ネットシェイプ鍛造の工程設計を支える CAE 技術の現状*

Recent Trend of CAE Technology for Process Design of Net Shape Forging

金 秀英**
Soo Young KIM

Key words net shape forging, CAE, optimization technique, divided-flow forging, closed-die forging

1. 緒 言

一般に鍛造加工は高い生産性とコストメリットに加えて、塑性変形により得られる機械的性質の特性向上を製品に付与することができるため、自動車の変速機やエンジン周りの回転部品といった重要保安部品の製造を中心に適用されてきた。しかし、鍛造加工のみでは最終製品の形状を得ることは非常に難しく、仕上げ工程として機械加工を設置するのが一般的である。従来、ネットシェイプ鍛造(Net-shape forging)もしくはニアネットシェイプ鍛造(Near net-shape forging)は鍛造品の機械仕上げ加工工程を削減する手段として発展し、精密鍛造を象徴する言葉として幅広く知られている。近年でも、さらなるコスト削減と生産効率向上に対する市場ニーズを受け、既存の鍛造加工のネットシェイプ化に向けた工程改善への取り組みは今なお継続的に進められている。本稿では鍛造加工のネットシェイプ化の実現に向けた工程設計に役立つ効果的な手段として、CAE 技術を活用した工程設計を提案するとともに、CAE の役割や具体的な適用事例を紹介する。

2. ネットシェイプ化の実現に向けた CAE の課題

ネットシェイプ化に向けた工程改善に CAE 技術を活用して進めるにはいくつかの課題をクリアしなければならない。検討対象となる主な案件を図 1 に示す。CAE によるネットシェイプの取り扱いで重要になるのは寸法精度であり、鍛造品の形状を正確に表現・評価するための複雑三次元形状に対応する適応メッシュ生成(adaptive mesh generation)技術や変形に追従してメッシュを再構成するリメッシュ技術、また、微小な形状欠陥(折れ込み、巻込みなど)の検出・評価を可能とする高度な結果分析技術が要求される。さらに最近では、ネットシェイプ化に向けた鍛造加工の改善効果を最大化するための手法として、最適化技法を取り入れた活用方法にも関心が高くなっている。以

上のような要求課題に対応するため、解析数(条件やパラメトリックスタディ等)や計算時間の低減に関する技術開発にも注力が必要となっている。

図 2 に示すように、計算機の性能および数値解析アルゴリズムの発展により、現在の三次元鍛造解析ではネット

図 1 ネットシェイプ鍛造の工程設計における CAE の課題

図 2 三次元鍛造解析におけるメッシュモデルの現状¹⁾

*原稿受付 平成 26 年 9 月 17 日

**株式会社ヤマナカゴーキン (千葉県佐倉市大作 2-11-2)

図3 最新技術の採用による計算速度の向上

図4 最適化技術を活用した鍛造加工の工程設計

シェイプ化による鍛造品への影響をよりの確に評価できるようになった。図3は三次元解析における計算速度の向上について最近の事例を示したものである。適用メッシュ数の増加に伴う計算時間の増加に対しては、並列計算手法や RSE (Rigid Super Element) 法の導入、ソルバーの演算性能の改善などさまざまな技術を取り入れて改良が進められている。

図4に最適化技法を用いた鍛造加工の工程設計についての概要を示す。①最適化の具体的な検討パターンとなる条件下で計算、②解析結果を最適化モジュールに転送、③最適化モジュールによる比較評価の実行、④最適な状態(最適値)かどうかの判定、⑤最適であれば終了、なければ①へという過程①～④が繰り返される。このような最適化技法を活用することにより、複数の設計パラメータの影響を考慮した最適ソリューションの探索が CAE を用いて可能となっている。

三次元形状の最適化問題を扱う場合、指定の形状定義をパラメータとして設定し、最適形状を探索する必要がある。

図5 Morphing 技法を用いた形状修正³⁾

る。実例として、STL (Standard Triangulated Language) ファイル形式のような三角形で定義された三次元サーフェイスデータが与えられたとき、指定された形状定義(距離、角度等)がパラメータとして認識され、パラメータの変更に連動して形状変更が可能となる技術が開発されている²⁾。図5に一例を示す³⁾。

3. 事例紹介

3.1 分流鍛造法を用いたスパークギヤの製造

精密冷間鍛造加工によるギヤ部品の鍛造は、ネットシェイプ化が進む鍛造品の開発案件として現在もお注目されるテーマの一つである。ここでは成形難易度の高いスパークギヤ部品の事例として紹介する。分流鍛造法は、冷間鍛造加工の荷重低減と充填向上を図るための工法として提案されたものであり⁴⁾、最近では、多軸制御サーボプレスのような複動モーションに対応するプレスの普及に伴って、活発に鍛造加工への適用が進められている。

図6に分流鍛造法を用いたスパークギヤの鍛造加工工程の概要を示す。第1段階で上下のパンチとスリーブによる据込み成形を行い、第2段階で上パンチと下パンチを後退、続けて上下スリーブのみによる歯型部の据込みを行う動作を表している。歯型部充填に不要な余肉はパンチの後退によりできた空間へ逃げるので、成形荷重の急激な上昇は抑えられ、金型の充填に必要な荷重のみによって成形を進めることができる。

鍛造解析を用いた工程検証の結果を図7に示す。成形荷重の上昇を 250 ton 程度に抑えながらも歯先部で高い充填度を実現できることがわかる。

実機トライとして、四軸複動モーションが可能な 1200 ton サーボプレスをを用いた 1 ショットの分流鍛造を行った。スパークギヤ鍛造品のプロファイルを鍛造解析の検証結

図6 スパーギヤ部品の分流鍛造加工の工程概要

図7 鍛造解析を用いた工程検証

果とともに図8に示す。実際の鍛造品では成形荷重 250 ton で鍛造品の歯先部がほぼ充填している結果が得られた。また、分流の影響で現れたわずかな中心部の未充填が鍛造解析において正確に予測されていることが確認できる。分流鍛造法の効果を、鍛造解析を用いた事前検証により確認することで、精密鍛造部品のネットシェイプ化を実現する手法として有効であると判断できた事例である。

3.2 ベベルギヤの冷間閉塞鍛造

冷間閉塞鍛造加工は精密鍛造品のネットシェイプ化の一つとして採用される代表的な加工法であり、ベベルギヤ、インナーレース、スパイダーなどの自動車用部品の鍛造に

図8 実機トライと鍛造解析の検証結果

図9 ベベルギヤ閉塞鍛造加工の工程および設計の概要

多く活用されている。

図9にはベベルギヤの冷間閉塞鍛造加工の工程および鍛造解析を用いた工程設計の概要を紹介している。鍛造解析で事前に検証した設計案を用いて実機トライを実施した後、三次元測定機（CMM）を用いて測定した鍛造品の歯面形状とマスターギヤの理想歯面形状の差異を定量的に把握し、金型形状を補正することで、歯面の機械加工を必要としないネットシェイプ化された鍛造品が得られる。

閉塞鍛造加工の最終段階では金型内部に素材がほぼ充填するため、金型と素材の接触面には高い面圧が発生する。その圧力負荷に起因する金型の内部応力は金型の疲労破壊を助長して閉塞鍛造金型の典型的な寿命形態をとらせる。図10は疲労破壊により短寿命で破損したベベルギヤ金型に対して適用された寿命向上対策事例である。鍛造解析で得られた接触面圧分布を金型に付与し、金型の応力状態を

図 10 ベベルギヤ鍛造加工における金型寿命向上の事例

図 11 ベベルギヤ鍛造加工における金型寿命の予測事例

計算すると、割れの起点とされる位置に最も高い引張応力が現れる。この金型のパンチ穴径を変更して金型の応力分布を評価すると、穴径の増加に対する応力集中部位における引張応力の値は減少していくことを確認できた。解析結果から得られた穴径と引張応力の相関関係をもとに対策案を適用したところ、金型の寿命は従来に比べて約 10 倍の改善を実現することができた。

最近では、金型の応力解析結果と金型材の疲労特性データをベースとした金型寿命の予測事例も報告されている。図 11 にはベベルギヤ鍛造加工の工程における金型寿命の予測事例を示す。金型が破損する位置や寿命回数が正しく予測されており、金型の性能評価や寿命に関する問題の事前回避に有効な情報を提供できる。

3.3 最適化手法を用いた工程改善事例

最後に、熱間鍛造加工の工程におけるネットシェイプ化(歩留り改善)を目的として実施された最適化技法による検討事例を図 12 に紹介する。

素材の長さ (L)、溝部の幅 (W) と高さ (H)、直径

図 12 熱間鍛造加工の工程における歩留り改善事例³⁾

(D) を設計パラメータに定義して、バリ部を除いた鍛造品の評価領域に対して未充填と巻込み欠陥がないことを拘束条件とする取り扱いで素材体積の最適化を検討した。最適化分析の結果から素材体積が最小で形状欠陥のない素材寸法を見いだすことができています。初期条件による鍛造品の形状と比較した結果、歩留りが改善することを予測できる。

4. 結 言

本稿では、鍛造加工におけるネットシェイプ化を進める上で有効な CAE の活用について、工程改善事例を中心として紹介した。ネットシェイプ化の実現によって達成される効果や市場の大きなニーズに応えるためには、今後さらに以下の課題への取り組みの強化が必要と考える。

- (1) 解析精度の向上 (材料データ、解析技法)
- (2) 最適化技法や実験計画法を活用した設計の定式化
- (3) 大規模解析モデルへの対応および計算速度向上

参 考 文 献

- 1) DEFORM Fall User's Group Meeting 2012, SFTC, (2012).
- 2) J.B. Yang et al.: Shape Optimization in 3D Forging Process, Proc. 10th International Conference on Technology of Plasticity, (2011) 159.
- 3) DEFORM Spring User's Group Meeting 2011, SFTC, (2011).
- 4) K. Kondo et al.: Advanced Technology of Plasticity 2002, JSTP, (2002) 11.

金 秀英

2000 年韓国科学技術院機械工学科卒業。工学博士。研究内容は塑性加工、数値解析、鍛造工程および金型設計。