

論文内容要旨 (和文)

平成24年度入学 大学院博士後期課程

バイオ工学専攻 バイオ化学分野

氏 名 花田 敏広



論文題目

数値流体力学を用いた新規インラインミキサーの開発と実用化に関する研究

化学工学は、化学産業だけでなく、食品、医療、環境、バイオ、エネルギーといった様々な分野のものづくりに活用されている。その中でも、各産業を支える素材を提供するプロセス産業は単位操作に基づく実利を指向した学問領域である化学工学の発展と共に成長してきた。混合、攪拌操作は最も重要な単位操作のひとつであり、化学工業において最も重要な設備である反応器はそれ自身が混合・攪拌装置であるといっても過言ではなく、あらゆる産業において製品の機能、性能等の価値を決定づけるキープロセスとなっている。

工業的な生産プロセスには大きく分けて2種類ある。一つはバッチ式プロセスであり、もインライン式プロセスである。バッチ式プロセスの槽型の反応器に用いられる混合・攪拌装置は、混合槽内でモータ等によって回転または運動する攪拌翼を用いて流体を攪拌するものが主流である。古くから多くの研究が行われているが、近年では数値流体力学 (CFD) の利用が不可欠となっている。一方、インライン式プロセスの管型の反応器に用いられる混合・攪拌装置はインラインミキサとよばれており、その中でも特に駆動部を持たないものは静止型混合器、スタティックミキサとよばれ、その構造は、一般的に配管内部にエレメントと呼ばれる構造物を配置することによって流れを乱して内部の流体を混合・攪拌するものである。1965年に Kenics 型スタティックミキサが実用化されて以降、多くの企業や研究機関から様々な形状のスタティックミキサが提案されている。バッチ式の攪拌装置の研究と同様に、スタティックミキサについても実流試験主体の研究から CFD を用いた研究が一般的になっている。同時に配管内の流動状態を可視化する技術についても研究が進んでいる。

スタティックミキサは設置に必要なスペースも少ないことからバッチ式混合・攪拌プロセスの予備混合用途としても用いられることもある。また送液以外の動力を必要としないことから省エネルギーの観点からも注目されている。スタティックミキサの適応範囲は広く、あらゆる産業分野で用いられている。例えば、液体中への気体の分散やエマルジョン形成、さらには配管内の流体を効率的に均一化することができることから熱交換器の内管に設置されることも多い。多くの産業において多品種少量生産化が進む中、重厚長大なバッチ式の製造設備ではなく小規模でランニングコストの低減ができるインライン式の製造プロセスへの転換が期待されている。それに伴って、インライン式混合・攪拌装置も各種産業を支える重要な技術のひとつとして発展していくことは間違いないと言える。

しかしながら、従来のスタティックミキサでは解決できない問題もある。そのひとつが流れ方向の濃度ムラを効果的に解消することであり、もうひとつが、反応速度が著しく速い流体を混合することである。現在実用化されているスタティックミキサは単純に配管内の流体を混合・攪拌する為だけでなく、管内の流速分布を理想的な押し出し流れに状態に近づけることを目的として発達してきた為、配管の径方向の濃度ムラを解消することは可能であるが、流れ方向の濃度ムラを効果的に解消することはできない。また流体の反応速度が著しく速く、混合直後から反応が逐次進行するような系では、

流体がスタティックミキサの末端に到達するまでに反応が完結したり、合流部からスタティックミキサまでの間で反応が完結したりすることになり問題となる。特に反応生成物の性状が反応時の攪拌状態に著しく依存し、ゲル状物質を生成するような場合には大きな問題となる。

本論文では、インライン混合・攪拌プロセスにおいて流れ方向に濃度ムラのある流体及び高い反応性を有する流体を効果的に混合・攪拌することが出来る新規の静止型混合器の開発と実用化及び、その評価方法を確立することによって、インライン式の製造工程における重要な単位操作である混合・攪拌操作の課題を解決し、その適応範囲を広げることを目的とする。

第2章 「時間差式ミキサの開発と実用化」では、流れ方向に濃度ムラのある流体を効果的に混合・攪拌することが出来る新たな軸ミキサである時間差式ミキサ (Time Difference type Mixer : TDM) について述べる。軸ミキサの基本原理は流入した流体を複数に分岐して、時間差をつけて再合流することである。本原理について CFD 解析を行い、得られた知見をもとに TDM の改良を進め、大幅な圧力損失の低減と混合性能の向上を達成した。圧力損失の大幅な低減は、配管の断面方向でしか混合・攪拌が出来なかった従来のスタティックミキサとの併用が可能となった。

第3章 「旋回流型エジェクタの開発と実用化」では、高い反応性を有する流体をインライン混合する為の静止型混合器として旋回流型エジェクタ (Swirl Flow Ejector : SFE) が有効であることを CFD 解析と実流試験の両面から Kenics 型スタティックミキサとの比較によって明らかにする。SFE は従来のエジェクタと異なり駆動流を配管軸の外周から流入させる構造を有し、その時に発生する旋回流によって合流した流体を瞬時に混合するものである。CFD 解析においては合流直後の混合・攪拌速度は SFE が優れているが、最終的な混合度合いについては従来のスタティックミキサのほうが優れていることがわかった。

本研究において2つの新たなインラインミキサを開発したが、両者ともに従来のスタティックミキサの弱点を補完するものであり、これらを併用することでインライン式の混合・攪拌プロセスの適応範囲の拡大に大きく貢献できると考える。

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

平成 28 年 2 月 9 日

理工学研究科長 殿

課程博士論文審査委員会

主査 高橋 幸司 印

副査 西岡 昭博 印

副査 松田 圭悟 印

副査 印

副査 印



学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

| | | | |
|---|------------------------------------|---------|-------------------------------------|
| 論文申請者 | 専攻・分野名 バイオ工学専攻・バイオ化学分野 氏名 花田 敏 広 | | |
| 論文題目 | 数値流体力学を用いた新規インラインミキサーの開発と実用化に関する研究 | | |
| 学位論文審査結果 | 合格 | 論文審査年月日 | 平成 28 年 2 月 2 日～ 平成 28 年 2 月 9 日 |
| 論文公聴会 | 平成 28 年 2 月 9 日 | 場 所 | 工学部 3-4202 教室 |
| 最終試験結果 | 合格 | 最終試験年月日 | 平成 28 年 2 月 9 日 |
| 学位論文の審査結果の要旨 (1,000 字程度) | | | |
| <p>本論文は原料を連続的に反応器に投入して反応させ、生成物を連続的に器外へ取り出すインラインミキサの開発を目的としている。すなわち流れ方向に濃度ムラのある流体、及び反応性の高い流体を効率的に混合することが出来る新規の静止型混合機の開発を目的とした。</p> <p>流れ方向にムラのある流体に対しては時間差式ミキサを提案した。すなわち主流を幾つかの滞留時間が異なる粒度に分岐させ、再び合流させる概念を実現した。しかしながら、当初考案された形状は圧力損失が極めて大きく、これを改善するため CFD 解析を行うことによりその値を 40%も低下させることに成功した。さらに分岐流路ごとの応答を求めることにより混合性能も向上させた。トレーサにより着色した液体を断続的に注入する実験において本装置を用いることにより流れ方向の濃度ムラが解消されることを明らかにしている。本装置は外乱の入る恐れのある反応器や排水施設に対して効果的な働きをするものと考えられる。また、トレーサービリティが要求される製薬工業などでの利用が期待される。</p> <p>次に高い反応性を有する液体をインライン混合するため、旋回流型エジェクタを開発した。すなわち駆動流に対して鉛直方向から強力な旋回流を吹き出すことにより反応流体を瞬時に混合する方法を採用した。この混合性能は CFD 解析を用いて従来の代表的なスタティックミキサである Kenics 型と比較してその優秀性を明らかにした。さらに反応性の高い薬液に対し実験を行い、その有用性を確認している。</p> <p>本研究は筆頭論文 1 報、国際会議 2 件にて発表されており、発表された学術誌並びに国際会議は最も権威のあるものである。審査基準は満たしており、また、学術的並びに工学的価値は極めて高いものと判断する。</p> <p>以上の結果より本論文は博士後期課程博士論文審査基準を十分満たしているものと認め、合格と判定した。</p> | | | |
| 最終試験の結果の要旨 | | | |
| <p>学力認定は、博士論文公聴会における質疑応答と口頭諮問を通じて、博士論文に関係する内容および当該専攻分野の内容について実施した。その結果、博士として必要とされる専門知識並びに学力は十分なものと認められた。</p> <p>外国語科目（英語）については、英語による筆頭論文 1 報ならびに国際会議 2 件などから、英語力は十分であると判断した。</p> <p>これらに基づき審査委員による審議の結果、合格と判定した。</p> | | | |