

회전에 의한 미세유동장치에서의 채널 디자인에 따른 미세유체흐름 분석

박지흠¹, 이정찬², 김희찬^{2,3}

¹서울대학교 공과대학 바이오엔지니어링 협동과정

²서울대학교 의학연구원 의용생체공학연구소

³서울대학교 의과대학 의공학교실

Flow characterization of radially rotating microchannels with different channel designs

J.H. Park¹, J.C. Lee², H.C. Kim^{2,3}

¹Interdisciplinary Program, Bioengineering Major, Seoul National University, Seoul, Korea

²Institute of Medical and Biological Engineering, Medical Research Center, Seoul National University, Seoul, Korea

³Department of Biomedical Engineering, Seoul National University, College of Medicine, Seoul, Korea
jp592@melab.snu.ac.kr

Abstract

Extensive research has demonstrated versatility of centrifugally driven microfluidics controlled by various combinations of rotational speed in realizing critical functionalities including pumping, mixing, valving, and metering. One of the major advantages of centrifugal microfluidics with rotating platform is the replacement of external pumping device with centrifugal forces to generate effective pressure-driven-like flow through the microchannel, and therefore fluid mechanics including heat transfer as well as flow characteristics in radially positioned microchannel has been extensively explored. However, those for other possible designs that could be implemented in the rotating microchannels were less likely discovered. Here, we have investigated fluid dynamics in three different microchannel designs, which may provide qualitative and quantitative basis for the design principles in centrifugal microfluidics to manipulate the flow with high controllability.

연구 배경

여러 분야에서 미세유체기술을 이용한 미세장치 개발은 지금까지도 활발히 이루어지고 있다. 특히, 미세유체기술을 이용한 다양한 바이오에세이의 혁신적인 개발은 현존하는 기술의 한계를 뛰어넘어 효율과 성능을 높여 줄 수 있는 새로운 분석 및 진단 기술로서의 발전 가능성을 보이고 있다. 그러나 이러한 미세장치개발은 상용화 단계에서 실패를 거듭하면서 기술개발에 투자하는 노력에 비해 실질적으로 쓰일 수 있는 플랫폼의 생산은 매우 미미하다. 가장

주요한 원인 중 하나는 작은 플랫폼을 구동시키기 위해 필요한 사용법이 사용자 친화적이지 않고 실제로 이를 다루기 위한 전문 기술자를 필요로 하고 있기 때문이다. 이러한 점에서 랩온어씨디(Lab-on-a-CD)와 같은 회전에 의한 미세유동장치는 외부 구동 장치(e.g. syringe pump) 없이 하나의 플랫폼 위에 여러 기능을 구현할 수 있다는 점에서 큰 각광을 받고 있다. 무엇보다도 가장 큰 장점은 회전하는 디스크 위에 채널을 반경방향으로 놓았을 때 유체 특성과 관계없이 원심력에 의해 효율적으로 펌핑

을 발생시킬 수 있다는 것이다. 회전속도를 높였을 때에는 적절한 채널의 기하학적 구조 선택 아래 이차적흐름(secondary flow)에 해당하는 corioli effect를 유도하여 효과적인 믹싱 또한 발생시킬 수 있다. 이와 같이 회전 속도와 채널의 기하학적 구조에 따른 능동적 현상을 정밀하게 구현하기 위해서는 제약요소와 유체 흐름간의 관계에 대한 철저한 이해가 중요하다. 그러나 지금까지 펌핑, 밸빙, 믹싱, 미터링 등의 다양한 기능 구현을 위해 여러가지 디자인이 고려되어 왔음에도 불구하고, 반경방향으로 놓인 채널 이외에 다른 디자인에 대한 이해는 충분히 이루어지지 못했다. 따라서 본 연구에서는 회전에 의한 힘에 영향을 받는 미세유체 흐름이 채널 디자인에 따라 어떤 변화를 보이는지 분석하고자 한다.

연구 방법

회전에 의한 미세유동장치에서 실제 설립 될 수 있는 기본적인 디자인 세가지를 대상으로 분석을 시행하였다 (그림 1). 전산 모의 시험에 앞서, 비교분석을 위하여 미세채널안에서 유체의 흐름에 해당하는 운동방정식 Navier-Stokes equations을 세우고, eigenvalue concept과 MATLAB을 통해 다음과 같은 지배방정식(governing equation)을 도출하였다.

$$v(x, z) = \frac{16}{\pi^2 \mu} \left(-\frac{dp}{dy} + \rho \omega^2 \sqrt{y^2 + d^2} \right) \times \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2m-1)(2n-1)\lambda_{m,n}} \sin \frac{\sigma_m x}{a} \sin \frac{\sigma_n z}{b}$$

$$\sigma_m = (2m-1)\pi, \quad \sigma_n = (2n-1)\pi$$

다음으로, 유체해석도구인 COMSOL Multiphysics를 이용하여 회전 속도에 따른 미세유체흐름 변화를 살펴보았다. 세가지 미세유체채널 디자인의 단면적은 corioli force에 의한 이차적 흐름이 효율적으로 발생될 수 있는 종횡비 (1:1)로 모두 고정하고, 그 길이는 유체의 완전발달흐름 (fully developed flow)이 형성될 수 있는 최소 길이, 2cm로 동일하게 설정하였다. 설정한 디자인을 대상으로 회전속

도에 따른 유체 패턴과 속도를 분석하였다.

연구 결과

회전속도에 따른 체적유량을 분석 해 본 결과 모든 디자인에서 회전속도가 증가할수록 체적유량이 다량의 관계로 증가하였고, 그 범위가 syringe pump에서 발생 가능한 속도범위에 속하는 유의미한 값을 확인하였다. 채널 디자인 마다 동일한 회전속도 범위 안에서 corioli effect의 영향이 달랐으며, 체적유량 증감 범위 또한 뚜렷한 차이를 보였다. 이 결과는 추후 회전에 의한 유체채널 디자인의 중요한 발판을 마련해 줄 것으로 기대한다.

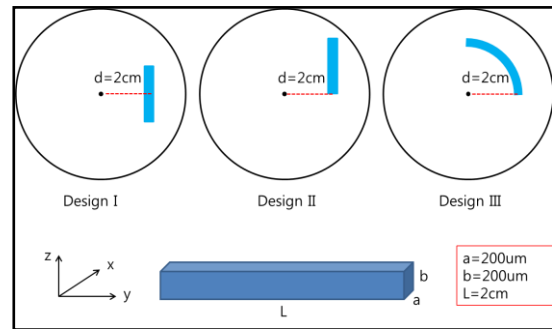


그림 1. 분석 대상 미세유체채널 디자인

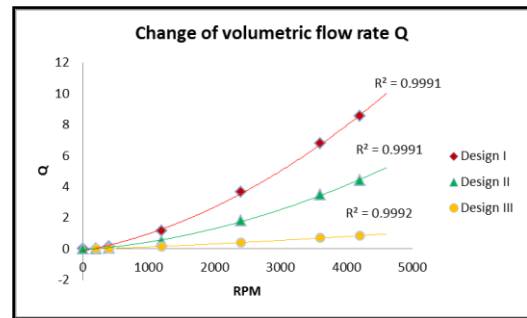


그림 2. 회전속도에 따른 체적유량변화

Acknowledgements

이 논문은 2012년도와 2013년도 정부(교육과학기술부 그리고 미래창조과학부)의 재원으로 수행된 연구임(No. 2005-2001287 and No. 2012R1A1A2008243)

참고 문헌

[1] P. Roy, N.K. Anand, D. Banerjee, "Numerical simulation of flow and heat transfer in radially rotating microchannels" *Microfluid Naofluid.*, pp.397-413, 2013.