16)$$

$$B = \frac{\pi R_0^3 \Delta P}{Q \eta_0} \quad (17)$$

$$C = \frac{h T_0}{\left(\frac{\rho C_P Q T_0}{2\pi R_0^2} \right)} = \frac{2\pi R_0^2 h}{\rho C_P Q} \quad (18)$$

$$D = \frac{T_0^4 \lambda \epsilon}{\left(\frac{\rho C_P Q T_0}{2\pi R_0^2} \right)} = \frac{2\pi R_0^2 T_0^4 \lambda \epsilon}{\rho C_P Q} \quad (19)$$

ここで、成形性および得られるフィルム物性について、系の大きさによらないスケールアップを考えるには、無次元項 A , B , C , D , E の値が同一になるような成形条件を選定することが、重要なポイントである。

しかしながら、このままでは複雑すぎるので前報⁴⁾での結果を考慮し、フロストライン付近の最大応力が得られるフィルム物性と密接関係があることから、ここではフロストライン付近の応力 σ_{11} および σ_{22} について考える。フロストラインにおいては、バブル径がバブルの最終径と等しくなることから次式が得られる。

$$R_1 = \infty, \quad R_2 = R_L, \quad R = R_L, \\ H = H_L \cos \theta = l \quad \text{at } z = L \quad (20)$$

式(7), (8)に式(20)の関係を代入すると、式(21), (22)が得られる。

$$\sigma_{11} = \frac{F_L}{2\pi R_L H_L} \quad (21)$$

$$\sigma_{22} = \frac{\Delta P \cdot R_L}{H_L} \quad (22)$$

一方、コンピューターシミュレーションによる計算結果から、一般に同一樹脂で、一定ブロー比(R_L/R_0)、一定ドロウダウン比(V_L/V_0)でかつフロストライン高さの無次元数 Z_F/R_0 が一定の条件下では、式(16), (17)の A および B の値はほぼ一定となる。 A , B を用いて ΔP および F_L を求めると次式が得られる。

$$F_L = \frac{[A + B(R_L/R_0)^2] Q \eta_0}{R_0} \quad (23)$$

$$\Delta P = \frac{B Q \eta_0}{\pi R_0^3} \quad (24)$$

上記の条件下では、 $[A + B(R_L/R_0)^2]$ および B/π は一定となる。小型機から大型機へスケールアップする場合に、フロストライン付近の MD および TD に作用する応力は次の関係式が得られる。

$$\sigma_{11} = \frac{[A + B(R_L/R_0)^2]}{2\pi} \cdot \frac{Q \eta_0}{R_0 R_L H_L} \\ = G_1 \frac{Q \eta_0}{R_0 R_L H_L} \quad (25)$$

$$\sigma_{22} = \frac{B}{\pi} \cdot \frac{Q \eta_0 R_L}{R_0^3 H_L} = G_2 \frac{Q \eta_0 R_L}{R_0^3 H_L} \quad (26)$$

G_1, G_2 : 上記条件では定数

ダイ径を k 倍して、折径が k 倍(つまり同一ブロー比)のフィルムを得るには、厚み一定の場合、吐出量は k^2 倍することによりほぼ同一の σ_{11}, σ_{22} が得られる。なお、この場合、樹脂温度を一定に保つ必要がある。また、吐出量を一定に保ったままダイ径および折径を k 倍すると、延伸力は σ_{11}, σ_{22} 共に $1/k^2$ 倍になり、HDPE のような延伸効果の大小でフィルム物性が左右される樹脂では吐出量一定で広幅フィルムにすると、一般にフィルム物性は低下する。

厚みについては、 l 倍にした場合、吐出量を l 倍することにより同一の σ_{11}, σ_{22} が得られ、吐出量を一定のまま保つと延伸応力は σ_{11}, σ_{22} 共に $1/l$ 倍になる。ダイ径 k 倍、厚み l 倍では、同一のフィルム物性を得るには吐出量 $k^2 l$ 倍必要で、吐出量を一定のままに保つと延伸応力は σ_{11}, σ_{22} 共に $1/k^2 l$ 倍になる。なお、この場合、ダイ出口の樹脂温度は一定に保った場合である。

さらに、フィルムのムラを発生させない範囲でダイ出口の樹脂温度を低くすることは、粘度 η_0 に影響するため、延伸応力を増加させ、延伸効果を高める。また、こ

の場合、MD および TD の延伸応力比にはほとんど影響しない。

一方、成形温度、ブロー比、ドローダウン比およびフロストライン高さの無次元項を一定にすると、 A および B はほぼ一定値をとることより、バブル形状はほぼ相似形になることが予想され、成形性も類似していると考えられる。

なお、冷却量については、折径を変化させた場合も平均熱伝達係数 h_{ave} を等しくするように条件を設定する。つまり、フロストライン高さをダイ径に比例した高さになるよう冷却量を合せる。また、厚みを変化させる場合には厚みを厚くした分だけ平均熱伝達係数 h_{ave} を高める必要があり、つまり冷却風量を多くし、フロストライン高さは厚みによらず同一になるよう設定する。

3. 実 験

原料は、高分子量高密度ポリエチレン(MI 0.05, 密度 0.955)である出光ポリエチレン 640 UF を用いた。成形機は、押出機 65 mm ϕ ($L/D=28$, $C/R=3.1$), 50 mm ϕ ($L/D=28$, $C/R=2.6$) および小型試験用押出機 19 mm ϕ ($L/D=25$, $C/R=2.9$) を用い、いずれもメタリング型スクリーを使用した。インフレーション用ダイとしては、スパイラルダイ 17 mm ϕ , 30 mm ϕ , 50 mm ϕ , 60 mm ϕ , 75 mm ϕ , 100 mm ϕ および 120 mm ϕ を使用した。

実験は、理論から得られたスケールアップ則に基づき、小型試験機から 65 mm ϕ 実機成形機までを使用してフィルムを成形し、延伸倍率およびフィルム物性を測定した。インフレーション成形途上のバブル移動速度の測

定^{4, 15, 16)}には、フジカシングル 8zc-1000 の高速 8 ミリカメラを用い、また一点測定では、バブルにタコメーターを直接接触させて測定した。バブル表面温度の測定は、IRCON 社製 CH34 LC 型赤外温度計を使用した。

また、得られたフィルムについての配向測定の簡便法として赤外二色比を用い、測定には日本分光製赤外分光光度計 DS701G 型を用い、広角 X 線写真の撮影には理学電機製 X 線回折装置ローターフレックス RU-200 を使用した。

4. 結果ならびに考察

4.1 折径を変化させた場合のスケールアップ

吐出量一定で折径を変化させた場合、歪速度が変わり、フィルム物性に影響を与えることは前報⁴⁾で述べた。

ここでは、折径と延伸効果の関係を詳細に把握する為、厚み一定条件下で、成形条件をスケールアップの条件に保ちながら折径を変化させる実験を行なった。その実験

Fig. 2. Compared views of the tubular film on the basic condition and that on a scale-up condition

Table 1. Process conditions and film physical properties under the scale up condition

MD/TD																
W	D	M	Q	V	Z	DN / VN	$\left(\frac{DE}{DN}\right) / \left(\frac{VE}{VN}\right)$	$\left(\frac{DE}{DN}\right) / \left(\frac{VE}{VN}\right)$	$\tan \theta_{\max}$	FIS	MDT / TDT	MDT / TDT	Tensile properties			
													TM	YS	TS	TE
120	17	19mmφ	1.4	10.3	105	17/—	4.5/—	*	0.89	4,290	*	同右	10,900/12,200	—/292	693/553	240/330
210	30	50mmφ Extruder	4.4	18.2	185	30/2.4	4.5/7.6	0.59	0.89	3,460	4.6/104	0.044	11,600/13,200	—/268	683/501	200/520
350	50		12.2	30.3	307	51/4.3	4.4/7.1	0.62	0.95	3,960	4.5/74.4	0.060	15,100/14,500	—/320	876/630	160/500
420	60		17.5	36.4	370	60/5.3	4.5/6.9	0.65	0.94	4,040	4.8/69.3	0.069	14,000/14,000	—/315	807/575	190/490
420	60	65mmφ Extruder	17.5	36.4	370	60/5.0	4.4/7.3	0.60	0.93	4,260	4.3/79.2	0.054	13,200/14,100	—/305	780/616	200/520
525**	75		27.3	45.5	460	85/5.6	3.9/8.1	0.48	—	3,080	4.2/81.5	0.052	15,600/16,200	—/317	742/534	130/460
700	100		48.6	60.6	620	100/8.6	4.5/7.0	0.64	0.93	3,970	5.0/72.8	0.069	14,100/14,800	—/319	751/602	160/480
840	120		70.0	72.7	740	120/9.4	4.5/7.7	0.58	1.06	4,030	4.0/83.2	0.048	14,600/14,400	—/280	849/567	130/520

W: Film width (mm), D_0 : Die diameter (mm), M: Process machine, Q: Out-put rate (kg/hr), VN: Bubble velocity at the uppermost of bubble neck (m/min), VE: Take up velocity (m/min), ZF: Frost line height (mm), DE: Bubble diameter at frost line height (mm), DN: Bubble diameter at the uppermost of the bubble neck (mm), FIS: Film impact strength (kg·cm/cm²), MDT: MD Tear strength (kg/cm²), TDT: TD Tear strength (kg/cm²), TM: Tensile modulus (kg/cm²), YS: Yield strength (kg/cm²), TS: Tensile strength at break (kg/cm²), TE: Elongation at break (%), *: Impossibility to measure due to narrow width, **: Diameter of bubble stabilizing equipment was too large.

Fig. 3. Film impact strength as a function of film width on the scale-up conditions

Fig. 4. Tear strength as a function of film width on the scale-up conditions

Fig. 5. Tensile strength as a function of film width on the scale-up conditions

Fig. 6. Relation between film impact strength and film width

条件を図2に、溶融挙動およびフィルム物性の結果を表1および図3～5に示した。

スケールアップの条件とは、式(25)および(26)に基づきある折径の場合を基準とした場合、その k 倍の折径のときには、ダイ径、引取速度、フロストライン高さも k 倍にし、吐出量は k^3 倍に設定することである。また、高ブローの条件下では、成形を安定させるために安定体を使用しているが、バブル安定体の抵抗がフィルム物性に影響するため、この径は、ダイ径にほぼ同一となるように選定し、ダイ出口樹脂温度は一定に保った。

これらの実験の結果、折径を変化させても、スケールアップ条件にすると、延伸倍率、延伸比、延伸速度は同一となり、バブルの形状の代表値 $\tan \theta_{\max}$ もほぼ一定値

をとることがわかる(表1)。

さらに興味あることには、フィルムインパクトも4000 kg·cm/cm前後の値で一定であり、吐出量一定の場合のように折径を大きくすることによるインパクトの低下はみられない。特に今回の場合、折径が120 mmから840 mmまで広範囲において実験を行ないながらこのようなほぼ一定の結果が得られていることから、厚み一定条件下では延伸倍率、延伸比および歪速度を一定に、つまりスケールアップ条件に選定することにより折径によらず、フィルムインパクト値およびMD、TDの引裂強度のフィルム物性はほぼ一定になることがわかった(図3、4参照)。破断強度の結果については、パラツキが大きい、MDの破断強度で若干ながら折径が大きくなるに従い、

多少大きな値をとる傾向にある。TDの破断強度については、その傾向は見られない。これらの結果からスケールアップの考え方に基づいて折径を変更すると、ほぼ同一のフィルム物性が得られており、この考え方はかなり有用であることがわかる。

折径に関する以上の事項をまとめてみると図6のようになる。

つまり、ある吐出量 Q 、引取速度 v 、折径 L の条件に対し、吐出量一定条件下で折径を2倍にすると、図6に示すように直線的にフィルムインパクトが低下するが、吐出量を4倍、引取速度を2倍にすると、折径2倍にしてもフィルムインパクトは変わらないことになる。

また、興味あることに、折径一定条件下では、吐出量および引取速度を増加させることによりフィルムインパクトの向上が期待できることがわかる。

4.2 厚みを変化させた場合のスケールアップ

吐出量一定条件下で厚みを厚くすることは、歪速度を低下させ延伸効果を弱めることを前報⁴⁾で述べた。そこで今回は、厚みを厚くする場合、スケールアップの考え

方に基づき、ダイ出口の樹脂温度を一定に保ちながら引取速度およびダイ出口速度を一定にするようにダイリップ幅および吐出量を変化させて実験を行なった。実験の対応関係は図7に示した。

その実験条件を表2に示した。表に示すように成形条件としては、フロストライン高さ20 mmの差はあったものの、ほぼ計画通りの条件で行なうことができた。

Fig. 7. Compared views of the tubular film on the basic condition and that on a scale-up condition

Table 2. Relation between film thickness and the other parameters

		MD/TD		
Film thickness (mm)		0.021	0.017	0.0125
Die lip clearance (mm)		1.25	1.0	0.75
Die land length (mm)		20	20	20
Process condition	Out-put rate (kg/hr)	58.8	47.6	35.0
	Screw speed (rpm)	86.5	75.0	56.0
	Blow up ratio	4.8	4.8	4.8
	Frost line height (mm)	800	820	820
	Take up velocity VE (m/min)	27.2	27.2	27.2
	V_0 (m/min)	2.18	2.20	2.16
	Draw rate VE/V_0	12.5	12.4	12.6
Deformation parameter	DE/DN	4.5	4.5	4.5
	VE/VN	5.8	5.9	5.9
	$(DE/DN)/(VE/VN)$	0.78	0.76	0.76
	$dV/d\xi$ (sec ⁻¹)	4.2	4.8	4.6
	$\tan \theta$	1.08	1.07	0.93
Temperature distribution		no big difference between three experiments		
Film physical properties	Film impact strength (kg·cm/cm)	2,380	2,350	2,410
	Tear strength (kg/cm)	55/109	58/92.7	61/144
	MD Tear strength/TD Tear strength	0.050	0.063	0.042
	Tensile modulus (kg/cm ²)	12,400/14,300	12,800/14,100	12,900/14,800
	Yield strength (kg/cm ²)	— /334	— /326	334/316
	Tensile strength at break (kg/cm ²)	683/582	666/558	620/533
	Elongation at break (%)	270/530	270/500	260/520

Film width : 900 mm

その結果、次のようなことがわかった。

1) 一般に吐出量一定条件下で厚みを変化させた場合、バブルの形状は異なるが、今回のようにドラフト比一定で厚みを変化させた場合は、バブルの形状および $\tan \theta_{\max}$ も類似している。

Fig. 8. Film impact strength as a function of film thickness on the scale-up condition

Fig. 9. Relation between film impact strength and film thickness

2) 各延伸倍率、延伸比は厚みによらず一定値をとる（これは、吐出量一定の場合と大きく異なる傾向を示している）。

3) バブルの移動速度は同一のパターンをとり、延伸速度（ひずみ速度）の最大値も同一の値をとる。

4) バブルの表面温度は、リップ開度が狭くフィルムの薄いほうが若干高いが、大きな差はない。

5) フィルムインパクトは、若干のバラツキはあるが、各厚みを比較すると厚みが12.5~21.0 μ の範囲内でほぼ同一の値を示す。

6) 破断強度は厚みが厚くなるに従い低下する傾向にあるが、その他の引張特性では大きな差はない。

以上の結果から次のような事項が言える。

今回実験したフィルム厚み(12~21 μ)程度の範囲内では、スケールアップの考え方に基づいて条件を設定すると、延伸倍率、延伸速度はほぼ同一となり、フィルム物性は類似した値を示す。厚みを厚くする場合、それに伴い物性値を低下させないためには、その厚みの増加割合だけ吐出量を増加させ、リップ開度も同様に広くし、引取速度を一定に保つことが必要である。例えば、図9のようにある吐出量 Q 、引取速度 v 、折径 L の条件に対し、吐出量一定条件下で厚みを2倍にするとフィルムインパクトは低下するが、吐出量を2倍、ダイリップ幅を2倍にすると、厚みを2倍にしてもフィルムインパクトは変わらないことになる。

4.3 厚みおよび折径を変化させた場合のスケールアップ

4.1および4.2の結果に基づき、インフレーション小型試験機および実機である50 mm ϕ インフレーション成形機を用い、厚みおよび折径の両方を変化させた各種条件下で成形を行ない、相関性を調べた。ここで用いた2つの成形機の仕様は、表3に示す通りである。

そこで、スケールアップの考え方に基づき、小型試験機の実験条件、および50 mm ϕ 実機成形機の成形条件は、次のように設定した(表4)。

具体的には、それぞれの成形機で8条件ずつ行なった。その条件を表5に示した。なお、実験番号で、Aは実機

Table 3. Specification

	Mini-Tubular film machine	実機50mm ϕ Tubular film machine
Extruder	19 mm ϕ	50 mm ϕ
Die	17 mm ϕ spiral	30 mm ϕ spiral
Die lip clearance	0.61 mm	1.0 mm
Max out-put rate	3.2 kg/hr	22 kg/hr
Max teke-up speed	50 m/min	80 m/min
Diameter of bubble stabilizing equipment	18 mm ϕ	31.5 mm ϕ

Table 4. Comparison of the experimental conditions for the mini-tubular film machine and the 50 mm ϕ tubular film machine

	Mini-Tubular film machine	k or l	50 mm ϕ Tubular film machine
Die diameter (mm ϕ)	17	$k=1.76$	30
Die lip clearance (mm)	0.61	$l=1.64$	1.0
Film width (mm)	L	$k=1.76$	$1.76 L$
Film thickness (μ m)	D	$l=1.64$	$1.64 D$
Out-put rate (kg/hr)	Q	$k^2 l = 5.08$	$5.08 Q$
Take-up velocity (m/min)	V	$k=1.76$	$1.76 V$
Frost line height (cm)	H	$k=1.76$	$1.76 H$

Table 5. Process condition of both 50 mm ϕ tubular film machine and 19 mm ϕ tubular film machine

Experiment No.	Blow up ratio	Film width (mm)	Film thickness (μ m)	Output rate (kg/hr)	Take up velocity (m/min)
50 mm ϕ - Tubular film machine	A-1	4.7	220	15.8	63
	A-2	4.0	188	13.5	63
	A-3	3.5	165	11.9	63
	A-4	3.0	141	10.1	63
	A-11	3.2	150	12.4	80
	A-12	3.2	150	12.4	48
	A-13	3.2	150	12.4	36
	A-14	3.2	150	12.4	29
17 mm ϕ Mini-Tubular film machine	M-1	4.7	125	3.10	36
	M-2	4.0	107	2.65	36
	M-3	3.5	94	2.35	36
	M-4	3.0	80	2.00	36
	M-11	3.2	85	2.45	45
	M-12	3.2	85	2.45	27
	M-13	3.2	85	2.45	20
	M-14	3.2	85	2.45	16.5

Fig. 10. Relation between film impact strength obtained by using 50 mm tubular film machine and that obtained by using mini-tubular film machine

50 mmφ押出機を用いて行なった実験を示し、Mは小型試験機で行なった実験を示している。同一番号の実験、例えばA-1およびM-1は、それぞれスケールアップに対応した成形条件である。

各条件下で成形したフィルムについて、フィルムインパクト値をプロットしたのが図 10 である。この結果から、小型試験機のほうが 50 mmφ成形機より多少フィルムインパクトが高くなる傾向はあるが、ほぼ 1 対 1 に対応がとれている。

次に、小型試験機で行なったバブルの速度パターンと、50 mmφ成形機を用いて行なったバブルの速度パターンについて比較したのが 図 11 である。引取速度の値が異なり、バブルの移動速度パターンでは、一見小型試験機と 50 mmφ成形機となんら対応関係がないように見えるが、速度変化(dv_z/dz)をプロットすると(dv_z/dz)_{max} はほぼ一致している。

また、(dv_z/dz)の曲線には、横軸にダイからの距離をとっているが、経過時間はダイからの距離を移動速度で除した値 $t = z/v$ であるので、興味あることに熔融変形に要した時間は互いに近い値を示しており、経過時間 t と(dv_z/dz)の曲線はお互いに類似した曲線になる。

一方、広角X線写真の比較を図 12 に示した。フィルムインパクトに対応して、同一実験 No. のサンプルは類似した回折パターンを示しており、赤外二色比による配向評価結果からも、ほぼ同一の対応関係が得られた(表 6)。

4.4 スケールアップの考え方のまとめ

スケールアップの考え方に基づき折径および厚みを変化させた結果、フィルムのサイズによらずほぼ同一のフィルム物性が得られた。これらの関係を図示すると、図 13 のよう

Fig. 11 Comparison of mini-tubular film extrusion with 50 mm tubular film extrusion for bubble velocity and bubble deformation rate

Table 6. Orientation factor

	f_α	f_β	f_ϵ	Film impact strength (kg · cm/cm)
A-11	-0.22	-0.28	+0.50	2,070
M-11	-0.20	-0.27	+0.47	2,250
A-13	-0.08	-0.25	+0.33	2,800
M-13	-0.13	-0.22	+0.35	2,750
A-14	-0.04	-0.22	+0.26	3,500
M-14	-0.01	-0.24	+0.25	3,440

Fig. 12. Wide-angle X-ray diffraction patterns of blown films obtained by 50 mm tubular film machine and mini-tubular film machine on the scale-up conditions

Fig. 13. Film impact strength as a function of film thickness and film width

になる。つまり、ある製品に対して、吐出量一定で折径および厚みをそれぞれ k 倍、 l 倍にすると、フィルムインパクト値は f_1 から f_4 に低下する。

また、折径(k 倍)、厚み(l 倍)を共に変化させた場合、種々な外的要因(例えば樹脂の発熱)が付随するが、概略的に物性を同じにするには、吐出量 $k^2 l$ 倍、引速 k 倍、リップ開度 l 倍で行ない、ダイス径は k 倍、また吐出量の増加に対して樹脂の発熱を抑える為に、 $k^2 l$ 倍の吐出量に見合った押出機を用いることが好ましく、また剪断発熱を抑える仕様にする必要がある。

なお、スケールアップ則に従う条件においては、ダイスを出てからの経過時間と歪速度パターンについて同一のパターンを示す。

5. 結 論

インフレーション成形における理論式を用い、フロストライン付近におけるMD, TDの延伸応力を一定となるように、スケールアップの考え方を導入した。これを

用いて、HDPEのインフレーションフィルムの折径および厚みを変化させた場合に適用した結果、フィルムサイズによらずほぼ同一の溶融変形パターンを示し、配向係数およびフィルム物性もほぼ同一の結果が得られることがわかり、理論と実験の一致からスケールアップに関する有用な知見が得られた。

この考え方を用いることにより、広幅厚物フィルムを成形する際の成形性、物性に関する知見が得られ、また小型機での少量サンプルによる評価により、大型機成形時でのフィルム物性の予測手段が得られた。

引用文献

- 1) 岡観太郎, “ポリエチレン樹脂”, 日刊工業新聞, (1973)
- 2) 神谷, 平山, ポリエチレン, **12**, 30 (1968)
- 3) 千野武司, *Plastics Age*, **81** (May, 1970)
- 4) 金井俊孝, 木村正克, 清水二郎, 織学誌, **41**, T-139 (1985)
- 5) T. Alfrey, *SPE Trans.*, **5**, 68 (1965)
- 6) J. R. A. Pearson, C. J. S. Petrie, *J. Fluid. Mech.*, **40**, 1 (1970)
- 7) J. R. A. Pearson, C. J. S. Petrie, *Plastics. Polym.*, **38**, 85 (1970)
- 8) J. R. A. Pearson, C. J. S. Petrie, *J. Fluid. Mech.*, **42**, 609 (1970)
- 9) C. J. S. Petrie, *Rheol. Acta.*, **12**, 92 (1973)
- 10) C. D. Han, J. Y. Park, *J. Appl. Polym. Sci.*, **19**, 3277 (1975)
- 11) M. H. Wagner, *Rheol. Acta.*, **15**, 40 (1976)
- 12) M. H. Wagner, Ph.D. dissertation, University of Stuttgart (1976)
- 13) T. Kanai, J. L. White, *J. Appl. Polym. Sci.* (in press)
- 14) 金井俊孝, J. L. White, 富川昌美, 清水二郎, 織学誌, **40**, T-465 (1984)
- 15) 松村武宣, 長沢俊夫, 高分子論文集, **32**, 573 (1975)
- 16) T. Kanai, J. L. White, *Polym. Eng. Sci.*, **24**, 1185 (1984)