論文

Numerical Analyses of Viscous Flow in a Wire Coating Die

by

Kenichi FUSE and Katsumi ORIMO

(The Furukawa Electric Co., Ltd., 6 Yawata-Kaigandori, Ichihara, Chiba 290)

Numerical analyses of viscous flow in a wire coating die were made for non-Newtonian power-law fluids. The die was divided into three parts with different taper angles along the die axis, and a running wire was located on the axis.

The flow within each volume element was assumed to be the simple shear flow between parallel plates, but the boundary conditions for the total system were set as to fit for the actual geometry of the die. The velocity and stress distributions in the fluid and the tension exerted on the running wire were evaluated with varying combinations of the die geometry and the running speed of the wire. It was found that the shortening of the land length and the lowering of the reduction ratio were essential to realize the high speed coating. The results were supported by some model experiments for a high-molecular-weight high-density polyethylene.

電線被覆用ダイヘッド内における樹脂流動に関する数値解析

布施 憲一・折 茂 勝 己*

(原稿受理: 1976年12月1日)

1. 緒 言

電線絶縁被覆工程は、Fig. 1 に示すように、導体を送り出すサプライ部、予熱機、更には絶縁被覆用の押出機、これに続く冷却水槽および引取機、巻取機により構成される。この被覆工程のライン線速は、近年高速化が進み、実験的には毎分3,000mにも達している^{1),2)}。このように、押出線速が高速化されるに伴い、成型加工上極めて重要な幾つかの問題点が明らかになってきた。それは、(1)押し出された絶縁体の表面に発生する肌荒れ現象(外観の悪化現象)、(2)絶縁押出工程で導体上に働く張力(Back Tension)の増大によって発生する導体径の細り現象である。これらの問題は、いずれも押出機本体に取り付けられたクロスヘッドダイ内での樹脂流動と深いかわり合いを持つと考えられ、高速成形押出に適したダイヘッド部の開発が必要となる。しかしながら、ワイヤーのような移動物体が走行する電線被覆用のダイヘッド内

における樹脂の流動に関する基礎的な研究は十分に成されておらず、その手法も十分には確立されていない。また、これまでに幾つかの数値解析方法も提示されているが、実際に製造現場で評価検討が可能な解析法の誘導は成されておらず、実用性に欠けると考えられる。本報においては、高速絶縁押出に適したダイヘッド部の形状寸法の探索、ならびに絶縁被覆押出における成形加工性と樹脂流動との関連性を明らかにするための一段階として、製造現場で評価測定が可能な実用的なパラメーターによるダイヘッド内の流れに関する表示式(特に、肌荒れ現象の発生、ならびにダイス内を通過するワイヤー上に働く張力の発生に対する推定を行うための速度分布、張力に関する記述式)の誘導を行うことを検討した。

2. 解 析

2・1 絶縁被覆押出

絶縁被覆押出において、押出機本体よりクロスヘッド部へ送り込まれて来た樹脂は、Fig. 2 に示すように、クロスヘッド内でのその流れの方向を90°変更し、ワイヤーをダイ流路部へと導き入れるニップル部外周面流路を経てダイス部へ流入し、ワイヤー上に被覆される。ここでは、流路をその流れを起こさせる駆動力の相違により、次の二つの領域に分けて解析を行った。

Fig. 1. Illustration of telephone wire insulation line.

* 古河電気工業株式会社通信研究部 千葉県市原市八幡海岸通6番地

Fig. 2. Schematic representation of wire coating crosshead and die.

- (i) Die~Nipple 間隙内流路（流れは、圧力流を成すものとする）
- (ii) Die~Wire 間隙内流路（圧力流と牽引流の複合流が考えられる）

この二つの流路は、実際には連続流路であるため、個々の流路を流れる流体は互いに影響し合っていると考えられるが、ここでは解析を簡単にするため、流れを独立流路内の流れとして取り扱う。ところで、前述のように、クロスヘッド部に流入し、その方向を90°変更した後の流れにおいては、押出機側に位置した短い樹脂流路を通して流れて来たものと、それと反対側の長い流路を通して来たものとは、同一断面、同一半径上における流れの速度が異なっていることが予想される。このため、実際の電線被覆用のクロスヘッドにおいては、このような流れにおける不均一さを軽減するため、クロスヘッド内にハート状スリーブとかウェッジリングと称するアダプターを設け、流れの均一化をはかっているが、その効果については確認されていない。本解析においては、このような不均一流動によって誘起される半径方向への流れが、流れ方向のそれと比べて流れ全体に及ぼす影響が小さいとし、解析を簡単にするため前記二つの流路部における流れは、均一流れを成すものとして解析を行った。

2・2 既往の研究

Wire-Coating におけるクロスヘッドダイ内の流れに関する厳密解を得ることは、はなはだ困難である。それは、ダイ内の流れが未だ十分な解析解が得られていない非ニュートン流体の円錐管内流れであるに加えて³⁾、移動物体すなわちワイヤーの存在が問題を更に一層複雑にしているためである。それ故、wire-coating 用のクロスヘッドダイ内を流れる樹脂の流動に関する厳密解を得ようとする試みは、著者の知る限りでは全く行われていない。また、近似解を得ようとする試みも幾つか成されているが、簡便でかつ実用的な関係式の誘導は十分には達成されていない^{4)~6)}。すなわち、これら近似解を得ようとする既往の研究^{4),5)}においては、流れ方向に微細等分割した微小流路内の流れを二重円筒管内の流れと仮定し、円筒座標系を用いてこの問題をとらえようとしている。この場合、式(1)に示すように、

$$\frac{dV}{dr} = \left\{ \frac{1}{2K} \left[\left(\frac{\partial P}{\partial z} \right) r + \frac{c}{r} \right] \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

(V :流速, r :半径, $\partial P/\partial z$:流れ方向への圧力勾配, K, n :べき指数流体の物質パラメーター, c :定数)

運動方程式が複雑で数学的煩雑さを伴い、解析過程において実際には測定が困難なパラメーターである圧力勾配 ($\partial P/\partial z$) を既知関数として与えたり、更にニュートン流体として取り扱うなど、非実用的な解析例が多い。したがって、ここではクロスヘッド内の流れを類推するための関係式を設定する際に、現場での評価測定が可能で、更に簡便で実用的であることの二つの要因が重要であると考え、実用的なパラメーターによる流れの表示式を誘導するため、以下のモデルを用いた。

2・3 仮定

(1) Die~Nipple 間隙部内流れは、実際は非平行な同心テーパ管内流れである。しかし、Fig. 3 に示すように、流れ方向に微細等分割した微小区間においては、ダイス部のテーパ角 γ およびニップル部のテーパ角 β との差による流れへの影響が無視できると考えられること。更には Die~Nipple 間隙部の間隙深さ H_c の曲率半径 r_c に対する比 H_c/r_c が0.2前後であることより、流路端部の流れへの影響が無視できると考え、流れを二枚の平行平板間の流れと仮定する。(2) Die~Wire 間隙部に対しては、流れ軸と α だけ傾いた板と流れ軸に平行でかつ速度 V_0 で移動するもう一枚の板で囲まれた平板間内流れとし、先例同様流れ方向に微細等分化した区間に対しては、ダイス壁面のテーパ角 α の流れへの影響が小さく、かつ H_c/r_c 比が0.2~0.5であることから、この流路に対しても流路端の影響が無視できるとして、流れを二枚の平行平板間の流れと仮定する。(3) 流れは等温、非圧縮性でかつ定常流動を成すものとする。(4) 流体に働く重力等の体積力は無視する。(5) 流れにおいては管壁面上およびワイヤー上での流体の「滑り」はないものとする。(6) ダイ、ニップル、ワイヤー三者の心軸は同一線上にあるものとし、2・1項に記述したように、流れは軸対称の均一流れを成すものとする。

Fig. 3. Cross section of wire coating die, consisting of two convergent channels; (A) clearance between die and nipple, and (B) clearance between die and wire. Die consists of three tapered parts, having angles of 2α , 2γ , and 2ζ each. Taper angle of nipple is 2β . ϵ indicates gap space. d , D and E are radii of wire, die exit, and coated core, respectively.

2・4 運動方程式

Fig. 3 に示したクロスヘッドダイ内の流路を前記仮定により、Fig. 4 に示すような二枚の平板間内流路とし、 xyz 直角座標系を図のように導入する。(ただし、Die~Nipple 間隙部内流れに対しては、Nipple 壁面に沿って一あるいは平行に x 軸を取るのが一般的であるが、本解析においては、流れに関し Die~Wire

Fig. 4. Idealized slit channel. Within a narrow section of width Δx , the die wall and the wire surface are both assumed to be flat and parallel with each other. Coordinate X is in the running direction of wire.

間隙部入口付近と Die~Nipple 間隙部出口付近の 相対的關係を Fig. 3 に示したような形で評価することが可能なように、便宜上、 x 軸を Die~Wire 間隙部の場合と同様に、ワイヤー上に x 軸を取ることにする。) この時、流れ方向に微細等分化した微小区間は、二枚の平行平板とみなされ、流れ方向に直角な y, z 両方向への速度成分は、 x 方向の速度成分に比べて非常に小さいとみなせる。更に流れ方向の速度成分が z 座標と独立であるとすれば、速度 V は、

$$V_x = V(x, y), \quad V_y = V_z = 0 \quad (2)$$

と表すことができる。また、良く知られた運動方程式の x 成分、並びに連続の式はそれぞれ式 (3) および (4) のように表される。

$$\rho \left(\frac{DV_x}{Dt} \right) = - \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) + \rho g_x \quad (3)$$

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (4)$$

ただし、 ρ は密度、 $\frac{D}{Dt}$ は実質微分係数、 $\partial P / \partial x$ は流れ方向への圧力勾配、また、 $\tau_{xx}, \tau_{yx}, \tau_{zx}$ は応力成分、 g_x は体積力の x 成分を表す。ここに、前述の仮定より、 $\rho = \text{const.}$, $g_x = 0$, $\frac{DV_x}{Dt}$, $\frac{D\rho}{Dt} = 0$ 。更に、(2), (4) 両式より応力成分に関して、 $\partial \tau_{xx} / \partial x = 0$, $\partial \tau_{xx} / \partial z = 0$ 。また、流体が「べき指数流体」であると仮定すれば、 K および n を非ニュートン流体の物質パラメーターとして、

$$\tau_{xy} = K \left| \frac{\partial V_x}{\partial y} \right|^{n-1} \frac{\partial V_x}{\partial y} \quad (5)$$

と表されるから、結局、式(3)の運動方程式は、次のように与えられる。

$$- \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[K \left| \frac{\partial V_x}{\partial y} \right|^{n-1} \frac{\partial V_x}{\partial y} \right] = 0 \quad (6)$$

ここで、圧力勾配 $(\partial P / \partial x)$ が y 座標とは無関係であると仮定し、上式を y で二回積分すれば、次の関係式を得る。

$$V_x = \frac{n}{n+1} \left[\frac{1}{K} \left| \frac{dP}{dx} \right| \right]^{\frac{1}{n}} y^{\frac{n+1}{n}} + C_1 y + C_2 \quad (7)$$

ここに、 C_1, C_2 は積分定数である。

2・5 Die~Nipple 間隙内の流れ

式(7)に対する境界条件は、Fig. 5 に示すように、 $y = h_1$ およ

Fig. 5. Geometry of convergent narrow channel of die heads.

び $y = h_2$ で $V_x = 0$ である。この時、式(7)は

$$V_x = \frac{n}{(n+1)(h_2 - h_1)} \left[\frac{1}{K} \left| \frac{dP}{dx} \right| \right]^{\frac{1}{n}} \left[(h_2 - h_1) y^{\frac{n+1}{n}} + (h_1^{\frac{n+1}{n}} - h_2^{\frac{n+1}{n}}) y - h_1 h_2 (h_1^{\frac{1}{n}} - h_2^{\frac{1}{n}}) \right] \quad (8)$$

ここで、 h_1, h_2 は次の幾何学的関係を満足する。

(i) $0 \leq x \leq l'$

$$\begin{cases} h_1 = r + (L' - x) \tan \beta \\ h_2 = D + L \tan \alpha + (l - l') \tan \gamma + (l' - x) \tan \varphi \end{cases} \quad (9)$$

$$h_2 = D + L \tan \alpha + (l - l') \tan \gamma + (l' - x) \tan \varphi \quad (10)$$

(ii) $l' < x \leq L'$

$$\begin{cases} h_1 = r + (L' - x) \tan \beta \\ h_2 = D + L \tan \alpha + (l - x) \tan \gamma \end{cases} \quad (11)$$

$$h_2 = D + L \tan \alpha + (l - x) \tan \gamma \quad (12)$$

いま、 L' は実質的には意味を持たぬ値であるため、これを実用上重要な Die~Nipple 間隔の長さ ϵ で表すことにすると、 L' は次式

$$L' = l - \epsilon - \frac{r - (D + L \tan \alpha)}{\tan \gamma} \quad (13)$$

で与えられる。また、式(8)において、圧力勾配 (dP/dx) は実際上測定不可能な値であり、これを測定可能なパラメーターに変換しなければならない。ここで、Fig. 4 に示された流路において、流路幅 W を一定とすれば、単位幅当たりの吐出量 Q/W は、

$$\frac{Q}{W} = \int_{y_1}^{y_2} V_x dy \quad (14)$$

更に、Fig. 3 より明らかなように、 Q/W は絶縁体半径を E 、導体の半径を d 、ワイヤーの速度を V_0 とすれば、次式で与えられる。

$$Q/W = (\rho / \rho_m) (E - d) V_0 \quad (15)$$

ただし、 ρ_m は温度 $T^\circ\text{C}$ での溶融樹脂の密度で、ここでは次式で

与えられる経験式を用いた。

$$\rho_m = [1.2566 + 0.936(T - 120) \times 10^{-3}]^{-1} \quad (16)$$

したがって、式(14)、(15)の関係を式(8)に代入すれば、Die～Nipple 間隙部における流速 V_x は、次式で与えられる。

$$V_x = \frac{(2n+1) \left[\left(\frac{\rho}{\rho_m} \right) V_0 (E-d) \right] \left[(h_2-h_1) y^{\frac{n+1}{n}} + (h_1^{\frac{n+1}{n}} - h_2^{\frac{n+1}{n}}) y^{\frac{n+1}{n}} - h_1 h_2 (h_1^{\frac{1}{n}} - h_2^{\frac{1}{n}}) \right]}{(h_2-h_1) \left[(h_1-h_2) (h_1^{\frac{n+1}{n}} + h_2^{\frac{n+1}{n}}) + 2n h_1 h_2 (h_1^{\frac{1}{n}} - h_2^{\frac{1}{n}}) \right]} \quad (17)$$

また、ずり速度 $\dot{\gamma}_N$ は、 $\dot{\gamma}_N = \partial V_x / \partial y$ より与えられるから、式(17)の結果より、次のように表される。

$$\dot{\gamma}_N = \frac{(2n+1) \left[\left(\frac{\rho}{\rho_m} \right) V_0 (E-d) \right] \left[\frac{n+1}{n} (h_2-h_1) y^{\frac{1}{n}} + h_1^{\frac{n+1}{n}} - h_2^{\frac{n+1}{n}} \right]}{(h_2-h_1) \left[(h_1-h_2) (h_1^{\frac{n+1}{n}} + h_2^{\frac{n+1}{n}}) + 2n h_1 h_2 (h_1^{\frac{1}{n}} - h_2^{\frac{1}{n}}) \right]} \quad (18)$$

更に、ずり応力 τ_{xy} は、式(18)で求められたずり速度と、実験によって求められる非ニュートン流体の物質パラメーター K とから、式(5)により計算することが可能である。

2・6 Die～Wire 間隙内の流れ

Fig. 5 に示された流路に対し、境界条件は次のとおりである。

$$\begin{cases} y=h(x) & \text{で } V_x=0 \\ y=d & \text{で } V_x=V_0 \end{cases}$$

ここで、 $h(x)$ は Fig. 5 より次の条件を満足する。

$$\begin{aligned} \text{(iii)} \quad L' < x \leq l \\ h(x) &= D + L \tan \alpha + (l-x) \tan \gamma \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \text{(iv)} \quad l < x \leq l+L \\ h(x) &= D + (l-L-x) \tan \alpha \end{aligned} \quad (20)$$

この時、式(7)は次のように表される。

$$V_x = \frac{n}{n+1} \left[\frac{1}{K} \left| \frac{dP}{dx} \right| \right]^{\frac{1}{n}} \left[y^{\frac{n+1}{n}} - h^{\frac{n+1}{n}} + (y-h) (y^{\frac{n+1}{n}} - d^{\frac{n+1}{n}}) (d-h) \right] + \frac{y-h}{d-h} V_0 \quad (21)$$

ところで、(14)、(15) 両式より

$$\frac{n}{n+1} \left[\frac{1}{K} \left| \frac{dP}{dx} \right| \right]^{\frac{1}{n}} = \frac{(2n+1) \left[V_0 (h-d) - \frac{Q}{W} \right]}{h^{\frac{2n+1}{n}} - d^{\frac{2n+1}{n}} - (2n+1) d h (h^{\frac{1}{n}} - d^{\frac{1}{n}})} \quad (22)$$

更に、計算を簡単にするため、 $\lambda = y/h$ 、 $\phi = h/d$ なる無次元量を導入すれば、式(21)の V_x は次のように表される。

$$V_x = \frac{\phi}{1-\phi} \{ F (\lambda^{\frac{n+1}{n}} - 1) \phi^{\frac{1}{n}} (1-\phi) + [1 + F (\phi^{\frac{n+1}{n}} - 1)] (\lambda - 1) \} \quad (23)$$

ここに、 F は次式を満足する無次元量である。

$$F = \frac{(2n+1) \left[\phi - 1 - \frac{\rho}{\rho_m} \left(\frac{E}{d} - 1 \right) \right]}{\phi^{\frac{n+1}{n}} - 1 - (2n+1) \phi (\phi^{\frac{1}{n}} - 1)} \quad (24)$$

また、式(23)よりずり速度 $\dot{\gamma}_D$ は、次式で与えられる。

$$\dot{\gamma}_D = \left[\left(\frac{n+1}{n} \right) F (\phi \lambda)^{\frac{1}{n}} + \frac{1 + F (\phi^{\frac{n+1}{n}} - 1)}{1-\phi} \right] \cdot \frac{V_0}{d} \quad (25)$$

更に、ずり応力は(5)、(25)両式より求められる。

2・7 クロスヘッド内で発生する張力

クロスヘッドのダイス部を走行するワイヤーに発生する張力は、ワイヤーの速度と樹脂の流速との相対的な関係によって決定される。すなわち、ワイヤーの移動速度がそこを流れる流体の速度よりも大きい場合には、明らかに樹脂の流れがワイヤーの走行を妨げることになり、ワイヤーをその長手方向に引き延ばそうとする張力がワイヤー上に働くことになる。このような張力 (Back Tension) は、クロスヘッド部以外にも、絶縁工程の冷却水槽中、および引取機、巻取機においても発生するが、それらはダイヘッド部で発生する張力の約半分以下と小さい。しかしながら、ライン全体としての張力を軽減することが必要で、水槽をはじめとして、ラインの構成要因の検討も現在進められている。ところで、このダイス部で発生する張力を求めるには、まず第一にワイヤー上に働くずり応力を求める必要がある。ここで、先の解析より、ダイス内を移動するワイヤー上でのずり速度 $\dot{\gamma}_w$ は、式(25)において、 $\phi \lambda = 1$ より、

$$\dot{\gamma}_w = \left[\left(\frac{n+1}{n} \right) F + \frac{1 + F (\phi^{\frac{n+1}{n}} - 1)}{1-\phi} \right] \frac{V_0}{d} \quad (26)$$

で与えられる。したがって、(5)、(26)両式により、ワイヤー上に働くずり応力 τ_w は、 $\tau_w = K |\dot{\gamma}_w|^{n-1} \dot{\gamma}_w$ で計算することができる。ところで、ワイヤーの長手方向に微細等分化された微小要素 Δx 上に働く力のつりあいを考えると、要素内のワイヤー表面におけるずり応力を τ_{wr} 、そこに発生する張力を ΔT とすれば、次の関係を満足する。

$$\Delta T = -2\pi d \cdot \Delta x \tau_{wr} \quad (27)$$

ここで、ダイス内を通過するワイヤーの全長は、Fig. 5 より $L + l - L'$ 、更に流路の刻み幅を m とすれば、 $\Delta x = (L + l - L')/m$ より、ダイス内の i 番目の微小区間における張力の増分 ΔT_i は、次式で与えられる。

$$\Delta T_i = K \cdot 2\pi d^{1-n} \cdot \left(\frac{L+l-L'}{m} \right) \cdot \left[\left(\frac{n+1}{n} \right) F + \frac{1 + F (\phi^{\frac{n+1}{n}} - 1)}{1-\phi} \right]^n \cdot V_0^n \quad (28)$$

また、クロスヘッド全体にわたって発生する張力 T は、 $T = \sum_i \Delta T_i$ より計算される。

3. 計算例

これまでの解析により導かれた関係式を用いて行った計算例を以下に示す。計算は、単純な技術計算であるため、卓上型計算機でも可能であるが、時間の都合上、今回は FACOM 230-58 を用いた。刻み幅は、計算誤差を確認したうえで 0.05cm とした。ところで、計算を行うにあたって必要となる樹脂の熔融粘度 K は、ずり速度が 10^4sec^{-1} 以上に対しても測定が可能な特別な Capillary Rheometer を通常の押出機の前部に取り付けて測定した。得られたデータをもとに、最小自乗法によりその流動曲線を決定して、演算に用いた。Fig. 6 に流動曲線の一例を、また Table 1 に計算例として用いたダイ、ニップルの形状、並びに操作条件を

Fig. 6. Flow curve of high density polyethylene for wire insulation (MI 0.4g/10min., density 0.945g/cm³) at 250°C. Measurements were made with a capillary rheometer having length-to-diameter ratio of 30, and diameter of 1.00mm.

Table 1. Geometric parameters of wire coating die.

APPELLATION		KEY	VALUE
DIE	EXIT RADIUS	D	0.035 cm
	LAND LENGTH	L	1.000 cm
	2nd TAPER LENGTH	$l-l'$	0.650 cm
	3rd TAPER LENGTH	l'	0.700 cm
	LAND TAP. SEMI ANGLE	α	3.0°
	2nd TAP. SEMI ANGLE	γ	20.0°
	3rd TAP. SEMI ANGLE	ζ	30.1°
NIPPLE	EXIT RADIUS	γ	0.100 cm
	TAPER SEMI ANGLE	β	20.0°
WIRE RADIUS		d	0.020 cm
INSULATION RADIUS		E	0.033 cm
RESIN	POWER LAW INDEX	n	0.4
	DENSITY	ρ	0.945g/cm³
	MATERIAL TEMP.	T	250°C
DIE~NIPPLE CLEARANCE		ε	0.200 cm
WIRE VELOCITY		V_0	1,000m/min

示す。対象材料は、MI=0.4 (g/10min), density=0.945g/cm³の通信絶縁用の高密度ポリエチレンである。

4. 考 察

4・1 クロスヘッドダイ内における速度分布

Fig. 7 に、Table 1 に記したクロスヘッドダイの Die~Nipple 間隙部内における速度分布、並びに Fig. 8 に Die~Wire 間隙部内における速度分布の計算結果を示した。まず第一に、Die~Nipple 間

Fig. 7. Axial velocity profiles in convergent channel between die and nipple, calculated from eq. (17) at $V_0=1,000\text{m/min}$.

隙部内の流れに関する計算結果は、ダイスおよびニップル両部の寸法形状を実用範囲内で変化させても大きく変化せず、興味ある結果は得られなかった。この結果は、我々がこれまで行ってきた押出実験において、これら Die~Nipple 間隙部の寸法形状が押出特性（例えば、押出物外観の荒れ、導体径の細りなど）には大きく影響しないことからすれば、むしろ妥当な結果であると思われる。しかしながら、本解析においては、Die~Nipple 間隙部内の流れを Die~Wire 間隙部の流れと切り離し、独立流路として取り扱い、更にはクロスヘッド部で流れの方向が 90° 変更されることにより、発生する不均一流動を無視し、流れを均一な一様流れと仮定して取り扱った。押出特性に及ぼすこれらの影響は、例えば導体と絶縁体との偏心問題には重要であり、今後検討されねばならぬ課題である。次に、いま一つの流路である Die~Wire 間隙部の流れに関する計算結果は重要である。Fig. 8 にその結果の一例を示したように、Nipple 部出口付近と Die 出口部付近の流れとは、その様相を異にしており、Nipple 出口部付近に導体の進行方向と逆向きの流れが認められた。この Die~Wire 間隙部内における流れは、押出機本体とダイス出口部との流路間に発生した圧力差による流れ（圧力流）と、導体がダイス内を走行することによって発生する牽引流とによって構成されていると考えられる。

Fig. 8. Calculated axial velocity profiles in 3-deg. convergent channel between die and wire.

が、この種の流れには、押出機に設けられたスクリー内の流れがある。このスクリー内においては、ある条件下で流体に背圧がかかることにより、流路内に逆流が発生する。これより類推すれば、この Die-Wire 間隙内においても、流れの一部に背圧がかかる場合には、計算結果のように逆流の発生は可能となる。また、二重円筒管流れとして解析を行った Fenner⁵⁾ ちも、この逆流の存在を示唆している。しかしながら、電線被覆用のクロスヘッド内の流れを実験的に確認することは、現用のダイヘッドの機構から考えて、かなり困難である。例えば、流れに沿った圧力分布の測定が可能な機構を考慮する必要がある、現時点でこの逆流の有無を確認することは不可能である。また、本解析では、円錐管流れを2枚の平行平板間の流れとしたが、Nipple 出口部付近における前記 H_z/r_z の比が Die 出口部付近の 0.2 に比べ、0.5 と非常に大きいことより、この Nipple 出口部付近の流れに対し、スリット流れを適用することにより発生する誤差は、大きくなることが予想される。したがって、本解析法によって得られた関係式の適用範囲は、厳密には Die 出口部付近に限定されるところであるべきであり、ここに計算された逆流の存在、並びに有意性についてこれ以上言及することは無理であろう。しかしながら、これまでの押出実験によれば、絶縁線の押出特性が、Die と Nipple の相対位置関係を決定する ε に大きく影響されることより、Nipple 出口部付近の流れのプロフィールはかなり重要であり、今後更に一層深い検討解析が必要である。次に、ダイス出口部付近の流れに関する計算結果は、ダイス部の寸法形状に大きく依存する傾向を示した。すなわち、ニップル出口部よりダイス出口部に至るダイランド部の流れにおいては、特にダイス出口部付近の流れが出口径 D 、テーパ角 α 、並びにランド長 L に大きく依存するという結果が得られた。

Fig. 9. Calculated axial velocity profiles in 3-deg. convergent channel between die and wire.

4・2 引落率と速度分布

ダイス部の出口径 D と被覆された後の絶縁体径 E の比で定義される引落率 D/E が押出特性に大きく影響することは、これまでの押出実験でよく経験している。この D/E 比の押出特性に及ぼす影響を類推するために、引落率 D/E と速度分布との関係を検討した。Fig. 8 に $D > E$ なる引き落としをかけた場合と、Fig. 9 に示した $D < E$ の場合とでは、ダイランド部における速度分布の計算結果は異なっている。すなわち、Fig. 8 に示したように、 $D > E$ の引き落としをかける場合には、ワイヤーの移動によって

生じる牽引流が圧力流よりも大きくなり、ダイス内の流れ方向の各位置における最大流速は常にワイヤー上で起こる。したがって、速度分布のプロフィールもワイヤー上で最大値をとり、ダイス壁面に向かって減少していく形をとり、その減少の仕方が、流れ方向に対して、凸形になるか凹形になるかは、 D/E 比、並びに α, L によって決定される。これに対し、被覆される絶縁外径よりも口径の狭い $D < E$ のダイスを用いて押し出しを行う場合には、Fig. 9 に示すように、ダイス出口径が絞られていることにより圧力流が著しく増大し、その結果として、ワイヤーの走行速度よりも大きい速度で流れる流動域が、ダイス出口部付近に発生することが示された。

4・3 肌荒れ現象に及ぼす引落率の影響

純圧力流動を成す毛細管流れにおいては、ある一定のずり速度以上で、被押出物の表面に波を打ったような Shark Skin と呼ばれる肌荒れ現象が発生する。この現象の発生機構は複雑であり、未だ十分な説明が成されていないが^{7),8)}、電線被覆押出においても、押し出された表面に、先の不安定流動と類似した一連の不規則な山と谷をもつ荒れた押出面が観察される。そしてこれまでの経験によれば、絶縁押出において発生する肌荒れ現象に関して、同一材料を温度、線速、並びに他の種々の操作条件を同一として、ダイス部出口径およびダイランド部入口部径以外のすべての寸法形状を同じくしたダイ、ニップルを用いて押し出しを行う場合には、 D/E 比の値が大きいほど——言い換えれば、引落率を大きくすればするほど——外観の荒れは防止できる(ただし、これは発泡絶縁被覆押し出しの場合には必ずしもあてはまらない。これは発泡現象という要因が押出特性に大きく影響するためであり、ここでは充実絶縁線の押し出しに話を限定しなければならない)。いま、 $D > E$ となるような引き落としをかけた状態では、先にも述べたように、流れは牽引流の支配となる。しかしながら、引落率を大きくすればなぜ肌荒れが防止できるかは明らかではない。先の $D > E$ の場合 (Fig. 8) の流れと、 $D < E$ の場合 (Fig. 9) の流れにおけるずり速度の相違を、Fig. 10 に示した。これより明らかなように、

Fig. 10. Calculated variations of shear rate $\dot{\gamma}$ on die wall and wire surface with reduction ratio D/E .

ダイスの出口付近におけるずり速度は、 $D > E$ の引き落としをかけた場合の方が小さく、 D/E の値が大きくなるほどずり速度は小さくなる。ところで、純圧力流動下において発生する脈動等の不安定流動においては、ずり速度が重要な要因であり、このずり速度が小さいほど不安定流動は発生しにくい。したがって、圧力流動下において発生する不安定流動に対して適用されるメジャーをもって、この電線被覆押出において発生する肌荒れ現象を考察すれば、 $D > E$ なる引き落としをかけた方が、ダイス出口部付近における壁面上でのずり速度が小さくなることより、肌荒れは防止しやすいであろう。しかしながら、これですべてが説明される訳ではない。圧力流動下における不安定流動が、 $10^3(\text{sec}^{-1})$ 程度のずり速度で発生するのに対して、電線被覆押出の場合には、Fig. 10 より明らかなように、ワイヤーおよび管壁面上でのずり速度は、 $10^4 \sim 10^6(\text{sec}^{-1})$ と高い流動であり、このオーダーがダイス、ニップル両部の寸法形状を変化させても不変であることより判断すれば、電線被覆押出において発生する肌荒れ現象は、純圧力流動下において発生する不安定流動現象と発生機構が異なっていることが予想される。このように、高剪断流動であるにもかかわらず、純圧力流動に比べて、肌荒れが起こりにくいこと、そして D/E 比が大きいほど——すなわち、牽引流動が増すほど——肌荒れが起こりにくくなる傾向にあること、更に、ダイス出口部において計算される速度分布が、 D/E 比により異なることを考え合わせると、電線被覆押出において発生する「牽引流動」に、これらの問題の糸口が隠されていると思われる。不安定流動に及ぼす牽引流動の影響は、今後更に論議されねばならない。

4・4 クロスヘッドダイ内で発生する張力

4・4・1 引落率と張力

ダイヘッド内で発生する張力 (Back Tension) は、フローパターンに大きく依存する。すなわち、Fig. 8 に示した $D > E$ なる引き落としをかける場合には、前述のように、ダイス内の各位置における最大流速がいずれもワイヤー上で最大となり、それ故、ワイヤーが樹脂を牽引することになり、最大張力発生点はダイス出口部となる。この結果を Fig. 11 に示した。これに対して、

Fig. 11. Calculated tension exerted on wire.

Fig. 12. Calculated tension exerted on wire.

Fig. 9 に示した $D < E$ の操作条件で押出被覆を行う場合には、ニップル側に寄った位置では、 $D > E$ の場合と同様に、最大流速点はワイヤー上にあるが、ダイスの出口部付近においては、ワイヤーの走行速度よりも大きい速度領域が存在する。この場合、そのような位置においては、ワイヤーにかかる張力は負の値（ただし、符号はワイヤーを引き伸ばす方向に張力が働く場合を正とする）となり、ダイス出口よりもニップル側に寄った位置で張力は最大となる。この計算結果は、前記 Riekkinen らの報告²⁾において、同一外径の絶縁線を押出すのに、押出圧を高めた方が発生する張力を低くおさえることができるとする実験結果と一致する。その計算結果を Fig. 12 に示した。

4・4・2 張力の発生と非ニュートン性

溶融高分子の非ニュートン性は、一般的にはべき指数 n で評価することができると言われている。この n 値を大きく変化させることは、樹脂製造工程上困難であり、ポリエチレンの場合には 0.4 前後である。したがって、ここでは n 値の張力発生に及ぼす傾向を知る目的で、 $n=1$ (ニュートン流体) の場合と、 $n=0.1$ の

Fig. 13. Effect of the power law index n on the tension exerted on wire. Parameters in eq. (28): $D/E=1.060$, and $V_0=1,000\text{m/min}$.

非ニュートン性が非常に高いと思われる場合、更に Table 1 の $n=0.4$ の実際的な場合の三つについて計算した。その結果を Fig. 13 に示す。これより明らかなように、樹脂の持つべき指数値は、張力の発生には顕著な影響を与えないことが分かる。また、式(28)より容易に類推されるように、もう一つの非ニュートン性を与える物質パラメーター K は張力の発生には重要であり、 K 値の小さな流動性の良い樹脂を用いることが好ましい。

4・4・3 絶縁被覆押出しの低張力化について

いま、式(28)からも明らかなように、クロスヘッド内で発生する張力におよぼす要因は、Die~Wire 間隙部長さ $L+l-L'$ 、使用樹脂のずり応力 τ_w 、およびワイヤー速度 V_0 である。このうち、ワイヤーの線速に対しては、 V_0^n で $n=0.4$ 程度であることより、発生する張力には、線速そのものは大きく影響しないと考えられる。また、ワイヤーに作用するずり応力 τ_w の影響を小さくするためには、先にも述べたように、非ニュートン流体の物質パラメーター K の小さな樹脂を選定する必要がある。しかしながら、Die~Wire 間隙部の長さ $L+l-L'$ の影響は非常に大きい。特に、ダイランド部の長さ L の影響は重要であり、張力軽減のためには L を小さくする必要がある。すなわち、これまでの考察によりクロスヘッド内で発生する張力を軽減させるためには、(1) K 値の小さい樹脂の選択、(2) Die~Wire 間隙部の長さ——特にダイランド部 L ——を短くする、(3) 牽引流動をおさえ、圧力流動を増大させる（このためには、 D/E 比を小さくする）、などの処置をとることが重要である。ただし、(2) 項および (3) 項にあげた内容は、いずれも先の肌荒れ現象を発生させやすい内容であり、実際には張力並びに肌荒れ両特性を中心に、最適形状を持つダイスの設計が必要となる。このためには、ダイランド部のテーパ角 α を検討することが一つの方法である。Fig. 14 に、テーパ角 α と発生する張力 T の関係を示した。

Fig. 14. Calculated tension exerted on wire as function of semi-angles of die land. Parameters in eq. (28): $D/E=1.060$, $V_0=1,000\text{m/min}$, and $n=0.4$.

4・5 今後への問題点

本解析においては、高速絶縁押出に適したダイヘッド部の設計を行うための第一段階として、ダイヘッド部を流れる流体の速度分布を求め、ダイヘッド内での樹脂の流れを推定することにより、肌荒れ現象防止への一つの考察を加えた。更に、ダイス内を走行するワイヤーに発生する張力を表示する記述式を誘導し、実際の操作条件下での張力の発生を推定する方法を提起した。しかしながら、ワイヤーコーティング用のダイヘッド内の樹脂流動を明ら

かにするためには、速度分布、張力以外に、圧力分布並びに運動方程式の解としての流量を求めねばならない。このうち、圧力分布は式(22)を流路に沿って積分すれば求められるが、積分にあたっては、流路出口部および入口部での境界条件の設定に問題がある。すなわち、Die~Wire 間隙部に対しては、満足させるべき流路入口部での境界条件が不明であること。更に、Die~Nipple 間隙部内に関しても境界条件が未知であり、式(22)を解くことは、はなはだ困難である。また、本解析においては、流れを互いに独立した二つの領域に分けて考えるという便法を用いたが、両領域の境界面における領域の接合を吟味することが必要かつ重要である。この接合をどのような評価関数で与えるかについては、今のところ有効な手段を持ち得ていないが、この接合がうまく評価できれば、二つの領域内を流れる樹脂の流動に関して、相互に及ぼし合う流れへの影響をも含めた流れの表示式が提示できるものと思われる。圧力分布、吐出量の表示式の誘導と合わせて、より厳密な研究検討が望まれる。

5. 結 論

電線被覆押出用のクロスヘッドダイ内における樹脂流動のうち速度分布を記述する表示式、並びにダイス内をワイヤーが走行することによりワイヤー上に発生する張力に関する記述式を誘導し、数値解析を行った。解析では、非平行な同心テーパ状の二重円筒管内の流れに対して、これを流れ方向に微細等分化し、分割された微小流路の流れを二枚の平行平板間の流れとして、指数流体の定常、非圧縮性、等温流れを仮定した。得られた関係式、および数値計算の結果より、ダイヘッド内を流れる流体の速度分布、並びに流れに及ぼす流路形状の影響、更に発生する張力に関する推定を行った。ここに提起した解析方法は、平行平板流れとして取り扱ったことによる幾つかの問題点もあり、現実の電線被覆押出工程における種々の問題点のうちの一部の現象しか説明することができない限定法である。しかしながら、ワイヤーコーティング用のクロスヘッドダイ内を流れる溶融樹脂の流動性を推定すべき実用的な関係式がないと言ってもよい現状からみて、その実用的意味は大きいものと考ええる。

謝辞 本研究遂行にあたり、有益な助言ならびに教示下された京都大学倉田道夫教授、ならびに本解析に熱心に協力された古河電気工業株式会社松永隆、望月肇、島野隆各氏に深謝いたします。また、本研究の発表を許可された古河電気工業株式会社に感謝します。(昭和51年10月29日 第24回レオロジー討論会にて講演)

引 用 文 献

- 1) Rokunohe, M., Y. Ueno, J. Konishi, and M. Okada, *24th. I.W.C.S. Proceedings*, 53 (1975).
- 2) Riekkinen, A. and R. Ekholm, *ibid.*, 43 (1975).
- 3) Oka, S., *J. Phys. Soc. Japan*, **19**, 1481 (1964).
- 4) 伊藤公正, プラスチックス, **24**, 89 (1973).
- 5) Fenner, R.T., *Trans. J. Plastics Inst.*, **35**, 701 (1967).
- 6) 林田建世, 高分子化学, **18**, No. 190, 99 (1961).
- 7) J.P. Tordella, "*Rheology*" Chap. 2 (1969) Academic Press Inc., New York.
- 8) 大柳康, 山口章三郎, 日本レオロジー学会, 第3年会講演予稿集, 5 (1976).