

마이크로 구조 반응기 공장의 개념

한국에너지기술연구원
이승재

최근 화학, 제약, 생명과학 분야에 있어서 공정 공학을 위한 마이크로 구조를 가지는 부품의 사용에 대한 중요함이 증가되고 있다. 반응기, 열교환기, static mixer와 이밖에 다른 공정 구성 요소들은 밀리미터 형태의 작은 장치로 제작이 가능하며, 여기에는 마이크로미터 크기의 세공이나 채널이 포함된다. 넓은 비표면적 덕분에 작은 크기의 장치임에도 열 및 물질 전달에 더 효율적이다. 따라서 결과적으로 화학 반응의 선택도와 수율을 더욱 향상시킬 수 있다. 마이크로 공정 공학과 마이크로 구조의 반응기, 열교환기, 혼합기 등과 같은 장치의 응용은 자체적인 통제로 개발되었다. 특히 화학 산업, 자동차 산업, 환경 기술 부문에 있어서, 고도의 선택적이고 본질적으로 안전한 조건에서 화학 반응과 물리적 변형이 수없이 이루어졌다.

1980년대 말과 1990년대 초 작은 스케일의 장치들에 대한 아이디어들이 현실화되기 시작함에 따라 화학적 생산물을 위한 마이크로 반응기의 사용도 제안되기 시작했다. 점차 많은 공정에 대한 유연성, 용량, 가변성, 안전성 등이 예측되었으며, 다소 현실적인 마이크로 반응기들은 현존하는 대용량 스케일의 공장들을 보완하였다. 주된 개념은 수송의 문제를 최소화하기 위한 분산 생산이나 현장 생산의 가능성이다. 때로는 분산된 생산은 현장에서 공정을 실행함으로써 선택된 반응의 부차적 생산이나 이들 생성물의 판매, 혹은 친환경적 처리 등을 소비자에게로 직접 이동시킨다는 장점이 있을 수 있다. 한편, 마이크로 반응기 사용 초기에 제기되었던 것 중의 하나는 위험한 반응물, 중간 물질, 생산물 등이 포함된 반응을 분산시켜 수행할 수 있다는 점인데, 이는 2001년 9월 11일 이후 테러리스트의 공격에 대상이 될 수 있다는 점에서 의문이 제기된다. 또한 반응을 위한 원재료들이 원하는 생성물보다 덜 위험하지 않은 경우도 있다. 예를 들어 phosgene의 합성에는 염소와 일산화탄소 가스가 필요하며, 이들 가스는 실린더에 가압된 독가스로 생산물인 phosgene 만큼이나 위험한 물질들이다.

그럼에도 불구하고 지난 수년간 몇몇 이론적, 실제적 연구를 통해 마이크로 반응기는 응용 단계에 이르고 있다. 제안된 마이크로 반응기의 장점들을 살려서 파일럿-스케일 혹은 생산-스케일의 공장까지 적용할 개념들이 개발되고 있다.

마이크로 반응기와 그 구조가 아닌 마이크로 반응기를 흐르는 유체를 고려한다면, 유체는 구조화되어 있다. 유체의 구조화는 다른 것들보다도 가장 중요하며, 화학 공정의 장단점들은 사용되는 반응기와 무관하다는 가정이 나오게 된다. 만약 이러한 가정이 사실이라면, 마이크로 반응기의 외형 크기는 아무런 상관이 없게 된다.

신용 카드 크기나 실험실용 크기, 생산용 크기와 상관 없이 화학반응을 주도하는 원동력은 똑같아진다. 그러면, 더 이상 ‘마이크로 반응기 (micro reactor)’라는 말은 맞지 않으며, 유체를 마이크로 스케일로 구조화할 수 있는 모든 장치를 포함하기 위해서는 ‘마이크로 구조의 반응기 (micro structured reactor)’라는 말로 대체 되어야 할 것이다. 단 하나의 마이크로 구조의 유체 흐름을 가지는 가장 작은 반응기에서의 반응 조건은 병렬로 수백, 수천의 유체 흐름을 가지는 보다 큰 장치에서도 같을 것이다.

그럼에도 불구하고, 이미 단일 채널이나 다중 채널을 가지는 신용 카드 크기의 장치를 ‘칩 반응기 (chip reactors)’라고 부르며, 강철로 만들어진 혼합기와 같은 단일 반응기를 ‘마이크로 반응기 (micro reactors)’라고 불리고 있다. 또한 스케일을 늘리는 ‘scale-up’ 대신 수를 늘리는 ‘numbering-up’의 개념이 현실적이다. 이들 고찰로부터 논리적인 결론을 도출하여 보면, 마이크로 구조를 가지는 화학 공장은 ‘마이크로 구조 반응기 공장 (micro structured reactor plants; MRPs)’으로 불려져야 할 것이다. 종종 사용되는 ‘마이크로 공장 (micro plants)’는 대개 마이크로 구조를 가지지 않은 작은 스케일의 소형 공장 (miniplants)을 언급한다.

탁상 크기의 MRP가 소량 시장에 나와있고, 생산용 목적으로 보다 큰 스케일의 장치도 있다. 그러나 공학자들은 아직 MRP를 디자인한 경험이 많지 않고, 또한 디자인이나 제어를 위한 체계적인 도구들도 부족한 상태이다.

Hasebe는 MRP의 디자인과 응용을 위한 규칙들에 대한 개념을 서술하였다. 먼저, 마이크로 장치에서 화학반응을 시키는 뚜렷한 이유가 있어야 한다. 목적하는 생산물이 기존의 방법으로는 생산할 수 없다든가, 목적하는 생산물의 효율을 크게 향상시킬 수 있어야 한다. 현재 많은 화학반응들이 마이크로 반응기에서 수행되고 있지만, 이러한 규칙을 만족시킬 수 있는 반응들은 얼마나 될지 미지수다.

화학 생산을 위해 MRP가 사용된다면, 주로 문제되는 것이 경제적인 면이다. 의심의 여지 없이, 마이크로 구조 장치에서의 전체 유량이 기존의 회분식 공정과 경쟁성을 가질 만큼이 되어야 한다. 하지만, 마이크로 구조의 장치에서는 체류 시간이 매우 짧다. 만약 반응 속도가 느리다면, 접촉 시간을 증가시킬 수 있는 부가적인 장치가 필요하게 된다. 따라서, 표준의 실행 계획안을 그대로 마이크로 구조 반응기에 옮기는 것보다는 반응 속도를 향상시키는데 주력하여야 할 필요가 있다.

마이크로 장치의 크기가 작기 때문에 새로운 디자인 방법이 요구된다. 기존의 단위 조작과 마찬가지로, ‘마이크로 단위 조작 (micro unit operation)’이라는 마이크로 스케일의 부속물들이 필요하게 된다.

마이크로 구조의 장치에서 크기는 기능에 크게 영향을 미친다. 이러한 전체 조건은 기능과 물리적 디자인과 분리되어 고려될 수 없다. 예를 들어, 단순한 마이크로

채널이 있는 장치에서, 단면적과 체류 시간이 기능에 영향을 미치는 지배적인 요소라고 가정한다면, 단면적을 넓히게 되면 마이크로 채널의 이점을 잃게 된다. 또한 주어진 유속과 단면적을 일정하게 유지시킨 상태에서 장치의 길이를 늘리거나 채널의 수를 늘리게 되면 체류 시간이 증가하게 된다. 따라서 디자인의 한계 (design margin)가 모델과 매개 변수의 불확실성을 보충해주지 못할 수도 있다.

기존의 디자인에서의 단위 조작은 장치 안쪽의 위치에 상관없는 항목들로 모델화되었다. 마이크로 구조의 장치에서는 확산과 대류가 장치 기능에 크게 영향을 미치기도 하지만, 장치의 형태에 따라 확산과 대류 조건이 달라지기도 한다. 최적화된 유체 마이크로 장치를 얻기 위해서는 장치의 형태에 대한 몇 가지 제약이 필요하다. 이러한 제약들로는 평균 체류 시간, 체류 시간 분포, 온도 분포 등이 있다.

마이크로 장치의 내부 구조는 기존의 화학 장치에 비해 매우 작지만, 장치의 물리적 현상을 규명하기 위해 매크로 스케일에서 수립된 물리적 법칙들을 사용하기에는 충분히 크다. 그러나 기존의 반응기를 디자인할 때는 무시되던 항들이 다시 고려되어야 할 필요가 있다. 마이크로 열교환기의 효율 분석을 예로 들면, 구리, 스테인리스 스틸, 유리 등의 서로 다른 재질을 사용한 마이크로 열교환에 대한 CFD 분석 결과 유리나 스테인리스 스틸로 제작된 열교환기가 구리로 제작된 것 보다 열전달 효율이 더 높은 것으로 나타났다. 구리의 열전도율이 높기 때문에, 온도의 분포가 길이 방향에 대해 평균치를 나타내었다. 반면, 구리보다 낮은 열전도율을 가지는 스테인리스 스틸이나 유리의 경우에는 온도 구배가 급격하게 나타났으며, 열전달 효율도 높게 관찰되었다. 이러한 결과는 열전달 효율이 채널 벽 안에서 길이 방향의 열전도에 크게 영향을 받는다는 가정을 도출시킨다. 이와 유사한 결과들이 다른 저자들에게서도 관찰되었다. 그러나 매크로 스케일의 열교환기를 디자인할 경우에는 길이 방향의 열전도도는 크게 영향을 미치지 않아 대개 무시된다.

반응기의 수를 늘리는 **numbering-up**은 MRP를 만들기 위해 마이크로 반응기를 사용하는 중요한 장점 중의 하나이다. 경제적이거나 기술적인 수요에 따라 처리량을 쉽게 조절할 수 있게 된다. 한가지 문제 되는 것은 마이크로 장치를 어떻게 같은 성능을 유지시키면서 **numbering-up**하여, 하나의 장치로 만들 것인가 이다.

일반적으로 생산 속도를 높이기 위해서는 병렬로 배열되어 운전되는 단위 MRP의 숫자를 늘려 구성된 하나의 MRP에서 화학 공정이 이루어지도록 할 수 있다. 각각의 MRP는 여러 개의 마이크로 단위 조작으로 구성된다. 어떤 경우에는 반응 체류 시간이 너무 길거나 중간 생성 물질의 저장이 필요하고, 기존의 단위 조작이 전체 공정의 일부로 필요할 수 있다. 체류 시간이 짧은 경우에는 병렬로 구성된 MRP의 앞뒤로 분배 장치가 결합된 형태가 더 나을 수 있다. 만약 두 개의 마이크로 단

위 조작이 서로 다른 온도에 운전되어야 한다면, 이들은 열적으로 분리되어야 할 것이다. 생산 공정에 대해 마이크로 펌프가 아닌 기존의 펌프와 같이 기존의 환경이 사용되기 원할 수 있다. 이런 경우에는 혼성 시스템이 형성될 수 있다.

기존의 화학 공장에서는 공장 건설 후 측정 장치의 첨가나 교체가 용이하다. 이러한 것은 확실히 마이크로 반응기에서는 행해지기 어려우므로, MRP의 디자인과 제어 장비와 계측기의 디자인이 동시에 이루어져야 한다. 또한 측정과 같은 방해 요소를 피하여야 하며, 공정의 방해 요소에 대한 대책이 마련되어야 한다. 관찰 변수, 제어 변수, 조작 변수 등은 준비된 대책에 따라 선택되어야 한다. 결과적으로 필요한 대책을 수행하는 계측기나 조작 장치가 없다면 공정 자체가 변화되어야 할 것이다.

기존의 화학 공장에서는 운전 조건을 유지하기 위해 피드백 제어 방식이 지배적으로 사용되고 있다. 회분식 반응기의 온도는 반응기 내부의 반응 혼합물 온도를 측정하여 제어된다. 대개 가열이나 냉각 매체는 일정한 온도를 가지며, 이러한 매체의 유량을 조절함으로써 반응기 혼합물의 온도를 쉽게 변화시키고 제어할 수 있다. 마이크로 유체 장치에서의 온도 제어를 위해서는 간접 측정이 또 하나의 이슈이다. 마이크로 장치를 흐르는 유체의 온도는 가열이나 냉각 매체의 온도를 일정하게 유지시키는 방법으로 제어할 수 있다. 마이크로 장치의 열적 효율은 매우 높기 때문에 반응물의 온도는 일정한 범위 내에서 유지된다고 볼 수 있으며, 이러한 관점에서 가열이나 냉각 매체의 온도를 피드백 제어하게 된다.

참고문헌

- V. Hessel, H. Löwe, A. Müller, and G. Kolb, Micro Structured Reactor Plant Concepts, in Chemical Micro Process Engineering, Wiley-VCH, Weinheim, 2005.