

進歩賞受賞記念



マイクロ波照射による界面での局所加熱の無次元数評価

Evaluation by dimensionless number of local heating at the interface by microwave irradiation

兵庫県立大学大学院工学研究科 朝熊 裕介
 University of Hyogo, Yusuke Asakuma
 〒671-2280 兵庫県姫路市書写 2167
 e-mail: asakuma@eng.u-hyogo.ac.jp

1. はじめに

私は、東北大学の化学工学専攻において、三浦隆利名誉教授、青木秀之教授の下でプロセス工学（特に熱工学）を学んだ。兵庫県立大学に着任後は、新たな実験装置を立ち上げる際に、新規現象の発見や高効率プロセスの構築を目指し、オリジナルの研究テーマを考案しつつ、実験装置の作成やプログラム解析コードの作成に取り組んでいる。その過程で10年程前に、マイクロ波の研究と出会い徐々に研究テーマを増やしていった。当初は、化学工学の分野では、マイクロ波は加熱効率や加熱速度の向上という認識が強く特殊効果には懐疑的で、マイクロ波の研究に挑戦することはチャレンジングな面もあった。一方で、化学プロセス構築に向けて基礎的な研究が不足しているという直感を信じ、次節に示すマイクロ波関連テーマを立ち上げていった。特に、反応促進のテーマは多いものの、化学工学の分野において熱や物質の移動現象的な視点からマイクロ波の効果を検証した研究は皆無であったことから、専門の熱工学的視点からマイクロ波研究の問題点や必要性を中心に学会などで報告している。マイクロ波は高効率加熱、急速加熱、選択加熱等の特徴があり、熱的な効果の考察や装置作成の際は学生時代からの知識や経験は有用であった。異分野からの挑戦であったものの、研究が進展するにつれて基礎データの蓄積から新たな知見も見つかるようになった。その結果、学際領域という特徴を活かし助成金申請等で獨創性をアピールすることで、資金やテーマの連続性の点で好循環となり、研究テーマの新たな展開が

可能になった。近年は、卒論および修論におけるテーマの多くが、プロセス工学と関連したマイクロ波関連研究となり、現在に至っている。

このように、筆者の専門である化学工学と融合しユニークな研究を発案することを重視してきた。また、他の研究の追随ではなく、世界的に見ても類を見ない装置を作成することを心掛けてきた。さらに、プロセス工学的な視点を重視しながら学術的検証を行っている。

今回、次節で示すようなプロセス工学的な視点からの研究テーマ「マイクロ波照射による界面での局所加熱の無次元数評価」で日本電磁波エネルギー応用学会の進歩賞の栄誉を賜り、大変光栄に思っている。同時に、受賞に際し、一緒に実験を行った学生諸子をはじめ多くの共同研究者の皆様のご支援に深く感謝する。

2. マイクロ波照射下での観察事例

現在の主要なテーマとして、マイクロ波と専門の熱・流体の分野と融合し、新しい現象の発見や解明を目指している。特に、化学プロセスに関する「特殊環境下における界面を含む対流や特殊効果」に注目している。初期の研究として、浮力が駆動力となる対流(レイリー・ベナル対流)の観察に挑戦し、マイクロ波によって対流や相分離が制御可能であることを発見した。この経験から、他の微細な領域での対流も外部因子によって影響されると確信し、マイクロ波が局所的にマランゴニ効果にとって重要な

界面での温度勾配や濃度勾配に影響を及ぼすと予想した。さらに、流体力学で流れの可視化として多用される PIV(Particle image velocimetry)技術を駆使し、マイクロ波照射下において、温度勾配や濃度勾配による表面張力差が駆動力となる対流(マランゴニ対流)の観察を行い、非接触で微細領域を攪拌できることを発見した。また、この界面でのマイクロ波集中によって、界面での微細な領域において熱拡散や物質拡散、浸透圧を制御できることを発見した。一方で、同時に行っていたマイクロ波照射中 DLS(Dynamic Light Scattering:動的散乱法)技術を用いた気泡(ナノバブル)の観察実験では、マイクロ波が気相や極性のない油相を通過して界面に到達し、吸収・減衰する重要な現象を気泡生成から説明した。

3. 無次元数の重要性および提案

上記のように、マイクロ波照射炉内の熱的な移動現象を検証するためには、関連するパラメータ数を減らし、出力や溶液の種類が変更されても対応できるよう、現象を一元的に評価する必要がある。つまり、変数同士を組み合わせ、次元をもたない変数(無次元数)として物理現象を数式化する。例えば、流体力学や伝熱工学の分野では、層流や乱流の指標には Re 数が、上記のレイリー・ベナール対流やマランゴニ対流の評価には Ra 数や Ma 数等の無次元数が用いられる。また、対流伝熱は Re 数や Pr 数の関数となり Nu 数で制御される。このように、実際の物理量で個々に表現するより、操作パラメータや物理量との比で表したほうが流体挙動を予測するためには便利なので、熱工学や流体力学の分野では、無次元数を用いることでプロセスの制御や現象の予測と検証が達成されている。そこで、主に加熱の用途で用いられるマイクロ波に関しても、同様の無次元数が存在すると考えた。

このように、界面においてマイクロ波吸収だけでなく、熱移動の重要であると考え、熱物性値である界面張力をマイクロ波照射中で測定した。照射中に熱効果以上の特異的な現象が発見され、それらを評価するために無次元数が提案された。この無次元数は、マイクロ波による発熱と界面からの熱拡散の比で表され、「マイクロ波の界面での局所加熱」の指標となる。つまり、この値が大きい方が界面でよりマイクロ波が吸収し熱エネルギーが集中する。これにより、本無次元数は照射中の局所的な沸騰や界面

活性剤の脱着のような界面での移動現象を特徴づける指標として学術的に認められ、更なる学問的な体系化に向けて検証を進めている。

4. 無次元数を用いた今後の研究

この筆者らが提案の無次元数は、対流や界面での特異現象だけでなく反応場にも応用できると考えられる。例えば、反応促進に関するマイクロ波特殊効果は、「マイクロ波集中度合い」の指標となる本無次元数が同程度の条件で比較しなければならない。つまり、吸熱・発熱特性や容器の断熱条件に関する熱収支だけでなく、本無次元数が果たす役割が大きいと考えられる。

また、プロセス工学が果たす役割として、種々の化学プロセスにおいて、マイクロ波加熱や特殊効果発現の指標として本無次元数が用いられれば、加熱効率の向上やプロセスの安定化、ラボスケールからのスケールアップに寄与できる。例えば、本無次元数の利用価値を向上するためには、他の加熱操作での Nu 数と同様に、本無次元数が他の無次元数との関数であることを立証し、汎用性を高める必要がある。最終的に、マイクロ波プロセスを、化学プラントにおける他のプロセスと同じように無次元で制御可能になることを期待している。このように、制御法が確立し熱効率がよいマイクロ波の工業利用が進めば、省エネ化が達成できる。今回の無次元数の発見が、この礎となれば幸いである。

5. 最後に

従来、熱工学や流体力学の分野において、無次元数は Re 数や Nu 数をはじめ 40 個程度が 1800 年代から 1900 年中ごろにかけて提案されている。近年の報告例は皆無であり、筆者らによる新たな無次元数の発見は学術的にも価値のある画期的な事例である。上述の研究は国内外の化学工学関連や熱流体部門等の研究者との共同研究の成果の結果であり、筆者のみでは達成できず、各研究者との活発な技術および知識の交流が研究レベルの向上に貢献したと確信している。今後も、JEMEA の関係者の皆様をはじめ、国内外の学会においても、積極的な成果の公表による研究者との意見交換を行い、新たなテーマの探索や問題解決ができることを楽しみにしており、同時に、JEMEA 関連の学会業務の貢献に携われれば幸せである。