樹脂射出成形の研究*
(第1報, リブにおける熱的局部過収縮現象の実験的研究)

一柳高時**, 中 裕之**, 剣持加津衛***

A Study of the Injection Molding
(1st Report, Experimental Study of the Partial Thermal Shrinkage in the Rib Structures)

Takashi ICHIYANAGI, Hiroyuki NAKA, and Kazuei KENMOCHI

In plastic goods which have rib/boss structures, partial deformation by thermal shrinkage called "Sink Mark", is formed. In this study, to make clear the characteristics of sink mark growth, an experimental approach was taken. By using a T-shaped experimental mold cavity, the amounts of sink mark were compared with each shape parameter and processing parameter. As a result, the pressure on the packing stage and the rib thickness are the most effective to the sink mark growth. When the pressure of the packing stage is small enough (less than 10 MPa), the profile on the upper plate becomes anti-symmetric because of the pressure distribution of the filling stage.

Key Words: Non-metallic Materials, Material Testing, Injection Molding, Sink Mark, P - V - T

1. 緒 言

現在, 樹脂材料は種々の工業分野において広く用いられている。その中で射出成形法は, 最も一般的な成形法の一つである。射出成形過程を大別すると, 充てん・保圧・冷却(収縮)の三つに分けられるが, このうち充てん工程に関しては, Hele-Shaw 流れ⁽¹⁾を仮定し, 樹脂の非ニュートン流動性を考慮した解析手法が提案され^{(2)~(5)}, 充てんのパターンや圧力分布に関し, 実際とかなり良い一致が得られるようになり, 金型設計へも適用されつつある。

一方, 保圧・冷却工程においては, 複雑な樹脂挙動の研究が, 充てん工程に比べて相対的に進んでおらず, 成形品のひけ・収縮・反りなどの現象は, 理論的に十分解明されるに至っていない。このうち, ひけはリブやボスの反対面(表面)に生じる局部的なくぼみを指して言い, 成形条件や, リブ・ボスの寸法形状を変えることで, ある程度その量をコントロールできることが経験的に知られている⁽⁶⁾。しかしながら, その発生機構を理論的に究明しようとした取り組みは, これま

で極めて少ない⁽⁷⁾。

本論文は, T形の断面形状を有するリブモデルの実験金型を用い, リブ厚・天板肉厚などに代表される形状因子, および成形条件をパラメータに選んで種々変化させ, 結果的に生じるひけ量およびその形状に関する相関性を求める。また, 得られた結果をもとに, ひけ量に直接影響を及ぼすパラメータを抽出し, ひけ発生機構とその特質について, 基礎的な考察を加える。

2. 射出成形法

一般の樹脂射出成形法について概説する。図1に, 金型内の典型的な圧力変化を例示する。図2に示す金型キャビティに, 200~260°Cの熔融樹脂が流入し, 充てんが完了した段階で保圧がかけられる。保圧は, 樹脂の圧縮性を利用して, 既充てん状態の金型内に, 更に収縮見込み分の樹脂を注入する工程で, 型内圧は急激に上昇する。一方, 金型は, 温調水管により温度一定となるように調節されており, 樹脂から熱を奪ってこれを冷却させる。保圧工程の終了後, 金型キャビティの樹脂流入口であるゲートが最初に固化し, 外圧がカットされる。以降, 樹脂の冷却と収縮が進行し, 成形品が金型から取り出される。

* 昭和61年10月6日 第64期全国大会講演会において講演。
原稿受付 昭和61年5月1日。

** 正員, 松下電器産業(株) (〒571 門真市松葉町2-7)。

*** 松下電器産業(株)。

3. 実験解析

ひけの発生機構およびその特質・要因を調べるために、実験金型を用いた基礎検討を行った。

3.1 実験金型の構成 本実験に用いた実験金型のキャビティ形状を図3に示す。リブを想定して、キャビティは左右対称のT形の断面形状を有し、天板厚さ h_1 、リブ厚さ h_2 およびリブ長さ b を変化できるように構成されている。型内圧 P は、天板の片側中央部に設定された導圧ピンを介して、圧力センサにより検出し、これをアンプにて増幅・校正して検出する。本装置では、圧力値の測定感度はおおむね ± 0.3 MPaである。また、成形機は日本製鋼所(株)製N 140 B II (Max 140 t)を用いた。

成形されたサンプルは、天板上にひけを生じており、これを表面形状測定装置(タリサーフ)により計測し、定量化したひけ量を求める。ひけ量は、図4に示すように、天板の平坦部を基準にし、ここからの最大落ち込み量 δ (正值)で定義するものとする。

3.2 成形実験とその結果 成形条件および、キャビティの形状因子を種々に選んで成形実験を行い、各条件に対するひけ量を測定することにより、ひけ量

とパラメータとの相関性について検討した。検討内容と実験結果を以下に示す。材料は、エンジニアリングプラスチックとして一般に広く用いられているABSを選んだ。

3.2.1 型内圧およびリブ厚とひけ量との相関

$h_1=2$ mm, $b=10$ mmとし、リブ厚 h_2 を1.5, 2.0, 2.4, 3.0 mmと変化させた時に、初期温度250°Cの樹脂を、金型温度50°Cに設定したキャビティ内に充てんし、加える保圧圧力 P をおおむね10~50 MPaまで変化させた時に生ずる天板上のひけ量を、図5に示す。更に、表面形状測定装置で測定した $P=20$ MPa, $h_2=2.4$ mmでのひけ形状分布を図6に例示する。ひけ量 δ に関しては、図5より、リブ厚が厚くなるほど、また成形(保圧)圧力が小さくなるほど大きくなり、双方のパラメータに関して連続的に変化するが、線形的変化ではないことがわかる。また、天板上のひけ形状は、図6より、特にリブ厚さ h_2 相当の領域で著しく、それ以外の領域においては影響が少ないことがわかる。更に、天板上の端部では、逆方向へのはね上がり現象が見られる。以上のプロフィールに関する特徴は、他の条件下の実験においても、同様の傾向を有している。なお、成形圧力が極めて低く、 P が10 MPa以下となる場合には、図7($P=8$ MPa, $h_2=2.4$ mm)に例示するように、プロフィールの左右対称性が悪くなり、

図1 金型内の圧力変化

図2 金型の構造(模式図)

図3 実験金型の構成

図4 ひけ量 δ の定義

ゲートと反対側が全体的に下がり気味となるが、この傾向は、リブ厚 h_2 を変えても同様に見られる。

3・2・2 天板肉厚の変化とひけ量の相関 天板肉厚 h_1 の寸法をパラメータに選び、1.6~3.0 mm まで変化させた時のひけ量に関して検討した結果を図8に示す。ここでは、成形圧力として P を 28 MPa および 35 MPa とし、リブ厚 h_2 は 1.5 mm 固定とした。図8より、設定範囲内における天板肉厚と、ひけ量との相関は、ほとんど無いとみてよいことがわかる。したがって、ひけ量に対する感度の点からは、リブ厚 h_2 のほうが天板肉厚 h_1 に比較してはるかに大きい。

3・2・3 リブ長さ b とひけ量との相関 図9には、成形圧力 $P=28$ MPa とし、 $h_1=2$ mm、 $h_2=1.5$ mm

とした時の、リブ長さ b に対するひけ量 δ の相関を表す。図9から、リブ長さを 2~20 mm まで変化させても、ひけ量にはほとんど影響しない。

3・2・4 樹脂温度とひけ量との相関 成形圧力を 40 MPa、金型温度を 50°C 固定のまま、樹脂射出温度をパラメータとし、200~260°C まで変化させた時のひけ量について、図10に示す。ここでは、天板肉厚 $h_1=2$ mm とし、リブ厚 h_2 を別に、1.2, 1.4, 1.8, 2.0 mm と変化させた。 h_2 が 1.4 mm 程度と薄い場合には、ひけ量は、樹脂温度に依存せず一定であるが、 h_2 が 1.8~2.0 mm と厚くなると、低温域でひけ量が小さくなる傾向を有している。

4. 考 察

4・1 低成形圧力条件下でのひけの非対称性 3・2・1 項の検討の結果、10 MPa を下回る成形圧力条

図5 リブ厚・成形圧のひけ量依存性

図6 $P=20$ MPa での天板ひけ形状

図7 $P=8$ MPa での天板ひけ形状

図8 天板肉厚 h_1 とひけ量の相関

図9 リブ長さ b とひけ量の相関

図10 樹脂温度とひけ量の相関

件下では、天板上のひけおよび変形プロフィールが、リブを中心として左右対称形状とならず、ゲートと反対側が落ち込んで、全体的に傾いた形状となることが判明した。ここで、まず、本モデルのキャビティ充てん完了時の圧力分布を、樹脂流動解析により求めることにする。樹脂流動解析は、Wang, Hieber らによって提唱された解析手法⁽²⁾を用いる。薄肉キャビティ内の Hele-Shaw 流れ⁽¹⁾を仮定し、熔融樹脂の非ニュートン性を考慮した流れに関する運動方程式〔式(1)、(2)〕および、エネルギーの釣合い式〔式(3)〕から成る基礎式を用いて、精度良く充てん圧力を計算できる。

$$\frac{\partial P}{\partial X} = \frac{\partial}{\partial Z} \left(\eta \frac{\partial U_1}{\partial Z} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial Y} = \frac{\partial}{\partial Z} \left(\eta \frac{\partial V_1}{\partial Z} \right) \dots\dots\dots (2)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + U_1 \frac{\partial T}{\partial X} + V_1 \frac{\partial T}{\partial Y} \right) = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + \eta \left\{ \left(\frac{\partial U_1}{\partial Z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_1}{\partial Z} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、Z 軸をキャビティの肉厚方向に、これと直交する平面に X-Y 軸をとる。また、X 方向、Y 方向の流速をそれぞれ U_1 、 V_1 とし、樹脂の圧力、粘度、密度、比熱、熱伝導率、温度を、各々 P 、 η 、 ρ 、 C_p 、 λ 、 T としている。以上、式(1)～(3)をもとに、有限要素法を用いた流動解析を行う。250°C の ABS 樹脂を、50°C の金型温度条件下のキャビティに 2 s で充てんしたときの圧力分布解析結果を、図 11 に示す。

解析の結果から、充てん完了時のキャビティ内圧力分布は、ゲート部が最も高く、ゲートから遠ざかるに

従って、しだいに小さくなり零に近づくことがわかる。保圧圧力が十分小さいとき、キャビティ内の圧力分布は、充てん完了時の状態に近いものと考えられる。先に 3・2・1 項で、成形圧力に対するひけ量を調べた結果から、圧力分布の低い部分ほど、収縮変形量が大きくなることが推測され、定性的に非対称性の傾向が説明できる。

4・2 ひけの発生要因の分析 種々のパラメータを変化させた実験結果を整理し、ひけ量 δ に対する相関関係の有無を表 1 に分類する。表 1 中、1 は相関有り、0 は無相関あるいは相関性が弱いことを表す。まず、成形圧力がひけ量に大きく寄与する理由は、樹脂の圧縮性に依存するためと考えられる。ここで、樹脂の圧縮性を定量的に表現するものとして P - V - T 曲線がある。これは、成形過程での圧力 P 、温度 T 、それに密度の逆数で定義される比容積 V の三者の関係を示すもので、図 12 に例示する⁽⁹⁾。図 12 中、A は保圧完了時点を表し、冷却に従って V が一定のまま B 点に至る。以降、冷却に伴い V が減少して C 点で成形が完了する。この間で、B 点と C 点間の V 変化量 ΔV が体積収縮量に相当すると考えられる。したがって、成形圧力が高いほど、初期値の比容積は下がり、結果として ΔV は小さくなるため、相対的にひけ量そのものも小さくなると考えられる。

次に、リブ厚 h_2 がひけ量に強く影響する理由は、リブの熱容量と天板の熱容量の差から生じる温度差が、直接の原因と考えられる。図 6、7 に代表される、天

表 1 δ に対する各パラメータの相関性

	Relation to δ
Pressure	1
Resin Temp	0
h_1	0
h_2	1
b	0

図 11 T 形キャビティの充てん完了直後の圧力分布

図 12 ABS の P - V - T 曲線

板上のひけプロフィールからもわかるように、ひけはリブ近傍にのみ生じる局所的な現象であり、リブ厚を大きくするほど、この部分における蓄熱効果が助長されるためと予測される。

5. 結 言

本研究により得られた諸点を以下に示す。

(1) リブにおけるひけ量に対し、強く影響を及ぼす因子として、成形圧力とリブ厚さとがあげられる。成形圧力が低いほど、またリブ厚さが厚いほど、ひけ量は大きくなる。一方、天板肉厚、リブ長さ、樹脂射出温度には、ほとんど影響を受けない。

(2) 成形圧力を 10 MPa 以下の低い値に設定するとき、天板上の変形プロフィールは、非対称形状を呈し、ゲートから遠くに位置する部分ほど、収縮が大きくなる。この傾向は、樹脂充てん時の圧力分布を求める流動解析の結果からも推察できる。

本論文において、リブのひけに関する基礎的な特質について把握したが、次報にて、ひけの理論的定量化

法について述べ、ひけ発生機構をより明確化したい。

最後に、本研究を行うにあたり、ご指導をいただいた東京工業大学の神馬敬教授、並びにご協力いただいた松下電器産業(株)生産技術本部の西川敏課長、岡田伸二氏に深謝します。

文 献

- (1) 例えば, Schlichting, H., *Boundary Layer Theory*, (1979), 123, McGRAW-HILL.
- (2) Wang, K. K., ほか 6 名, *Cornell Univ. Prog. Rep.*, No. 6 (1979), 91.
- (3) Thienel, P. and Menges, G., *Polym. Eng. Sci.*, 18-4 (1978), 314.
- (4) Kuo, Y. and Kamal, M. R., *AIChE J.* 22-4 (1976), 661.
- (5) 藤井・辻, 機論, 43-373 (昭 52), 3337.
- (6) Dym, J. B., *Injection Molds and Molding*, (1979), 31, VAN NOSTRAND REINHOLD.
- (7) 丸山・田部, 高分子論文集, 38-4 (昭 56), 275.
- (8) VDMA, *Kenndaten für die Verarbeitung Thermoplastischer Kunststoffe, Thermodynamik*, 1 (1979), 310, Carl Hanser Verlag, München.