

Defocusing 기법을 이용한 마이크로 믹서내의 3 차원 유동장 측정연구

김수현* · 윤상열* · 김경천†

The study of three dimensional flow field using defocusing method in micromixer

Su Heon Kim, Sang Youl Yoon, Kyung Chun Kim

Abstract

This study was conducted for obtaining the optimized data to build the mixer or micro fluid device as measuring the three dimensions flow field in micro mixer. To acquire the rapid diffusion on the region of low Reynolds ($Re < 100$), the staggered herringbone mixer using chaotic advection was selected in this case. At first, by conducting the numerical analytical virtual experiment using CFD-ACE+, three dimensions flow field in the micro mixer was estimated. As this flow field was proven using defocusing particle tracing method, the behavior of micro flow with three dimensional aspects could be analyzed. Numerical analysis and flow pattern in the micro mixer by experimental verification made to be able to analyze the chaotic advection. These can be important sources for building more optimized form. Verifying the information of three dimensional flow structure, these information can be used as the data for developing and improving the μ -TAS.

Key Words : Defocusing Method, Staggered Herringbone Mixer, Diagonal Mixer, Mixing

1. 서 론

최근 미세유체소자는 바이오, 화학 분야에 적용되어 관심이 증대되고 있으며 Lab-on-a chip 과 μ -TAS(Micro Total Analysis System)등의 연구에 많이 응용되고 있다. 특히 μ -TAS 는 분석 대상의 이송, 혼합, 반응 등의 역할을 수행하는 미세유체소자들로 이루어져 있다.

이러한 미세유체소자에서 화학적 반응에 사용되는 시약의 균일한 용해와 Poiseuille 유동에서의 물질의 분산에 대한 제어 등을 위해 마이크로 채널 내의 유체 유동의 혼합은 필수적이다.

하지만 마이크로 단위의 크기에서는 그 혼합이 어렵게 된다. 비록 마이크로 단위에서의 확산은 빠른 지라도 낮은 레이놀즈 수($Re < 100$)와 마이크로 채널 자체의 좁고 긴 형상으로 인해 층류유동이 형성되어 두 유체의 난류를 이용한 혼합은 기대하기 어렵다.

따라서 다수의 마이크로 믹싱 장치는 이러한 마이크로 유동의 층류성에 의한 제한을 극복하기 위해 발전해 오고 있다.

이에 마이크로 채널 내부에서의 혼합을 효과적으로 수행하기 위해 채널 바닥에 DM(diagonal mixer) 또는 SHM(staggered herringbone mixer) 형태의 패턴 형에 의한 채널의 횡단축의 속도 성분을 발생시키는 마이크로 믹서에 대한 연구가 이루어지고 있다. Abraham D.Stroock 는 DM(diagonal mixer)와 SHM(staggered herringbone mixer) 내의 낮은 레이놀즈 수와 정해진 Peclet 수에서 대각선과 해링본 패턴을 통한 횡단 축 속도성분을 이용하여 마이크로 채널

† 부산대학교 기계공학부

E-mail : kckim@pusan.ac.kr

* 부산대학교 대학원 기계공학부

내의 혼합효율의 증가를 보여주었다. 하지만 마이크로 채널 내부의 측정에 있어 3 차원적인 데이터를 획득하기는 미세한 크기에 의한 접근성의 한계, 광학현미경의 고배율에 의한 낮은 광량의 한계 등에 의한 제약이 따른다.

따라서 본 연구에서는 Yoon 의 Defocusing 개념을 이용한 미소유체소자에서의 3 차원적 입자추적의 방법을 이용하여 마이크로 믹서내부의 3 차원적 유동 정보를 정량적으로 분석한다는 의미를 둔다. 먼저 CFD-ACE+를 이용한 수치해석 가상실험을 통해 마이크로 믹서 내부의 3 차원 유동장을 예측해보고, 이를 Defocusing 입자추적기법을 이용하여 입증함으로써 3 차원성을 가진 마이크로 유동의 현상을 분석하려고 한다. 전산해석과 실험을 통한 마이크로 믹서내의 유동패턴을 확인함으로써 카오스 이류에 대한 분석을 수행하고자 한다.

2. 실험의 이론적 방법

바닥에 홈이 있는 직사각형 채널에 대한 유동의 형태는 이론적으로 stroock 에 의해 구해졌다. 이 때 홈은 채널의 축 $y_2 = x_1 \sin\theta + y_2 \cos\theta$ 에 관해서 각 θ 를 가지고 있다. 그리고 채널의 깊이는 H , x_2 방향의 폭은 w , 총 채널의 길이는 L 이다. 또한 채널의 유동은 완전 발달된 유동으로 가정한다. 이는 혼합길이에 있어서 입구나 출구 부근에서의 와류혼합에 의해 결정되어지는 길이의 감소에 관한 요인을 없애기 위함이다. 이 길이는 분명히 평균유동속도에 영향을 받는다. 반면 완전발달영역의 유동의 형태는 저 레이놀즈수의 범위 내에 있는 것은 아니다.

그리고 만약 홈의 파장 q 와 진폭 αH 가 다른 어떤 채널의 치수보다 작다면 앞에서 언급한 미끄럼 속도에 대한 개념을 적용할 수 있다.

파동의 진폭(αH)이 채널의 깊이 H 와 비교하여 작을 때 채널내에서 발생하는 slip 의 크기는 주 Poiseuille 유동에 비해 상대적으로 작을 것이다. 유동의 구조에 대한 추정을 위한 방법은 채널의 바닥에 대한 위치 x_2, y_2 에 대한 전단률 γ' 의 위치별 값에 대한 방정식을 얻는 것이다. 초기 유속이 y_2 의 방향에 있을 때 결과적으로 미끄럼 속도는 $v_{slip} = -q \gamma' (\alpha H)^2 (\sin\theta x_1 + 1/2 \cos\theta y_1)$ 이다. 이 중요한 효과는 x_2 방향을 따르는 요인이 횡축 압력구배가 유체의 재순환을 유발하여 성장시키기 위해서 옆면을 향해 미끄럼을 발생시킨다는 것이다.

나선형 유동의 측정은 다음 방정식으로 얻을 수 있다. 위쪽 채널 평판의 바로 아래 부분의 유동을 측정하기 위해 축 x_2, y_2 를 따르는 속도 성분비는 채널 축과 위쪽 채널 평판 아래부분의 유동

사이의 $\tan \Omega$ 의 값을 측정 함으로써 결정할 수 있다. 이 $\tan \Omega$ 은 다음의 방정식으로 구할 수 있다.

$$\tan \Omega = \frac{\alpha^2 (K_{\parallel}(qH) - K_{\perp}(qH)) \cos \theta \sin \theta}{1 - \alpha^2 (3/2 - \bar{K}(qH))}$$

3. 실험 방법 및 장치

삼각형 패턴이 있는 조리개를 objective lens 의 중앙과 삼각형 외접원의 중심이 일치하게 만들고 렌즈 위에 설치한다. 그리고 세 개의 조리개 지름 d' 는 1mm 이고 세 꼭지점의 외접원의 지름 d 는 3mm 이며 조리개의 두께는 0.2mm 이다.

Fig1 는 이번 실험에 사용된 defocusing 기법을 위한 장치를 나타낸 그림이다. 실험장치는 long pass filter cube 가 설치된 형광현미경(BX51, Olympus)과 10bit high speed camera(1200hs, PCO), 광원(Argon-ion laser), syringe pump 로 구성되어 있다. 516nm 파장을 가진 Argon-ion 레이저는 mirror 를 이용하여 측정영역에 비추어 주었고 원하는 광량을 얻기 위해 집광을 위한 렌즈를 사용하였다. 그리고 3 μ m 의 형광입자는 작동유체 (DI water)안에 잘 분산 시켰다. 이 형광입자는 최고 542nm 의 파장에서 여기되어지고 612nm 의 파장으로 방사한다. 본 실험에 사용된 형광현미경에는 560nm 보다 짧은 파장을 차단해주는 long pass filter 를 설치하였다. 그 이유는 녹색 파장범위를 가지고 조사되는 레이저 빛을 차단하여 형광입자에 의해 방사되는 광원만을 얻기 위한 것이다. 본 실험에서 사용된 high speed 카메라는 짧은 시간에 입자위치를 해상할 수 있기 위해 사용되었다. 마지막으로 마이크로 믹서 내부유동의 형성을 위해 syringe pump 를 사용하였다.

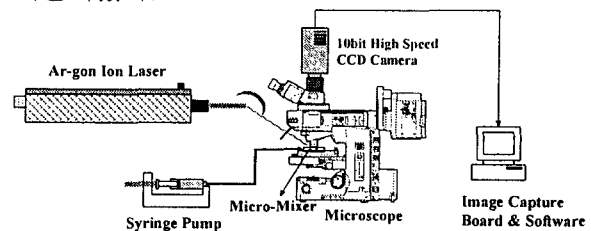


Fig 1. defocusing 을 위한 실험 장치
마이크로 믹서의 채널 바닥 부분의 grooves 의

폭은 60 μm 이고 기울기는 주 채널흐름 방향에 대해 45° 기울어져 있다. 전체 채널의 폭은 210 μm 이고 총 채널의 길이는 2cm 이다. 그리고 grooves 의 깊이는 50 μm 이고 주 채널에서의 채널 높이는 60 μm 이다.

마이크로 믹서(SHM, DM)에 있어서 α , q , H 는 y 축과 z 축에 대한 속도 성분을 가지게 만드는 변수이다. α 는 작은 무차원 변수로 본 실험에서는 대략 0.294 의 값을 가지고 있고 H 는 85 μm 의 높이를 가지고 있다. 따라서 grooves 의 깊이에 반이 되는 높이 αH 는 25 μm 의 값을 가진다. 그리고 Fig 3.3 에서의 $2\pi/q$ 의 값은 80 μm 가 되고 이를 이용한 qH 값은 6.676 의 값을 가진다. 마이크로 믹서에서 혼합에 대한 효과가 최대화되기 위한 설계조건인 $\alpha qH = 2$ 에 근접한 설계를 하였다. 그리고 SHM 에서 반 주기에 herringbone 형상 패턴이 6 개씩 들어가고 비대칭의 형상이 나머지 반 주기에 형성되어져 있다. 비대칭의 정도는 전체 채널의 폭에서 2/3 가 되는 지점에서 비대칭적으로 형성되어 있다.

4. 수치해석과 실험결과 및 검토

4.1 수치해석

전산해석에서 유량조건은 1.06mm/s 이고 작동유체는 물로 하였고 특성값은 밀도는 997kg/m³, 점성계수는 0.000855kg/ms 이다. 전산해석 결과를 통해 횡축 유동의 기울기는 9.9° 정도 편향되어 흘러가는 것을 볼 수 있다. 이는 바닥의 홈의 형상과 압력구배, 채널의 달린 형상에 의한 요인으로 발생되어 진다. Fig2 에서 오여지는 바와 같이 채널 바닥 평면의 홈에 의한 카오스 이류가 발생되어 진다. 따라서 입자가 채널 안에서 원을 그리며 주유동 방향으로 흘러가는 것을 볼 수 있다. 양쪽 벽면에서의 z 축 속도는 100 $\mu\text{m/s}$ 이고 홈에 의한 y 축 속도는 200 $\mu\text{m/s}$ 이다.

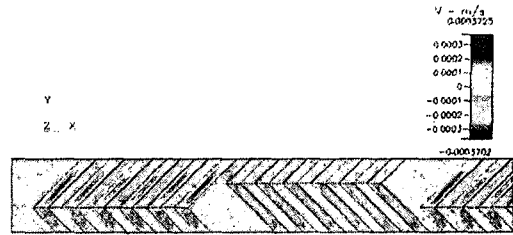
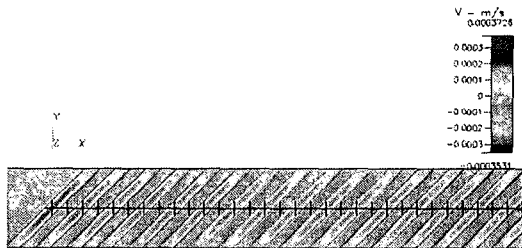


Fig 2. SHM 과 DM 에서의 Y 축 속도성분

4.2 실험 결과

defocusing 기법을 이용한 3 차원 유동장을 측정 한 결과 Fig 4 와 5 에서 보는 바와 같이 DM 입구유동에서 횡축 방향의 카오스 이류가 초기 발생하는 것을 볼 수 있고 큰 원을 그리며 주 유동방향으로 흘러가는 것을 볼 수 있다. 그리고 135 번째의 패턴 부분에서의 유동을 보면 횡축 방향의 카오스 이류가 발달되어 횡축 방향의 기울기가 커짐을 알 수 있다.



Fig 3. 위치별 입자 패턴 형상

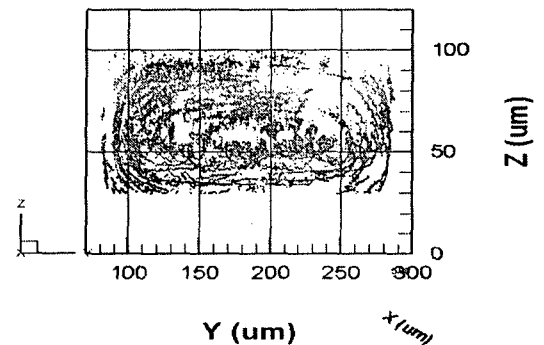
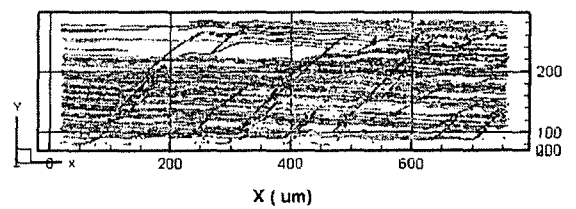


Fig 4. DM 에서의 xy, yz 평면 입자 streamline

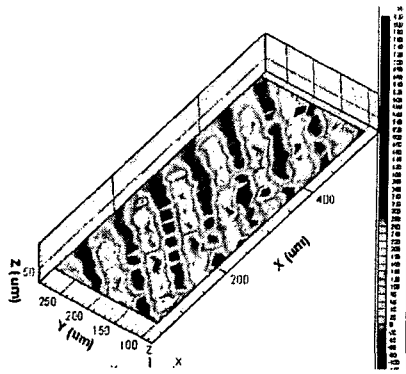


Fig 5. DM 에서의 xy 평면 y 축 속도성분

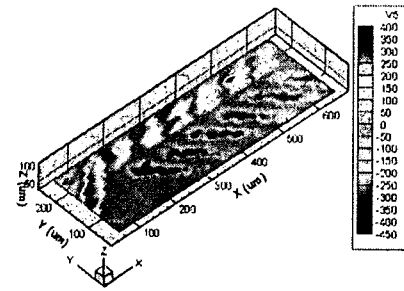


Fig 7. SHM 에서의 xy 평면 y 축 속도성분

SHM 인 경우에 Fig6 과 7 에서 보는 바와 같이 헤링본 패턴을 통한 양방향으로의 카오스 이류가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 SHM 의 4 번째 싸이클 부분에서 카오스 이류가 발달하는 것을 볼 수 있다.

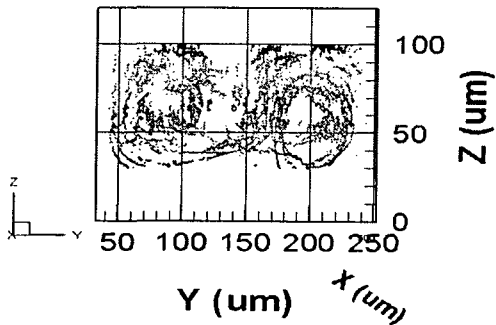
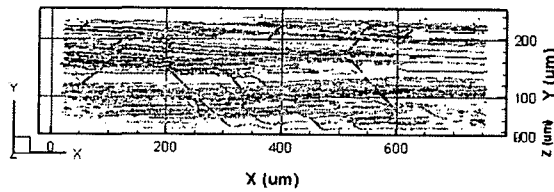


Fig 6. SHM 에서의 xy, yz 평면 입자 streamline

4. 결론

본 연구에서는 마이크로 믹서 내부의 3 차원 유동장을 측정해 봄으로써 미세유체소자에서의 3 차원적 데이터를 획득하였다. 그리고 마이크로 믹서내의 혼합특성을 분석함으로써 더 최적화된 형상을 설계하는데 중요한 자료를 획득하였다. 이를 통해 μ -TAS 의 개발과 개선을 위한 기초자료를 제공한다.

참고 문헌

- 1) Sang Youl Yoon, Kyung Chun Kim "Comprehensive Methods of Concentration and 3D Flow Field Measurement for Single/Two Phase Micro Total Analysis System", Micro Total Analysis Systems
- 2) A.D. Stroock, M.Weck, D.T.Chiu "Chaotic Mixer for Microchannels", Science 295, 647-651 (2002)
- 3) A.D. Stroock, S. K. Dertinger, G.M. Whitesides, A. Ajdari "Patterning Flows Using Grooved Surfaces", Anal. Chem. 2002, 74, 5306-531