

## 마이크로 공간에서의 혼합 (mixing)

한국에너지기술연구원  
이승재

혼합은 지난 수십년간 stirred tank에서 이루어져 왔으며, 따라서 모든 혼합 관련 문제들은 이러한 조건을 가정으로 사용되었다. 그러나 최근 혼합 자체에 대한 관심이 커지면서, 특정 혼합 공정을 맡는 장치의 개발이 관심이 높아지고 있다. 이에 따라 산업계에서는 rotor stator, static mixer, multi-shaft mixer, extruder, pulping machine 등이 사용되고 있다. 전문가들은 기존의 stirred-vessel mixing에서 in-line mixer와 같은 연속식 혼합의 사용이 증가 할 것으로 예측하고 있다. 따라서 마이크로 구조를 가지는 혼합기의 응용 기회도 보다 많아 질 것으로 생각된다.

많은 수동 형태의 마이크로 구조 혼합기는 기존의 static mixer에 대한 매크로 스케일의 디자인 원리를 그대로 따르고 있다. 이에 따라 기존의 혼합기에 비해 다음의 장점을 나타낸다.

- Compactness and low capital cost
- Low energy consumption and other operating expenses
- Negligible wear and no moving parts, which minimizes maintenance
- Lack of penetrating shafts and seals, which provides closed-system operation
- Short mixing time and well-defined mixing behavior
- Marrow residence-time distribution
- Performance independent of pressure and temperature

덧붙여, 다음의 특정 화공학적 분야에서의 마이크로 혹은 마이크로 구조 혼합기의 필요성이 증가하고 있다.

- Enabling technology for niche mixing, where conventional mixers fail
- Enabling technology in particular for mixing under laminar-flow conditions in minute spaces
- Fast mixing for even faster reactions in chemical synthesis
- Analytical processing of fast reactions, e.g. for quench-flow analysis (<1ms) to study rapid biological transformations
- Laminar mixer of viscous media, as most micro-flow processing is anyway in that regime

- Mixing at only small overall internal device volumes, e.g. for
  - ▶ handling of rare, precious samples in analysis or synthesis
  - ▶ handling and screening of numerous samples on a small format in chemical and biological analysis
- Mixing below threshold dimensions and at small partial internal volumes to ensure safety, for both mechanistic and thermal reasons, respectively
- Mixing of a flow high structural regularity, e.g. to enhance predictability of modeling and to improve scaling-/numbering-up

미소 공간에서의 혼합은 기본적으로 확산과 대류의 두가지 원리에 의존한다. 높은 농도 구배가 생기는 짧은 거리에서의 확산은 채널을 더욱 더 작게 만듦으로써 적용될 수 있는 원리이다. 이 원리를 적용하는데 있어서 robustness (fouling)과 비용 (복잡한 마이크로 구조 제작)과 관련된 문제가 있다. 따라서 최근에는 이러한 확산식 혼합에 의한 문제를 극복하고자 주된 유체 흐름에 부차적인 흐름을 유발시키는 다양한 방법들이 사용되고 있다. 이들 방법들은 재순환식 패턴 (recirculation pattern), 무질서한 이류 (chaotic advection), 소용돌이 형태의 흐름 (swirling flow) 등이 있다. 대류는 넓은 혼합 계면을 제공함에 따라 혼합에 매우 효과적이다. 전체적인 대량의 대류 형태는 보다 큰 스케일에서 ultrasound, electrokinetic instability, acoustic means 등의 짓는 형태로 이루어진다. 높은 Reynolds number 에서는 난류 혼합이 사용될 수 있지만, 이는 비현실적인 높은 유속이 필요함에 따라 종종 실용적이지 못하다.

혼합방법으로는 능동적 (active) 혹은 수동적 (passive)인 방법으로 나눌 수 있다. 수동적 마이크로 혼합기는 공급을 위한 유동 에너지의 일부를 사용함으로써, 확산식 혼합을 위한 lamellae와 같은 초 박층 유동 구역을 가지는 유동 영역을 생성하거나 계면의 확장을 위한 부차적인 흐름에 의한 chaotic advection을 이용한다. 능동적인 마이크로 혼합기는 압력이나 전기장 같은 외부적인 힘이나 움직이는 기관에 의존한다. 능동적인 혼합을 위한 외부 에너지원으로는 예를 들어 ultrasound, acoustic, bubble-induced vibration, electrokinetic instability, periodic variation of flow rate, electrowetting induced merging of droplet, piezoelectric vibrating membrane, magneto-hydrodynamic action, small impeller, integrated micro valve/pump 등이 사용된다. 수동적인 혼합에 의존하는 장치들은 pumping action이나 hydrostatic potential와 같은 유동 에너지를 이용하여 유동을 재구성함으로써 혼합이 더 빠르게 일어나도록 한다. 예를 들어 얇은 다층의 lamellae는 interdigital 이라는 특이한 공급방식으로 생성될 수 있다. 다층의 lamellae을 생성하는 연속적인 방법으로는 split-and-recombine (SAR) flow guidance를 사용하는 방법이 있다.

나선형 유동과 같은 여러층이 적재된 유동의 재순환 형태로부터 무질서한 혼합 (chaotic mixing)이 생성되면서 계면이 급격히 증가하게 된다. 하나의 주흐름에 배열된 노즐과 같은 장치를 통해 주입된 부차적인 흐름은 넓은 계면의 micro-plumes을 형성할 수 있다. 난류 혼합은 제트 분사물의 충돌에 의해 생성될 수 있다.

능동적인 형태의 혼합기에 비해 능동적인 혼합기에 대해 더 많은 형태의 장치가 연구 되고 있다. 이는 많은 응용에 있어서 유동 에너지가 주어지기 때문이며, 또한 능동적인 형태의 혼합기는 수동적인 혼합기에서 필요로 하는 유로 이외에도 부가적인 장치를 필요로 하기 때문에 제작에 있어서 어려운 점이 있다. 또한 이들 기능을 제어할 외부 장치들이 필요하다. 이러한 점들 모두가 능동적인 혼합기를 복잡하게 만든다. 하지만 이러한 혼합기는 수동적인 혼합기를 적용하기 어려운 매우 낮은 유속 및 큰 유체 챔버에서의 혼합을 위해 사용될 수 있다. 능동적인 혼합 장치는 수동적인 장치에서 보다 훨씬 더 작은 공간을 차지할 수도 있다. 이러한 능동적 혼합기의 복잡함은 마이크로 시스템의 집적화가 보다 개선되었을 때에는 더 이상 문제 되지 않을 수도 있다.

앞서 언급한 마이크로 혼합 방법들은 혼합을 위한 마이크로 구조를 가지는 구체적인 물리적 사물로 나타나야 한다. T-나 Y- 형태의 유동 구조를 가지는 bi-lamination은 기존의 T자형 혼합장치를 유사하게 소형화 시킨 것이다. 서로 번갈아가면서 공급하는 구조를 이용하여 다층의 lamination이 형성될 수 있다. 후자의 경우는 interdigital이나 bi-furcation과 같은 방법으로 실현될 수 있다. 혼합 속도를 증가시키기 위해서는 구조적인 관점에서 다층의 lamellae 유동이 얇게 일어나도록 할 수 있다. SAR 형태의 혼합을 위해서 유동을 나누고 다시 합치는 데는 여러 가지 형태가 개발되고 있다. 여기에는 fork-like, stack-like, Möbius-type, 3-D curved caterpillar design 등이 있다. Chaotic mixing을 위해서는 마이크로 채널 안에 herringbone 구조라는 경사진 홈들을 번갈아 배열한다. 혼합 효율을 개선하기 위해 장벽이 첨가된 구조가 덧붙여질 수 있다. 후에, 단순한 곡선 형태의 채널과 지그재그 형태의 채널들이 사용되었다. Micro-plume injection을 위해서는 혼합 챔버에 여러 개의 구멍을 가진 판을 덧붙이는 데, 이들 구멍들을 단순하게 배열하여 직선적으로 주입되도록 하거나 구멍을 경사지게 만들어 복잡하게 주입되도록 할 수 있다.

혼합 원리와 일반적인 마이크로 구조 디자인에 따라 혼합기를 구분하는 것 이외에도 실제적인 측면으로 유체 네트워크에 따라 나눌 수도 있다. 소위 in-plane mixer에서는 흐름의 형태가 단일 평면에 부딪혀 생성되는 제한된 유체 네트워크로 나누어지고 합하여지는 흐름을 만든다. 다음으로 out-of-plane mixer에서는 보다 복잡하게 3차원적인 유체 네트워크가 형성된다. in-plane mixer의 예로는 bi-

laminating, T-형태와 교차된 채널의 혼합기 등이 있으며, SAR과 대부분의 다층 lamination mixer들은 out-of-plane의 예에 해당한다. Out-of-plane 혼합기의 다른 형태로는 micro-plume array injection 등이 있다.

통상적으로 생물학적 응용을 위한 칩형태의 시스템에서는 두 층 구조를 가지는 in-plane 형태로 제작된다. 이와 같은 목적으로 사용하기 위해서는, 다층 구조의 lamination은 적절한 공급 유로를 얻기 위해 여러 층들이 필요하기 때문에, electrokinetic instability mixer 와 같이 보다 단순한 디자인의 혼합기들이 적용될 필요가 있다. 반면, 혼합기가 플랜트의 일부로만 연관되어 있고, 작은 형태로 집적화될 필요가 없는 화학적 응용을 위해서는 위의 제한요소들이 문제되지 않으며, 실제로 다층 구조의 마이크로 제작 기술이 사용된다.

일반적으로 마이크로 채널을 기반으로 한 혼합기들의 응용 분야는 분석용 샘플 제조와 같은 특정 분야뿐만 아니라 반응, 가스 흡수, 에멀전화, foaming, blending 과 같은 기존의 폭넓은 분야를 포함하고 있다. 새로운 화학적, 생화학적 분석을 위한 신용카드 크기의 칩에서는 혼합을 위한 장치로 마이크로 혼합 소자 (micro mixer element)가 사용되고 있다. 칩 형태의 마이크로 혼합기 (micro mixer)는 실험실 스케일에서 기존의 화학적, 화학공학적 응용에 사용되고 있다. Pilot 이나 생산 스케일에서는 똑같은 혼합 효과를 얻기 위해 훨씬 더 큰 혼합기가 사용되어야 하며, 따라서 큰 housing에 마이크로 구조를 가진 혼합기로 구성된다. 이러한 혼합기를 정확히는 ‘마이크로 구조의 혼합기 (micro structured mixer)’ 라고 부른다.

마이크로 혼합 소자, 마이크로 혼합기, 마이크로 구조의 혼합기 들은 각각 1 ml/h, 1 l/h, 1000 l/h 의 영역에서 사용되며, 따라서 기존의 static mixer의 사용 영역뿐만 아니라 분석과 화학물질의 생산에도 쉽게 적용될 수 있다. 상한의 우동 범위에서 사용될 때는 마이크로 구조의 혼합기가 process-intensification (PI) 장치로 사용되기도 한다.

## 참고문헌

- V. Hessel, H. Löwe, A. Müller, and G. Kolb, *Mixing of Miscible Fluids*, in *Chemical Micro Process Engineering*, Wiley-VCH, Weinheim, 2005.