成形品へ及ぼすノズル通過樹脂温度挙動の影響

西脇信彦*・今野政昭*・崔 愛玲*・橋本展明*・堀 三計*

Influence of the Injected Resin Temperature Behavior through the Nozzle on Moldings

Nobuhiko NISHIWAKI*, Masaaki KONNO*, Ailing Cui*,
Nobuaki HASHIMOTO*, Sankei HORI*

When crystalline thermoplastic is used as an injected material, the crystallinity of the moldings depends on the cooling rate of the resin in the cavity. Therefore, a number of CAE software packages for simulating the cooling behavior of the filled resin have been developed, by assuming constant temperature of the resin through the nozzle. On the other hand, it is clear that the temperature of the resin injected from the nozzle into the cavity is not always constant. Moreover, the influence of the temperature variation of the injected resin on the crystallinity distribution in the moldings has not also been made clear.

In this paper, the temperature behavior of the resin injected into the cavity was related to the barrel temperature distribution and nozzle temperature. It is clear that the crystallinity distribution of the molded resin depends on the temperature behavior of the injected resin. From these experimental results, it is clear that the crystallinity distribution of the molded resin becomes nearly constant when the injected resin temperature through the nozzle is high at the initial injection stage, and becomes low after the initial stage.

Key Words : Injected resin temperature/Cooling behavior/Crystallinity distribution

1. 結 言

結晶性樹脂を用いた射出成形加工においては、成形品の結晶化度を均一化することが成形品のそりを防止するうえで重要となる。結晶化度を均一化するためには金型の冷却状態が重要^{1),2)}となり、最近の CAE の

解析でもそり解析が盛んに行われるようになってきた^{3),4)}。この CAE の解析においてはノズルから出る樹脂が一定温度であると仮定して解析が行われている。しかし、実際にはノズルから射出される樹脂温度は変動することが知られている⁵⁾。したがって、ノズルから射出される樹脂の温度変動が、成形品の品質の一つである結晶化度の分布へ及ぼす影響については解析的にも実験的にも未だ充分解明されていないのが現状である。

そこで本研究では、ノズルから金型へ充填される樹脂温度の変動挙動が、成形品の冷却・固化状態に及ぼす影響、さらに、成形品の品質の一つである結晶化度

* 東京農工大学 工学部 機械システム工学科
小金井市中町 2-24-16 (〒184)
Department of Mechanical Systems Engineering,
College of Engineering, Tokyo University of
Agriculture and Technology
2-24-16 Naka-cho, Koganei, Tokyo 184, Japan
1993. 8. 7 受理

Fig. 1 Experimental apparatus
(All dimensions are in mm)

Fig. 3 Barrel temperature distribution

へ及ぼす影響について調べた。具体的には、射出成形機のノズル温度およびバレルの温度分布を変化させることにより、ノズルから射出される樹脂温度を変化させて、そのノズル流出樹脂温度の変化が成形中の冷却挙動や成形後の成形品の結晶化度に及ぼす影響を調べた。その結果、ノズル樹脂温度の挙動を変えることにより、成形品の結晶化度分布が改善できることを明らかにした。なお、ノズルから金型へ充填される樹脂温度の代表値としては、ノズル中心を流れる樹脂の温度を熱電対で測定した値を用いた。

2. 実験方法および結果

2.1 実験装置

ノズル内の溶融樹脂の流速分布を考慮すると、金型へ充填される樹脂の大部分はノズルの中心付近を流れる溶融樹脂であると考えられる。したがって、その部分の温度を測定すれば充填される樹脂の代表温度を示していると考えられる。そこで、射出中の樹脂の温度挙動を直接測定するために直径 0.5mm のシース型熱電対をノズル流路内の中心に流れ方向に沿って吹き流し状に挿入して測定した。なお、溶融樹脂と熱電対の間ではせん断発熱が生じると考えられるが、熱電対測温部を下流側に置くことで、せん断発熱による加熱を受けた後の樹脂温度を測定していることになり、測定

Cavity	R_1	R_2
φ80mm	16mm	35mm
φ150mm	15mm	65mm

Fig. 2 Experimental apparatus

された温度は実際に充填される樹脂温度の代表値を示していると考えられる。また、ノズル部の温度はノズル部に埋め込まれた熱電対で、バレル部の温度は軸方向に3箇所埋め込まれた熱電対で測定し、それらの熱電対の値が設定温度になるようにノズル部とバレル部の外周面に巻かれた電気ヒーターの発熱量を制御している。

本実験で使用したバレル部の概略を Fig. 1 に示す。この図に示されるように、温度制御用の熱電対の他に測定用熱電対をバレルに埋め込み、その温度分布を測定した。

使用した射出成形機は新潟鉄工所製 AN 50 で、スクリュ径は 35mm, $L/D=18$ のコンベンショナルフルフライトスクリュ、最大射出容量は 96cm^3 である。

Fig. 2 に示すように金型キャビティ形状としては、ノズルから射出される樹脂の温度変化の影響を充分把握できるように、直径 150mm, 厚さ 2mm の円盤状(容量: 約 35cm^3)を用いた。成形中のキャビティ内圧力挙動を測定するため、固定側金型にはキャビティの中心から 15mm, 65mm の位置に先端径 2.5mm の水晶圧電式圧力センサー(KISTLER 製 6159 A)を取り付けた。また、樹脂から金型へ流入する熱量を求めるため、同じ半径位置でキャビティ表面から 1mm の位置に直径 0.25mm のシース形熱電対を取り付けた。さらに、キャビティ内に充填された樹脂へ超音波を投射し、キャビティ内の樹脂温度挙動や固化層の発

Fig. 4 Behavior of injected resin temperature (Cavity shape = ϕ 150mm)

達挙動を観察するため、移動側金型外表面に縦波超音波送受信子を取り付けた。

超音波送受信子は周波数 5MHz、振動子外径 6.35 mm (PANAMETRICS 製 M 110) でキャビティ内半径 15mm, 65mm の位置で測定できるようにした。なお、射出量が小さい場合でもノズルから射出される樹脂温度変動の影響を確認するため、直径 80mm で厚さ 2mm の円盤状 (容量: 約 10cm³) の金型も使用した。本実験で使用した樹脂は高密度ポリエチレン (HDPE) である。

2.2 実験方法

バレルの設定温度として樹脂メーカーが推奨するような値を用いると、Fig. 3 の○印や●印に示すような温度分布となる。なお同図の●印はバレル外周面に巻かれたヒーター加熱量を制御するための熱電対による値であり、○印はバレルの温度分布を測定するため、新たに取り付けられた熱電対による値である。その時、ノズルから流出する樹脂温度の挙動は Fig. 4 の○印に示すようになり、メーカーが通常推奨しているバレル温度設定 (以下、Nタイプ (normal type) という) では、流出樹脂温度が射出開始直後から時間と共に単調に高くなり、結果的に射出中の温度変動が大きくなっている。

射出成形に及ぼす射出樹脂温度挙動の影響を調べる

Table 1 Molding condition

Cavity shape (mm)	ϕ 80	ϕ 150
Injection pressure (MPa)	59.0	73.8
Injection speed (mm/s)	28.6	35.7
Holding pressure (MPa)	50.2	60.5
Mold temperature (°C)	25	25
Clamping force (kN)	343	392
Cycle time (s)	60	80

Fig. 5 Behavior of injected resin temperature (Cavity shape = ϕ 80mm)

ため、Fig. 4 の□印に示すように射出の初期の樹脂温度を高く、その後の射出樹脂温度を徐々に低くするようにした (以下Sタイプ (special type) という) 樹脂温度挙動について射出成形実験を行い、Nタイプと比較検討した。なお、Sタイプのときのバレル設定温度を Fig. 3 の■印に、ノズルやバレル全体の温度分布を□印および■印で示す。

さらに、上記2種類のノズルおよびバレル温度分布状態で、直径 80mm の円盤を成形したときのノズルから金型へ充填される樹脂の温度挙動を Fig. 5 に示す。射出する樹脂の容量を減らした直径 80mm の射出成形加工においても、Fig. 3 に示すような温度分布にすると Fig. 4 に示された温度挙動 (直径 150mm) と類似の挙動を示した。なお、Table 1 に示すように成形品の形状によって射出成形条件は変化させたが、NタイプとSタイプでは同一射出成形条件で実験を行った。

金型内の充填時には良く知られているようにフローフロントで湧き出し流がある。そのことを考慮して金型へ充填される樹脂の挙動を極めて簡単なモデルで考えると Fig. 6 に示すようになる。すなわち、ノズルから充填される樹脂の初期部分が成形品のスキン層を形成し、残りの充填樹脂が成形品のコア部分を形成する。

Fig. 4 に示される樹脂温度挙動の場合は、ランナーやゲートに近い所と遠い所のコア部分の温度を比較すると、Nタイプの方がSタイプに比べ、その温度差が大きくなると考えられる。すなわち、射出樹脂温度挙動によって、成形品の固化状態や結晶化度などの品質が変化すると考えられる。

2.3 実験結果

a. 結晶化度

実際に上記2種類の射出樹脂温度挙動で、その他の条件は同じにして成形した。それぞれの成形品につい

Fig. 6 Schematic flow pattern during filling stage

て、その半径方向の結晶化度分布を測定すると、直径150mmの円盤の場合は Fig. 7 に示すように、直径80mmの場合は Fig. 8 に示すようになった。

これらの実験において、充填する樹脂温度挙動以外の射出条件を同じにしても、成形中の冷却状態やスキン層厚さおよびせん断速度等がすべて微妙に変化して成形品の結晶化度へ影響を及ぼしていると考えられる。したがって正確なことは言いえないが、充填完了時のコア層の温度が高いと結晶化度が高くなると考えられる。すなわち、コア層の樹脂温度が高いほど金型表面温度の上昇量が大きくなり、常温まで冷却されるのに要する時間が長くなって、結果的に結晶化度も高くなると考えられる。したがって、後述 (Fig. 11 参照) のように、充填時において金型中心付近 (15mm) と外周付近 (65mm) の平均温度の差が、Sタイプに比べ、Nタイプの方が大きいため、Sタイプの方がより均一な結晶化度分布となったと考えられる。

なお、直径150mmの場合の結晶化度の平均値について考えると、Nタイプの方がSタイプに比べて高くなっている。これは充填された樹脂の平均温度が高いためと考えられる。したがって、Sタイプの結晶化度の平均値を高くするには、充填される樹脂の平均温度

Fig. 7 Crystallinity distribution along the radius (Cavity shape = ϕ 150mm)

Fig. 8 Crystallinity distribution along the radius (Cavity shape = ϕ 80mm)

を高くするか金型温度を上げるかすれば可能であると考えられる。

b. 固化挙動

直径150mmの金型キャビティ内の圧力挙動を測定すると、Fig. 9 に示すような結果が得られた。同図に示すようにSタイプに比べてNタイプの方が、保圧時の圧力が高く、かつ遅く低下している。これは、Nタイプの最後に充填された樹脂温度がSタイプの温度に比べて高くなっているために生じた現象と考えられる。

そこで、超音波を用いて金型内の固層と熔融層の境界面で反射して来る超音波の波形からその固化挙動を調べた⁶⁾。その結果、Fig. 10 に示すように半径65mmの位置の方が半径15mmの位置に比べ固層が速く発達していることがわかる。また、Sタイプの場合はNタイプに比べて固層が速く発達していると同時に、半径15mmと65mmとではほぼ同じ速度で固層が発達している。このことから、結晶化度がほぼ均一分布になったものと考えられる。

また、上述の実験で金型内の樹脂の平均音速を求めることができる。樹脂の各圧力における音速と温度の

Fig. 9 Pressure behavior in the cavity
(Cavity shape= ϕ 150mm)

Fig. 10 Thickness of solid layer in the cavity
(Cavity shape= ϕ 150mm)

関係が明らかにされているので、平均音速と圧力の値から半径 15mm と 65mm の位置の平均温度を求めた。その結果を Fig. 11 に示す。同図には、Fig. 9 で示された圧力の挙動を同時に示してある。同図において半径 15mm の S タイプの場合、樹脂の流入直後より平均温度が低下していくが、充填完了に伴い一時的に温度低下が止まる挙動を示す。この挙動は金型内の圧力上昇に伴い、金型内の樹脂が断熱圧縮されて生じた現象と考えられる。いっぽう、同じく半径 15mm の N タイプの場合は、最初は時間の経過と共に平均温度が低下するが、充填完了前から平均温度が上昇し、型内圧力の上昇に伴ってさらに上昇する。両者の平均温度挙動の差は、充填された樹脂温度挙動の差により生じたと考えられる。

c. 金型表面近傍の温度挙動

射出を開始した時刻をゼロとして、直径 150mm の金型キャビティ表面近傍（表面から 1mm の位置）の

(a) At 15mm from center of cavity

(b) At 65mm from center of cavity

Fig. 11 Behavior of mean temperature and cavity pressure

Fig. 12 Mold temperature rise
(Cavity shape= ϕ 150mm)

温度上昇量を測定した結果を Fig. 12 に示す。同図に示すように、キャビティ中心から半径 15mm と 65mm の位置における温度上昇量を比較すると、半径 15mm の方が高くなり、金型への流入熱量が多いことがわかる。

ここで、充填された樹脂から金型へ流入する熱流束の値を半径 15mm の位置で求めた。すなわち、Fig. 12 に示される半径 15mm の位置の温度挙動を境界条件

Fig. 13 Behavior of heat flux from filled resin to the cavity wall
(Cavity shape= ϕ 150mm)

として、金型内の熱伝導方程式を用いてその熱流束の値を求めた⁷⁾。その結果を Fig. 13 に示す。同図は逆問題により求めているため、測定精度がそれほど高くないが、熱流束の挙動は示していると考えられる。すなわち、Fig. 11 に示したように、Nタイプの場合は充填完了直前に樹脂の平均温度が高くなるため、充填完了時付近で再び熱流束が増加するという挙動を示している。この結果は、半径 15mm の位置では、Sタイプに比べてNタイプの方がコア部の温度が高くなっていることを示唆しており、このことからNタイプのコア部で結晶化度が高くなった原因が樹脂温度であることが確認できる。

3. 結 言

ノズルから金型へ充填される樹脂の温度挙動を熱電対で測定し、その温度挙動が成形品の冷却・固化状態へ及ぼす影響や成形品の品質の一つである結晶化度分布へ及ぼす影響について調べた結果、以下のようなことが明らかとなった。

- ① ノズル内の中心付近に熱電対(直径 0.5mm)を吹き流しのようにして取り付けることにより、ノ

ズルから射出される樹脂の代表温度を測定することができた。

- ② 従来、樹脂メーカーで推奨しているようなバレル温度分布を用いると、ノズルから金型へ充填される樹脂温度は、射出前半に比べ、後半の方が高くなる傾向がある。その結果、ランナーやゲートに近い部分と遠い部分とでは充填される樹脂温度および冷却状態が異なり、結晶化度に差が生じる。バレルの温度分布を変更してノズルから出る樹脂温度を変え、射出前半より後半で低くなるようにすると、成形品の結晶化度が均一化する傾向がみられた。この傾向は、射出容量を変化させてもほぼ同じになった。すなわち、ノズルから金型へ充填される樹脂の温度挙動が成形品の品質に密接に関係していることが明らかとなった。

したがって、本研究で示したように射出される樹脂温度挙動と成形品の品質の関係がより詳細に明らかとなれば、さらに高品質の成形品を得ることが可能と思われる。

最後に本研究を行うに当たり、装置の提供および実験に御協力いただいた新潟鉄工所に感謝する。

参 考 文 献

- 1) Yo, C. J. et al.: *Polym. Eng. Sci.* 32 (3) 191 (1992)
- 2) Ludwig, H. J. et al.: *Polym. Eng. Sci.* 28 (3) 143 (1988)
- 3) Kudryavtsev, L. and Wang, K. K.: *Proc. of SPE ANTEC '93*, 88 (1993)
- 4) Poetsch, G. et al.: *Plastverarbeiter*, 40 (5) 110 (1989)
- 5) Amano, O. and Utsugi, S.: *Polym. Eng. Sci.* 29 (3) 171 (1989)
- 6) 西脇信彦, 崔 愛玲, 今野政昭, 堀 三計: 超音波による金型内樹脂の固化挙動の観察「成形加工」(投稿中)
- 7) Carslaw, H. S., and Jaeger, J. C.: *Conduction of Heat in Solid*, 50 (1959) Oxford