気泡核生成を組み込んだ微細射出発泡成形シミュレーション技術の開発

Chia-Hsiang Hsu^{*1}・Yuan-Jung Chang^{*1}・後藤昌人^{*2}・田中久博^{*2}・秋元英郎^{*3}

1. はじめに

プラスチックの成形加工において、シミュレーションの重要性は高まる一方である。射出成形のシミュレーションは完全三次元流動解析が可能になってから急速にその解析精度が高まってきた。精度が高まると、市場からの新たな要求も生まれるため、改良改善が続けられている。射出発泡成形のシミュレーションに対する市場からの要求は古くから存在していたが、後述するように計算要素として考慮すべき要因が非常に多岐に渡るため、満足できるシミュレーションができていなかった。

一方で、自動車部品の軽量化や電気電子機器の寸法精度向上等のニーズに合わせて、超臨界流体を発泡剤に用いる微細射出発泡成形の応用範囲が急速に拡大してきた。その

ような市場環境を背景に、設計開発段階において実用性のある微細射出発泡成形シミュレーション技術を求める声が強まってきた。

我々はそのような市場の要求に応えるべく、京都大学の基礎研究の成果である気泡核生成の実験式を組み込んで、実用レベルの微細射出発泡成形のシミュレーション技術を確立することに成功し、市場に提供するに至った。今回それが評価されて「青木固」技術賞を受賞することになったので、本技術について解説する。

2. 微細射出発泡成形とは

微細射出発泡成形とは超臨界流体を発泡剤として用いた射出発泡成形であり、マサチューセッツ工科大学 (MIT) で開発された。その代表的な技術は MIT 発のベンチャー企業である TREXEL Inc. (アメリカマサチューセッツ州) が販売している MuCell® 技術である。

微細発泡成形の開発の発端は、MIT と Eastman Kodak による共同開発であり、プラスチック製品の強度を落とすことなく、プラスチックの使用量を減らして化石資源の使用を減らしたいという動機であった。プラスチックの強度を決定しているのは微小な構造欠陥の存在であり、その構造欠陥よりも小さな気泡であれば強度を落とさないと考え、ミクロンオーダーの微細な気泡を多数含んだ発泡体の製造技術の開発を開始し、超臨界流体を発泡剤として用いる物理発泡によって微細な気泡を多数発生させる技術にたどり着いた。その後、事業を TREXEL 社に移管して実際の射出成形や押出成形に使える技術に仕上げ、世界中にライセンスされた (現在押出発泡に関しては、MuCell Extrusion LLC. によって販売されている)。

現実には、構造欠陥よりも小さい気泡は得られていないが、軽量化や寸法精度等の利点が多く確認されたことで、広く活用されている。気泡が小さいことを利用しているのではなく、気泡の拡大が流動を支援し、固化収縮分を気泡の拡大で補うことが多くの利点を生み出している。

我が国でも早期から微細射出発泡成形技術の実用化検討が行われた。国内で最初に実用化された製品は、(株)タカギセイコーによるコピー機用製品であり、反りが小さいことが認められて採用になった。

Development of CAE for Physical Foaming Incorporating Cell Nucleation

^{*1} Chia-Hsiang Hsu/Yuan-Jung Chang
Tai Yuen Hi-Tech Industrial Park, 8 F-2, No.32, Taiyuan St.
Chupei City, Hsinchu County 302, Taiwan
mail@moldex3d.com

^{*2} Goto, Masato/Tanaka, Hisahiro
(株)セイロジャパン MoldexSC
春日部市谷原 3-1-8 (〒344-0065)
m-goto@saeilo.co.jp

^{*3} Akimoto, Hideo
秋元技術士事務所
千葉市美浜区中瀬 1-3 幕張テクノガーデン CB 棟 3 F MBP
(〒261-0023)
2019. 8. 1 受理

^{*1} Chia-Hsiang Hsu

^{*1} Yuan-Jung Chang

^{*2} Goto, Masato

^{*2} Tanaka, Hisahiro

^{*3} Akimoto, Hideo

3. 微細射出発泡成形の原理

微細射出発泡成形の工程は、①可塑化された樹脂に発泡剤である超臨界流体を注入する工程、②射出成形機のスクリーによって熔融樹脂と超臨界流体を混合する工程、③射出成形機の背圧（飽和圧力以上）によって発泡剤を完全溶解して射出を待つ工程、④射出されて金型キャビティに流れ込みながら気泡核を生成する工程、⑤気泡が成長する工程、⑥金型を樹脂と気泡によって満たして充填を完了させる工程、⑦冷却固化させる工程、⑧製品を取出す工程から成り立っている。

すなわち、通常の射出成形に比べると超臨界流体を注入してから完全溶解させるまでの工程と金型キャビティ内で気泡核が生成する工程、気泡が成長して、気泡の成長が停止（充填完了と樹脂の冷却固化による）する工程が追加される。その分だけ工程が複雑になり、微妙な条件のずれが成形不良につながりやすく、難易度が高い成形技術である。

微細な気泡を多数得るための運転上のポイントは、発泡剤を大量に溶解させ、急減圧によって過飽和状態を形成することにあり、成形条件によって気泡の状態は大きく影響される。発生する気泡核が多いほど、1個当たりの気泡は小さくなる。

また、通常の射出成形の常識にとらわれていると、正しい製品設計、金型設計や成形条件の設定ができないことが多い。例えば、ゲートは板厚が薄い部分に設け、板厚が薄い方から厚い方に流動させる、流動末端付近にあるリブの充填が困難な場合はリブ厚みを増すと重量が軽くなる等の設計ノウハウは直感的には理解しにくい。

4. 微細射出発泡成形シミュレーションの従来技術と課題

前述のように、発泡成形は融かして流して固める工程に加えて、気泡核の生成・気泡の成長・気泡成長の停止の工程が同時並行で起こるため非常に複雑である。従来から微細射出発泡成形用シミュレーションは存在していたが、その解析精度は実用レベルからほど遠いものであった。図1のように初期のシミュレーションは、気泡密度を一定として気泡成長のみを解析していた。その理由は、気泡核生成理論が未確立であり、シミュレーションに組み込む理論が確立していなかったためである。

実用性・信頼性があるシミュレーション技術の確立のためには、気泡核生成を組み込み、気泡核生成を計算するためのパラメータの決定技術の確立、計算結果と実際の成形の突合せ技術の確立が必要であった。

実際の微細射出発泡成形では気泡核の生成は均一でなく圧力分布に依存し、図2のように気泡密度により気泡径及び気泡成長が大きく影響を受ける。すなわち、図3のように飽和圧力以下の領域で発泡核が発生し成長する。微細射出発泡成形の解析精度向上には、気泡核すなわち気泡密度の高精度な予測が不可欠であった。我々の課題は、気泡核の生成過程を含むシミュレーション技術を開発して、微細射出発泡成形のシミュレーションを実用レベルに高めることであった。

既に瀧ら^{1),2)}により気泡核生成モデルが提案されていた

Fig.1 Conventional CAE

Fig.2 Actual foaming

Fig.3 Shape of fuming correlation diagram

が、既存技術では、気泡核生成モデルを用いてのCAE解析は計算メモリー容量及び解析時間等で実用的でなかった。また、複合材等は可視化測定不可能で気泡核生成パラメータ値を特定する技術が確立されていなかった。

5. 課題解決のアプローチ

5.1 計算における課題

前述の技術的課題を解決するために、下記のアプローチを実施した。①気泡核生成式の組み込み、②均質化手法による計算負荷低減、③微細メッシュ、④表面層におけるBLMメッシュの採用、⑤低せん断領域の粘度式理論の構築、⑥リバースエンジニアリング手法による発泡パラメータの算出技術構築である。以下それぞれのアプローチについて説明する。

5.2 気泡核生成式の組み込み

気泡核生成式は下記のバッチ発泡の可視化実験から得られた瀧ら^{1),2)}による実験式を用いることとした。

$$J(t) = f_0 \left(\frac{2\gamma}{\pi m} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left(- \frac{16\pi\gamma^3 F}{3K_B T (\bar{c}(t)/K_H - P_c(t))^2} \right) N_A \bar{c}(t) \quad (1)$$

ここで、 $J(t)$ は核生成速度式、 f_0 と F は、気泡の核生成率の固定パラメータ、 γ は表面張力、 m はガス粒子一個当たりの質量、 K_B はボルツマン定数、 T は温度、 $\bar{c}(t)$ は平均濃度、 t は時間、 K_H はヘンリー定数、 $P_c(t)$ は雰囲気気圧力である。平均ガス濃度は式(2)で表す。

$$\bar{c}(t) V_{L0} = c_0 V_{L0} - \int_0^t \frac{4\pi}{3} R^3(t-t', t') \frac{P_D(t-t', t)}{R_g T} J(t') V_{L0} dt' \quad (2)$$

ここで、 V_{L0} は高分子相の体積、 $R(t-t', t)$ は時刻 t' に生成した気泡が $t-t'$ 間成長した半径、 $P_D(t-t', t)$ は時刻 t' に生成した気泡が $t-t'$ 間成長した気泡内圧、 R_g は気体定数を示す。

気泡径の成長は式(3)で表し、ガス拡散は式(4)で表す。

$$\frac{dR}{dt} = \frac{R}{4\eta} \left(P_D - P_c - \frac{2\gamma}{R} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial c}{\partial r} \right) \right] \quad (4)$$

ここで、 η は粘度、 P_D は気泡内の圧力、 P_c は雰囲気圧力、 r は半径、 c はガス濃度、 D はガス拡散係数を示す。

5.3 均質化手法による計算負荷低減

実際は、核生成モデル^{1),2)}では発泡タイミングの違いにより様々なサイズの気泡が混在し、エレメント内には大きさも位置もバラバラな気泡が存在する。ここで、図4のように解析エレメント毎に、気泡径を平均化し、また気泡位置も均一分散として扱って計算する。すなわち、1個1個の気泡に対して計算するのではなく、気泡群として計算する。均質化手法を取り入れて均質化处理での計算を行うことでメモリー消費及び計算負荷を大幅に低減した。

5.4 最適メッシュ (微細メッシュと BLM)

平均化手法をとることでのデメリットとして解析エレメント内での温度分布などの差異が大きいと誤差が大きくなる。図5のように均質化手法での精度を確保するために解析メッシュセルの微細化が可能な大容量計算能力だけでなく、解析メッシュに BLM (バウンダリー・レイヤ・メッシュ) を活用して温度が急速に変化する金型境界面付近にプリズムエレメントを多数層 (片側 11 層) 作成することで各メッシュセル内での温度のばらつきを抑えて高精度な解析を可能にした。

また、基礎実験が等温変圧環境でのモデルとなっているがこれを変温変圧環境でも扱えるように改良を加えた。

5.5 低せん断領域の粘度式

粘度は発泡に大きく影響するがガラス繊維やセルロースナノファイバー (CNF) 入りの複合材などでは、低せん断領域での流動降伏値が発生する。そこで、式(5)に示す流動降伏項付 Cross モデルを適用することによって、低せん断域での流動降伏値を表現でき誤差を抑えることができる³⁾。図6にポリアミド6 (以下 PA 6 (Neat)) と PA 6

Fig.4 Homogenization treatment

Fig.5 Tetra mesh VS. BLM (boundary layer mesh)

Fig.6 Viscosity data PA 6 neat and with CNF 10 wt%

に CNF 10 wt% 複合させた材料 (以下 PA 6 (CNF 10 wt%)) のせん断粘度曲線を示す。発泡のステージでの一般的なせん断速度の $10^0 \sim 10^1 /s$ では、一桁以上の粘度差が発生しているのが確認できる。

$$\eta = \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} + \frac{\eta_0}{1 + (\eta_0 \dot{\gamma} / \tau^*)^{1-n}} \quad (5)$$

ここで、 η は粘度、 τ_y は流動降伏値、 $\dot{\gamma}$ はせん断速度、 η_0 はゼロシア粘度、 τ^* はフィティング係数、 n は流れ指数を示す。

5.6 X線CTを利用したリバースエンジニアリング手法による発泡パラメータの算出技術

実際に気泡核生成式をシミュレーションのプログラムに組み込んでも、使用する材料によって各パラメータがまちまちであるという課題があった。そこで、実用可能なパラメータ決定技術の確立を行った。特に不透明な樹脂及び繊維入りの樹脂は可視化観察が不可能である。しかし可視化観察不可能な材料が圧倒的に多く、不透明材料における各パラメータの決定技術の確立が解析精度向上に不可欠であった。

ここで、パラメータ決定の例を示す。CNF が 10% 添加された PA 6 を微細射出発泡成形で製作したダンベル型試験片 (図7) の中央部の CT 断面画像 (図8) を肉厚方向に画像処理することで肉厚方向の気泡径と気泡密度分布

Fig.7 Dumbbell sample

Fig. 8 CT scan data

Fig. 9 CAE Model

を求め、これらのデータからリバース技術で核生成率の固定パラメーター f_0 及び F を算出する一連の手法を確立した⁴⁾。

6. 算出核生成率パラメーター解析と実測値の比較

上記技術で算出した気泡径及び気泡密度分布からパラメーターを算出して解析を行った。解析モデルを図9に示す。

ダンベル型試験片中央部の肉厚に対する平均気泡径及び気泡密度分布図を最適化無しのCAE解析値（デフォルト値のまま計算）、最適化後の解析値、実測値を図10に示す。実用上でより重要性が高い平均気泡径がよく一致している。

7. おわりに

不透明な樹脂及び繊維が入った樹脂も含め、微細射出発泡成形シミュレーションに気泡核生成モデルを効率よく計算できるよう組込み、メモリー及び計算時間が実用的なシ

Fig. 10 Cell size and Cell Density vs. Thickness Layer

ステムを開発した。本技術は完全三次元流動解析ソフト「Moldex 3 D」のオプションとして既に多くの企業や研究機関に採用されている。

謝 辞

気泡核生成モデルの提供及び助言いただいた京都大学 大嶋正裕教授ならび金沢大学 瀧健太郎准教授に謝辞を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 瀧健太郎, 大槻安彦: 成形加工, **18**(3), 205(2006)
- 2) Taki, K.: *Chem. Eng. Sci.*, **63**, 3643(2008)
- 3) 中井元徳, 田中久博, 井上尊勝, 新留仁誉, 後藤昌人: 成形加工'18, 301(2018)
- 4) 杉尾太陽, 後藤昌人, 田中久博, 今嶋晋一, 秋元英郎: 成形加工'16, 13(2016)