

# 수치해석을 이용한 패시브 마이크로 믹서의 성능평가

이정익<sup>1</sup>, 김철규<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>인하공업전문대학 기계설계과 교수, <sup>2</sup>한국건설기술연구원 국토보전연구본부 연구원

## Performance Assessment of Passive Micromixer using Numerical Analysis

Jeong-Ick Lee<sup>1</sup>, Chul-Kyu Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Professor, Department of Mechanical Design, Inha Technical College

<sup>2</sup>Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요 약 마이크로 믹서는 랩-온-어-칩이나 마이크로 유체 기기의 하나의 구성품으로 두 가지의 화학 물질을 혼합(융합)하는 장치이다. 본 연구는 다양한 형상의 패시브 마이크로 믹서의 성능을 평가하는 것을 목적으로 한다. 다양한 형상의 마이크로 믹서는 총 6가지의 형상을 비교하였고, 서로 동일한 수력 직경을 갖도록 3차원 모델링하였다. 내부 혼합 유동을 전산모사하기 위하여 상용 유동해석 프로그램인 ANSYS Fluent를 사용하였다. 수치해석 방법은 본 논문에 자세하게 기술하였다. 마이크로 믹서의 성능 평가는 혼합 지수와 압력 강하로 비교하였고, 결론적으로 CDM-8T은 합리적인 혼합성능과 상대적으로 낮은 압력 강하를 갖는 것으로 나타났다.

주제어 : 마이크로 믹서, 랩-온-어-칩, 전산유체, 성능 평가, 혼합 지수, 압력 강하

**Abstract** A micromixer is a component of a lab-on-a-chip or microfluidic device that mixes two or more chemicals together(convergence). The purpose of this study is to assess the performance of passive micromixer of various shapes. Six shapes of micromixers were compared and three dimensional modeling was carried out to have the same hydraulic diameter. The commercial code, ANSYS Fluent, was used to simulate the internal mixing flow. A numerical analysis method is described in detail in this paper. The performance of the micromixer was compared with the mixing index and pressure drop. Consequently, the CDM-8T shape showed reasonable mixing performance and relatively low pressure drop.

**Key Words** : Micromixer, Lab-on-a-Chip, Computational fluid dynamics, Performance assessment, Mixing index, Pressure drop.

### 1. 서론

마이크로 믹서는 두 가지 또는 그 이상의 유체를 혼합하는 장치로 랩-온-어-칩(Lab-on-a-Chip)이나 마이크로 유체 기기(microfluidic device)의 한 구성품이다. 마이크로 믹서는 Fig. 1과 같이 크게 패시브 마이크로믹서와 액티브 마이크로 믹서로 구분되며, 액티브 마이크로 믹서는 외부의 힘으로 혼합하는 반면 패시브 마이크로 믹

서는 믹서의 형상에 의해 발생하는 내부유동으로만 혼합하는 방식이다[1]. 이러한 패시브 마이크로 믹서는 저렴하게 대량 생산이 가능한 장점 때문에 많은 연구와 산업 분야에서 연구되고 있다.

다양한 모델의 패시브 마이크로 믹서 [1-8]는 각기 실험결과를 도출하기 위하여 서로 다른 기준으로 제작이나 연구되어 왔다. 따라서 서로 다른 기준 하에서 각 마이크로 믹서는 제대로 그 성능을 평가할 수 없었다. 또한 적

\*Corresponding Author : Jeong-Ick Lee (jilee@inhatc.ac.kr)

Received July 31, 2018

Accepted October 20, 2018

Revised August 20, 2018

Published October 28, 2018

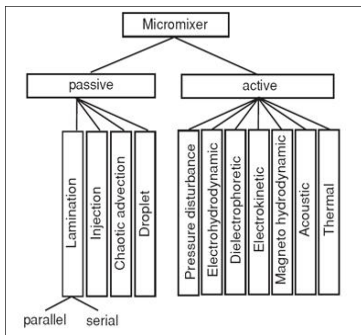


Fig. 1. Classification of micromixer types [1]

절한 마이크로 믹서를 적용하기 위한 비교 데이터가 전무한 실정이다.

본 연구는 실험적 연구 결과를 기반으로 총 6개의 마이크로 믹서 형상을 동일한 수력 직경으로 모델링하고, 수치해석 방법을 이용하여 마이크로 믹서의 성능을 혼합 지수를 이용하여 평가하는 융합연구를 수행하였다. 또한 마이크로 믹서 입출구에 발생하는 압력 강하를 서로 비교함으로써 합리적인 혼합 성능과 상대적으로 낮은 압력 강하를 갖는 모델을 도출하였다.

## 2. 수치해석 방법

### 2.1 형상 모델링

본 연구에서 수동형 마이크로 믹서 중 혼돈 이류(chaotic advection flow)에 의해 혼합을 하는 3D-Serpentine(모델 1) [3], SGM(모델 2) [1], SHM(모델 3) [2], SOR-1(모델 4) [5], SOR-2(모델 5) [5]와 CDM 모델 중 가장 혼합성능이 우수한 CDM-8T(모델 6) [4] 등(Fig. 2 참조)을 연구대상으로 선정하였다. 각 모델은 UNIX 기반의 모델링 프로그램인 GAMBIT을 이용하였으며, 각 형상들은 110 $\mu$ m의 수력직경과 1mm의 길이로 동일하게 모델링하였다. 이러한 동일한 수력직경으로 비교할 때, 보다 적절한 성능 비교를 수행할 수 있다. 각 모델들은 정렬 격자를 사용하였고, 각 형상에 따라 150만 개에서 180만 개의 격자로 구성하였다. 모델의 형상 데이터는 Table 1과 같이 정리하였다.

### 2.2 수치해석 방법

본 연구에서 혼합 성능의 적절한 비교를 위하여  $Re =$

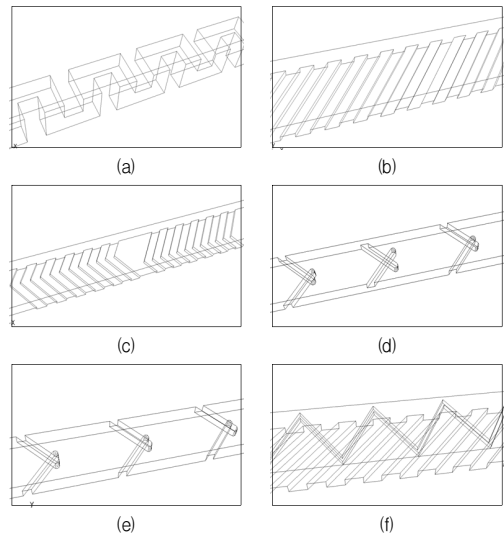


Fig. 2 micromixer models for performance assessment: (a) 3D-Serpentine(model 1), (b) SGM (model 2), (c) SHM (model 3), (d) SOR-1(model 4), (e) SOR-2 (model 5), (f) CDM-8T (model 6)

Table 1. Geometry parameters of micromixers

Parameter	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6
Hydraulic Diameter, $\mu$ m	110	110	110	110	110	110
Channel width, $\mu$ m	110	200	200	200	200	200
Channel Height, $\mu$ m	110	77	77	77	77	77
Groove depth, $\mu$ m	-	15	15	-	-	30
Groove angle, deg	-	45	45	-	-	45
Ridge height, $\mu$ m	-	-	-	38.5	38.5	-
Ridge width, $\mu$ m	-	-	-	40	60	-
Ridge angle, $\mu$ m	-	-	-	45	45	-
Ridge distance, $\mu$ m	-	-	-	380	380	-
Barrier width, $\mu$ m	-	-	-	-	-	10
Barrier height, $\mu$ m	-	-	-	-	-	20

1인 층류유동(laminar flow)으로 가정하였고, 두 유체의  $Pe = 9 \times 10^5$ 으로 가정하여 난류(turbulence flow)의 영향이 전무하고 점성(viscosity)이 높아 두 유체 사이의 물질 확산(mass diffusivity) 또한 거의 이루어지지 않는 상태로 하였다. 일반적으로 이러한 조건 상태는 거의 없지만

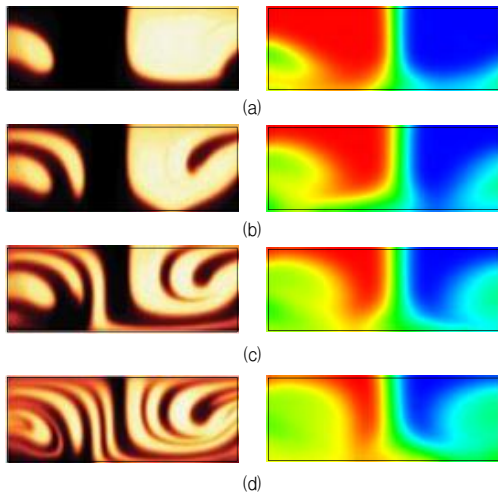


Fig. 3. Comparison of the experimental and numerical results at the cross sections [1]; (a) 0.2mm, (b) 0.4mm, (c) 0.6mm, (d) 0.8mm

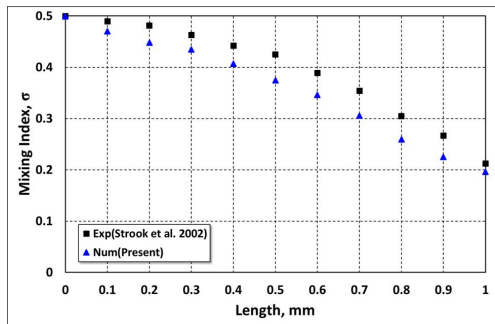


Fig. 4 Validation result of numerical model

혼합 성능을 명백하게 비교하기 위하여 두 유체의 무차원 수 조건을 물리량 변수들을 통하여 제어하였다.

두 유체의 혼합 성능을 확인하기 위하여 농도 방정식 (concentration equation)을 이용하였으며, 농도는 수동 스칼라 방법(passive scalar method)을 이용하였다. 수동 스칼라 방법은 두 유체의 농도를 0과 1로 주어 완전한 혼합 시 0.5에 가까울수록 혼합이 잘 된 것으로 보는 방법이다. 이때, 혼합 성능은 길이 방향을 따라 한 단면의 농도 분포의 표준 편차(standard deviation) [7]를 이용하여 혼합의 정도를 결정하였다. 이때, 농도 분포의 표준 편차가 0에 가까울수록 두 유체의 혼합이 잘 이루어졌다고 할 수 있다.

수치해석을 위한 경계조건(boundary condition)으로 마이크로 믹서의 입구(inlet)은 유속 조건(velocity

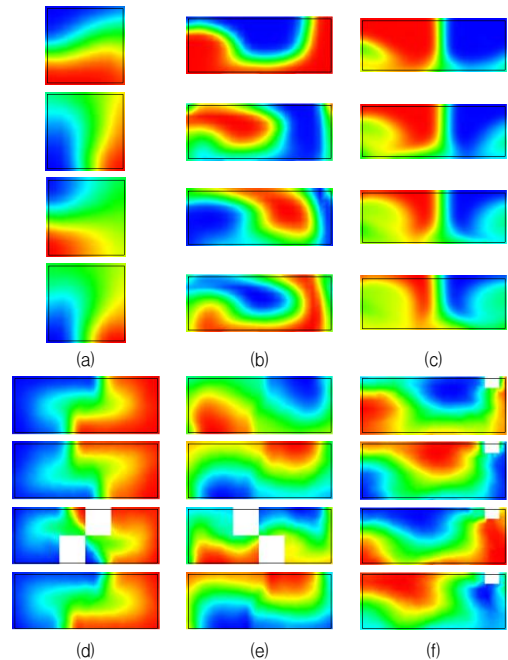


Fig. 5. Comparison of the concentration distribution at the cross sections of 0.2mm interval with each model; (a) model 1, (b) model 2, (c) model 3, (d) model 4, (e) model 5, (f) model 6,

condition)을 주었으며, 각 유체는 동일한 유속으로 하였다. 또한 출구는 대기압 조건(atmosphere condition)으로 하였고, 벽 조건(wall condition)은 매끄러운 벽면(smooth wall)으로 No-Slip 조건으로 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 수치해석 방법의 검증

본 연구에서 수치해석 방법을 검증하기 위하여 대표적인 혼돈 이류 혼합에 관한 Strook 등[1]의 SHM의 실험결과를 이용하여 비교 검증하였다. Fig. 3은 실험 및 수치해석의 혼합 유동에 의한 농도장 결과의 패턴의 비교하였고, 비교적 유사한 패턴을 보였다. 또한 각 길이 방향에서의 혼합 지수에 대한 실험 및 수치해석 결과를 Fig. 4와 같이 비교하였고, 평균 약 9% 이내의 오차를 보였다. 대체적으로 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

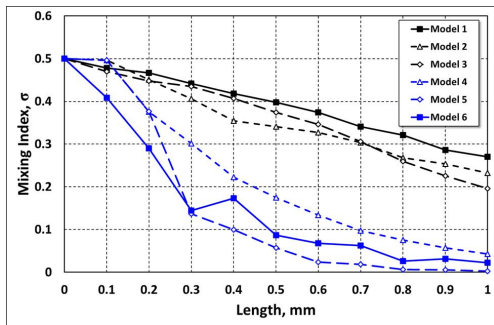


Fig. 6. Comparison of the mixing index of each model along the length of micromixer

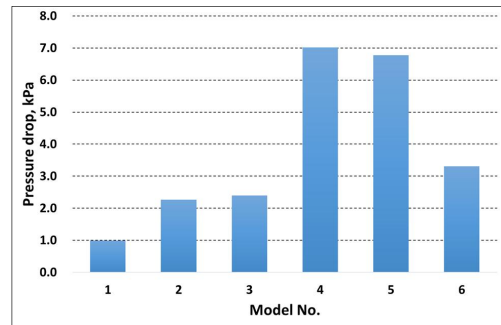


Fig. 8. Pressure drop results of each model between inlet and outlet

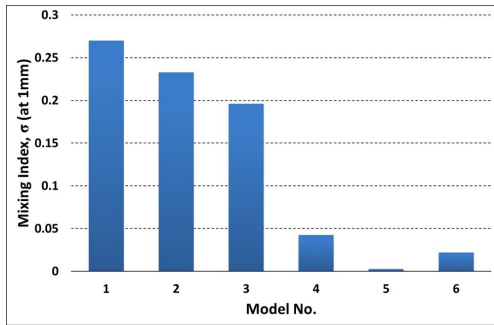


Fig. 7. Mixing index results of each model at the outlet of micromixer

### 3.2 각 단면에서의 농도장 비교

Fig. 5는 각 모델의 길이 방향으로 따른 단면을 보여준다. 모델의 형상 특성에 따라 발생하는 혼합 유동장의 패턴에 의해 혼합 성능이 결정된다. 모델 1의 경우, 90도의 구부러진 채널을 통과하면서 두 유체가 혼합이 되는 형상이지만 2차 유동이 다른 모델에 비해 강하게 발생하지 않기 때문에 두 유체의 확산이 혼합 성능에 지배적이다.

모델 2의 경우, 마이크로 믹서 바닥면에 45도의 홈(groove)에 의해 회전하는 혼돈 이류를 발생시키며 이러한 유동에 의해 두 유체를 혼합시킨다. 모델 3은 바닥면에 서로 45도인 홈이 폭 1/3 지점에서 만나며, 6개의 홈이 1 사이클 당 12개씩 번갈아가며 배치되어 있어 유체의 혼합 유동은 양쪽 벽면에서 혼돈 이류가 발생한다. 이러한 혼돈 이류는 홈의 배치에 의해 번갈아가며 두 유체를 혼합시킨다.

모델 4는 위 아래로 번갈아가며 45도의 팔이 나와 있어 이 팔(ridge)의 영향으로 유동이 좌우로 흔들리면서

유체의 혼합이 발생한다. 모델 5는 모델 4와 형상은 같지만 팔의 폭이 모델 4에 비해 넓은 형상을 가졌다. 마지막으로 모델 6의 경우는 모델 2의 홈의 형상과 상단 벽면에 지그재그 형태의 배리어(barrier)가 형성되어 있어 회전류의 발생과 배리어에 의한 역회전류에 의해 혼합이 발생한다.

### 3.3 혼합 지수와 압력 강하의 비교

Fig. 6은 길이 방향으로 각 단면의 혼합 지수의 변화를 비교하였다. 크게 두 그룹으로 나타난다. 첫 번째 그룹은 모델 1, 2, 3이고, 상대적으로 혼합이 느리다. 마이크로 믹서 0.5mm를 지난 동안 혼합 지수는 0.2 이상을 보였다. 반면, 두 번째 그룹은 모델 4, 5, 6이며, 0.5mm 지점을 지나면 모두 0.2 이하의 혼합 지수를 나타내었다.

Fig. 7은 1mm 지점에서의 혼합 지수를 비교하였다. 모델 1은 0.27의 혼합 지수를 보여 6개의 모델 중 가장 혼합 성능이 낮았다. 모델 2와 모델 3의 혼합지수는 각각 0.232과 0.196을 보였다. 그러나 모델 4, 5, 6은 각각 0.042, 0.002, 그리고 0.021를 보여 상당히 혼합 성능이 높은 것으로 나타났다. 이 중 모델 5는 가장 낮은 혼합 지수를 보여 6개의 모델 가장 혼합 성능이 우수한 것으로 나타났다.

Fig. 8은 마이크로 믹서의 입·출구 사이의 압력 강하를 비교 결과를 보여준다. 혼합 지수가 상대적으로 높은 모델 1, 2, 3은 낮은 압력 강하를 보였다. 그 중에서 채널 내에 아무런 방해물이 없는 모델 1이 가장 낮은 0.99kPa의 압력 강하를 보였다. 낮은 압력 강하는 유체를 공급하는데 요소되는 에너지를 줄일 수 있기 때문에 경제성이 높아진다. 모델 4와 모델 5는 혼합 성능이 우수하지만 압력 강하는 상대적으로 높은 각각 7.0kPa과 6.78kPa를

보였다. 그러나 모델 6의 경우 높은 혼합 성능에도 불구하고 모델 4와 5에 비해 상당히 낮은 3.31kPa의 압력 강하를 보였다.

#### 4. 결론

본 연구는 6개의 상이한 형상을 가진 마이크로 믹서의 혼합 성능을 수치해석을 이용하여 비교하였으며, 융합연구의 필요성을 인식하며 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Mixing index와 Pressure drop value를 사용하여 Passive micro mixer의 성능에 대한 비교하였다.
- 2) 각 micromixer 형태에 따른 단면에서의 농도장을 비교하였다.
- 3) 본 연구에서 선택한 모델들 중에서는 SOR-2와 CDT-8T가 가장 믹싱효율이 좋은 것으로 나타났다.
- 4) 또한, SOR-1과 SOR-2가 큰 압력차를 보였으며, 상대적으로 CDM-8T는 낮은 압력차를 보여 Mixing INDEX 및 Pressure drop을 고려했을 때 CDM-8T의 성능이 더 우수함이 나타났다.
- 5) 앞으로 다양한 범위의  $Pe$ 와  $Re$ 에서의 mixing 효율에 대한 연구 필요하다. 1) Strook 등[2]의 시험 결과를 근거로 수치해석 모델을 검증하였으며, 혼합 지수의 실험 및 수치해석 결과를 비교하였을 때, 잘 일치함을 보였다.

#### REFERENCES

- [1] N. T. Nguyen & Z. Wu. (2005). Micromixers—a review. *Journal of Micromech. Microeng.*, 15, . R1–R16.
- [2] A. D. Strook, S. K. W. Dertinger, A. Armand, M. Igor, H. A. Stone & G. M. Whitesides. (2002). Chaotic mixer for microchannels. *Science*, 295, 647–651.
- [3] R. H. Lui, M. A. Stremmler, K. V. Sharp, M. G. Olesen, J. G. Santiago, R. J. Adrian, H. Aref, & D. J. Beebe. (2000). Passive mixing in a three-dimensional serpentine microchannel. *Journal of Microelectromech. System*, 9, 190–197.
- [4] J. T. Yang, K. J. Huang, I. C. Hu, & P. C. Lyu. (2007). A chaotic micromixer modulated by constructive vortex agitation. *Journal of Micromech. Microeng.*, 17, 2084–2092.
- [5] X. Fu, X. D. Ruan, & H. Y. Yang. (2005). Research on staggered oriented ridge static micromixers. *Sensor and Actuators B*, 114, 618–624.
- [6] J. Aubin, D. F. Fletcher, & C. Xuereb. (2005). Design of micromixers using CFD modeling. *Chemical Eng. Sci.*, 60, 2503–2513.
- [7] C. K. Kim & J. Y. Yoon. (2016). Optimal Design of Groove Shape on Passive Micro-mixer using Design of Experiment Technique. *Proc. IMechE Part E: J. Process Mechanical Engineering*, 231(4), 880–887.
- [8] Y. Su, A. Lautenschleger, G. Chen, & E. Y. Keing. (2014). A Numerical Study on Liquid Mixing in Multichannel Micromixers. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53, 390–401.
- [9] J. H. Lee & J. U. Cho. (2015). Study on Convergence Technique through Flow Analysis at the Flexible Joint of the Pipe Laying. *Journal of Korea Convergence Society*, 6(3), 13–18.
- [10] J. U. Cho. (2014). A Flow Analysis on Wiping Shape of Cooling Fan at Automobile. *Journal of Korea Convergence Society*, 5(4), 75–79.
- [11] S. H. Kim. (2016). Convergence of Fluid Dynamics and Computer Simulation for the Internal Investigation of Fuel Cell. *Journal of the Society of Digital Policy and Management*, 14(6), 245–251.
- [12] K. H. Koh & S. H. Lim. (2012). A Study on the Effect of Atomization of Pressure Nozzle with Blower-Air, *Journal of the Society of Digital Policy and Management*, 10(6), 283–288.
- [13] H. W. Yim. (2017). A Study on the Pressure Vessel containing tension material used the Prestressed Concept. *Journal of Convergence Society for SMB*, 7(5), 103–109.
- [14] J. H. Hyeon, Y. H. Moon & S. W. Ha. (2018). Development of Automation Software for Corner Radius Analysis of Composite Laminated Structure. *Journal of Convergence Society for SMB*, 8(3), 107–114.
- [15] J. L. Cui, M. H. C hey & S. I. Kim. (2016). Seismic Performance of Urban Structures with Various Horizontal Irregularities using Equivalent Static Analysis. *Journal of Convergence Society for SMB*, 6(1), 25–32.

이 정 익(Jeong-Ick Lee)

[정회원]



- 1991년 2월: 한양대학교 공과대학. 기계공학과 (공학사)
- 1993년 2월: 한양대학교 공과대학. 정밀기계공학과 (공학석사)
- 1999년 8월: 한양대학교 공과대학. 정밀기계공학과 (공학박사)
- 1993년 1월 ~ 1999년 12월: (주)대우전자. 중앙연구소 (선임연구원)
- 2000년 3월 ~ 2007년 2월: 용인송담대. 자동차기계설계전공 (교수)
- 2007년 3월 ~ 현재: 인하공전. 기계공학부. 기계설계과 (교수)
- 관심분야 : CAD/CAM/CAE, 공장자동화, 생산자동화, 사출금형, 유비쿼터스, MEMS, BIOMECHANICS
- E-Mail : jilee@inhac.ac.kr

김 철 규(Kim, Chul-Kyu)

[정회원]



- 2002년 2월 : 한양대학교 기계공학과(공학사)
- 2008년 2월 : 한양대학교 항공공학과(공학석사)
- 2016년 2월 : 한양대학교 기계공학과(공학박사)
- 2015년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 박사후연구원
- 관심분야 : 유체기계, 유동 제어, 최적설계, MEMS, 폐열에너지, 전산유체역학
- E-Mail : chulkyukim@kict.re.kr