

Chaotic Mixing 을 갖는 SAR(split-and recombine) 마이크로 믹서의 설계 Design of SAR micro-mixer with chaotic mixing

*,#김기돈¹, 윤여환¹, 한창수¹, 김유석², 최재훈²

*,#K. D. Kim(kdkim@kimm.re.kr)¹, Y. H. Yoon¹, C. S. Han¹, Y. S. Kim², J. H. Choi²

¹ 한국기계연구원 나노공정장비연구센터, ² KILG 화학 기술연구원

Key words : Chaotic mixing, SAR(Split-and recombine), micro mixer

1. 서론

Reynolds 수가 1000 이하의 서로 다른 유체는 확산에 의해서 혼합이 발생한다. 낮은 Reynolds 수를 갖는 유체의 혼합에서 확산 효과를 높이기 위해서는 상이한 유체가 서로 보다 넓은 면적에서 접촉함으로써 가능하다. Micro mixer 는 대표적인 층류 유동이 존재하는 형태이며 이와 같은 micro mixer 는 혼합을 유도하는 방식에 따라 능동형과 수동형으로 나뉜다. 능동형 mixer 는 외부로부터 에너지를 전달 받아 유체의 혼합을 돕는 형태로 일반적으로 복잡한 제작 과정이 필요하며 유체에 에너지를 전달하기 위해서 특별한 구조를 가져야 한다. 이와 같은 능동형 mixer 에는 magnetic stir bar, acoustic cavitation cell 등이 있다. 이와 반대로 수동형 mixer 의 경우 채널의 구조적 특성을 이용하여 혼합 특성을 개선한다. 앞선 능동형에 비하여 제작이 용이한 특성을 갖고 있으며 다양한 채널 구조에 적용 가능한 장점이 있다. 수동형 mixer 는 채널내에서 chaotic 흐름을 유도하여 혼합 효율을 높인 chaotic mixer 와 분리와 혼합과정을 반복적으로 수행하여 효율을 향상시킨 SAR(Split-and recombine) mixer 로 나뉜다. Chaotic mixer 는 Science 에 게재된 A.D. Stroock 의 논문이후 많은 관련 연구가 진행 되었다. 100 이하의 Reynolds 수를 갖는 유체에 대하여 채널 내부의 패터닝을 통해 혼합율을 개선하였다. SAR mixer 는 일반적으로 빠른 유속에 대하여도 안정적인 혼합을 이루는 것으로 알려져 있으며 Engineering 분야에서 가장 광범위하게 사용되는 mixer 중 하나이다[1-5].

본 논문에서는 앞서 설명한 Chaotic mixer 와 SAR mixer 를 합하여 유체가 분리와 혼합을 반복적으로 수행하면서 그 혼합된 유체에 Chaotic 유동을 부가하여 혼합의 효율을 높이는 연구를 수행하였다. 이와 같은 연구를 수행하기 위하여 상용 프로그램인 CFD-ACE+를 사용하여 수치해석적 접근을 하였다. Science 에 게재되었던 논문의 모델이 대하여 수치 해석을 수행하여 mixer 의 길이에 따른 혼합 효율을 정량화 하였으며 chaotic mixing 을 위한 ridge 의 높이에 따른 효과를 같은 모델에 대한 수치 해석으로 분석하였다. SAR 모델에 대하여 동일한 방법으로 수치해석을 통한 분석을 하였으며, 이 SAR 모델에 Chaotic mixing 이 가능하도록 유체가 이동하는 채널에 ridge 를 설계하여 그 효과를 분석하였다.

서로 다른 액체간의 혼합의 문제에서 두 액체간의 점성, 밀도의 차이가 적어 물성의 차이가 유동장에 크게 영향을 미치지 않을 경우 두 액체의 물성을 하나의 대표값으로 가정할 수 있다. 이러한 경우 유동장을 해석하고 추가적인 수송방정식을 정의하여 해를 구해 혼합 문제를 다룰 수 있다. 그러나 두 액체간의 물성의 차이로 인해 유동장이 영향을 받을 경우 각 액체에 대한 물성 및 두 액체간의 혼합 정도에 따른 물성의 변화를 고려해야한다. 본 논문에서 사용한 CFD-CAE 는 액체 혼합의 경우 두 액체 간의 혼합 정도에 따른 밀도 계산 모델을 지원하지 않아 user subroutine 을 사용하여 밀도를 정의하였으며, 점성의 경우 식 1-1 과 같은 Mix Polynomial in T(Liq) 모델을 사용하여 화학 종의 질량 분율에 따른 혼합액의 점성을 정의 하였다.

$$\ln(\mu_{mix}) = \sum_{i=1}^N (x_i \cdot \ln(\mu_i)) \quad (1-1)$$

x_i = mass fraction of species i and species j

μ_i = viscosity of species I calculated using a Polynomial in T

확산계수는 상수로 가정하였으며 표 1 은 수치 해석에 사용한 액체와 그 물성이다.

Table 1 Properties of liquid used in numerical simulation

Fluid	Viscosity (kg/m-s)	Diffusivity (m ² /s)	Density (kg/m ³)
Water	8.55E-4	1.2E-9	999.8
Ethanol	1.2E-3	1.2E-9	789

위와 같은 방법에 의한 수치 해석 후 두 액체간의 혼합의 정도를 정량화 하기 위하여 식 1-2 를 이용하여 mixing efficiency 를 계산하였다.

$$\eta = \left(1 - \frac{\int_0^l |c - c_\infty| dx}{\int_0^l |c_0 - c_\infty| dx} \right) \times 100\% \quad (1-2)$$

c_∞ : 완전 혼합시의 농도

c_0 : 초기 혼합 전 농도

l : 출구의 단면적

2. 본론

2.1 Chaotic mixing 해석

Ridge 를 갖는 채널의 mixing efficiency 를 계산하기 위하여 Fig. 1 과 같은 모델을 사용하였다. Fig. 1 의 모델은 Ref. 4 에서 실험을 통하여 chaotic mixing 효과를 검증한 모델로 Ref. 4 에서는 약 3cm 의 길이를 유체가 통과하면 혼합이 완료된 결과를 보여줬다. 본 논문에서는 Ref. 4 모델의 채널 폭, ridge 폭, 각도, 높이를 동일하게 하였으며 단지 해석 환경을 고려하여 채널의 길이를 6 mm 로 제한하여 해석을 수행하였다. Fig. 2 는 Fig. 1 에서 12 개의 ridge 를 하나의 set 으로 하여 12 개의 ridge 를 지날 때 출구에서의 mixing efficiency 를 그래프로 나타낸 것이다. 또한 ridge 의 높이를 15 μ m에서 60 μ m까지 증가시킬 때의 mixing efficiency 를 Fig. 2 에 함께 나타내었다. Ridge 의 높이에 따른 효과는 12 개의 ridge 만을 해석에 포함시켜 출구에서의 mixing efficiency 를 계산하였다.

채널의 길이가 늘어나면서 mixing efficiency 는 비례하여 증가하였으나 채널의 길이가 1.5mm 에서 3mm 로 증가할 때는 채널 길이의 증가만큼 약 2 배 정도의 mixing efficiency 가 증가하였으나 채널의 길이가 증가할수록 mixing efficiency 의 증가량은 줄어들었다. 이와 같은 현상은 ridge 의 높이가 증가 할 때도 나타났으며 ridge 의 높이가 45 μ m이상인 경우 mixing efficiency 의 증가는 크게 감소하였

다. Ridge의 높이를 더욱 높이다라도 mixing efficiency는 약 30% 정도에 수렴할 것으로 예상되며 채널의 길이 또한 Ref. 4의 실험에서와 같이 수 cm 정도의 길이가 완전한 혼합을 위해서 필요하다.

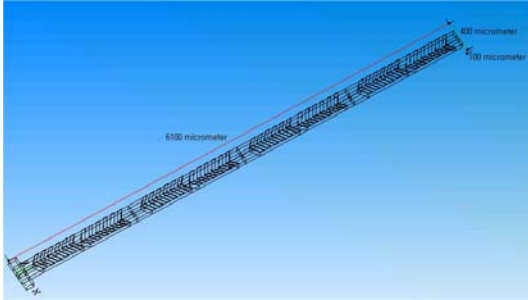


Fig. 1 Schematic diagram of 4 cycles of the chaotic mixer

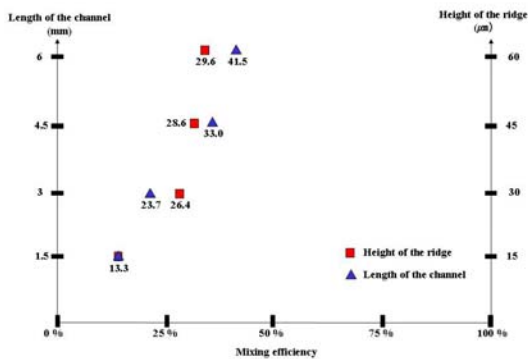


Fig. 2 Mixing efficiency with respect to the length of the channel and the height of the ridge

2.2 SAR 해석

본 논문에서 사용된 SAR 모델은 Fig. 3 과 같이 두 유체가 서로 분리와 결합을 반복적으로 수행하면서 혼합을 이루는 모델이다. Fig. 3 은 ridge 가 있는 모델이며 SAR 해석에서는 ridge 가 없는 Fig. 4 와 같은 1/8 모델이 대하여 수행하였다. Fig. 4 는 두 유체가 혼합된 정도를 색으로 표시하고 있다. Mixing efficiency 에 대한 정량적 결과는 2.3 절에서 ridge 를 포함하는 SAR 과 비교하여 설명하겠다.

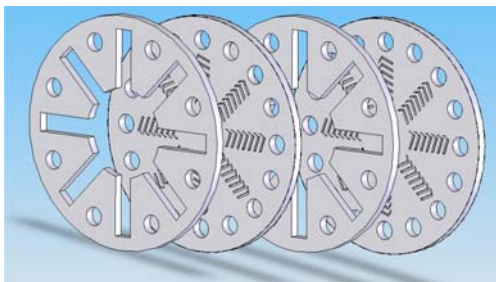


Fig. 3 Schematic diagram of SAR mixer with chaotic mixing

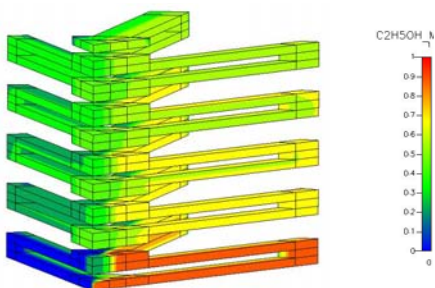


Fig. 4 Numerical result of mixing using SAR mixer

2.3 Ridge 를 포함한 SAR 해석

2.2 절의 SAR 모델의 채널에 ridge 를 추가하여 chaotic

mixing 을 유도하였다. Fig. 5 는 mixer 를 겹쳐놓은 수에 따른 해석 결과를 2.2 절의 SAR 모델과 비교하여 보여주고 있으며 Fig. 6 은 그에 따른 출구에서의 mixing efficiency 를 그래프로 나타내고 있다. 겹쳐지는 layer 의 수에 따라 6~10% 정도의 mixing efficiency 향상 결과를 볼 수 있다. 4 번째 layer 까지 해석을 수행한 결과, 최종적으로 89.9% 의 mixing 효율을 얻었으며 이와 같은 결과는 chaotic mixing 이 없는 SAR 모델의 83.2%에 비해 약 6.7%의 향상된 결과이다.

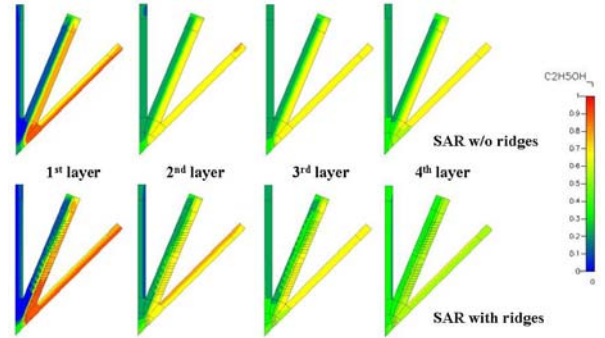


Fig. 5 Comparison of numerical result of mixing effects

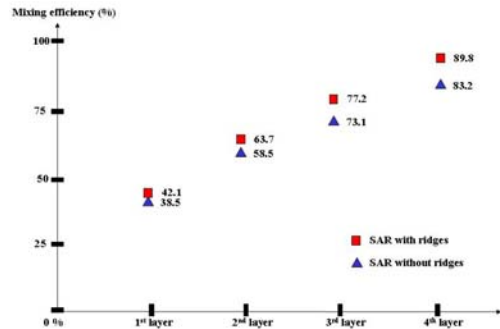


Fig. 6 Comparison of numerical result of mixing efficiency

3. 결론

본 논문에서는 Chaotic mixing 의 효과를 mixing efficiency 를 이용하여 정량화 하였으며 일반 SAR 모델과 Chaotic mixing 이 포함된 SAR 모델의 수치해석을 수행하여 그 효과에 대한 분석을 하였다. 겹쳐지는 layer 의 수에 따라서 chaotic mixing 이 포함된 경우 6~10%의 효율이 향상되었다.

후기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 고기능 초미세 광열유체 마이크로부품 기술개발 사업의 세부과제로서 수행중이며 이에 관계자 여러분들께 감사의 말씀을 올립니다.

참고문헌

1. R.H. Liu, et al, "Hybridization enhancement using cavitation microstreaming," Anal. Chem., Vol. 75, pp. 1911-1977, 2003.
2. H. Suzuki, et al, "A magnetic force driven chaotic micro-mixer," MEMS 2002, pp. 40-43.
3. L.H. Lu, et al, "A magnetic Microstirrer and array for microfluidics mixing," IEE, Vol. 11, No.5, pp. 462-469, 2002.
4. A.D Stroock, et al, "Chaotic mixer for microchannels," Science, Vol. 295, pp. 647-651, 2002.
5. F. Schonfeld, et al, "An optimized split-and-recombine micro-mixer with uniform 'chaotic' mixing," Lab on a Chip, Vol. 4, pp. 65-69, 2004.