

원심력기반 3차원 관성밸브 모델링을 통한 정밀 미세유체제어

강동희* · 김나경* · 강현욱†

3D-inertia Valve Component for Centrifugal Force-based Micro Fluid Control

Dong Hee Kang*, Na Kyong Kim* and Hyun Wook Kang†

Abstract A three-dimensional slope valve component is used for controlling micro volume of liquid on a centrifugal force-based microfluidic disk platform, also called a lab-on-a-disk. The modeling factor of the slope valve component is determined to centrifugal force for liquid passing the crest of a slope valve via variation of slope length and angle as well as the radius to start point of slope valve. The centrifugal force is calculated by the equilibrium equation of the capillary and gravitational forces according to the microchannel surface roughness and the liquid volume, respectively. As a result, the slope valve is analyzed by the minimum angular velocity for liquid passing at crest point and the ratio between the length of micro liquid and slope length to obtain the factors for optimal slope angle modeling.

Key Words : Microfluidics (미세유체역학), Lab-on-a-disk (랩온어디스크), Centrifugal force (원심력) slope valve (경사밸브)

1. 서론

랩온어디스크 (lab-on-a-disk)는pico-에서micro-liter 부피의 유체를 정밀하게 제어하여 정량적으로 극미량의 생화학적 물질 진단을 수행할 수 있는 플랫폼이다. ELISA (enzyme-linked immunosorbent assay) 기술을 기반으로 하는 랩온어디스크 기술은, 미세유체내의 물질을 검출하기 위해서 항원-항체 결합, 세척, 표지 물질 부착, 현상 등, 각각의 공정 단계에서 사용되는 유체들의 반응을 수행하기 위한 독립적인 공간이 필수적이다.⁽¹⁻³⁾

기존의 랩온어디스크 플랫폼 기반 ELISA검출 기술에 있어서, 디스크의 회전력을 기반으로 미세유체의 이동과 혼합이 수행되기 때문에, 디스크 상에서 모든 유체는 회전 관성에 영향을 받게 되고 디스크 반경방향으로 이동하게 된다. 따라서, 순차적으로 공정 단계를 제어하기 위해서는 정밀한 밸브 시스템이 필수적이다.

밸브 시스템은 작동 방식에 따라서 passive 또는 active로 구분된다. 사이펀 효과를 일으키기위한 serpentine 구조의 미세유체 채널의 적용, 디스크상 유체 저장조 압력 변화를 통한 유체 이동, 미세유체 채널 내부의 표면에너지 변화를 통한 모세관력 제어 등의 passive 방식이 있다.⁽⁴⁻⁷⁾ 그리고 PDMS 재질을 사용한 미세유체 채널에서 다이어프램 구조를 이용하여 외력을 인가하거나, 미세 유체 채널

† Department of Mechanical Engineering,
Chonnam National University, Professor
E-mail: kanghw@chonnam.ac.kr

* Department of Mechanical Engineering,
Chonnam National University, Ph. D Candidate

과 함께 있는 wax의 저온 용융 특성을 이용하여 레이저 조사를 통한 선택적 채널 개폐 등의 active한 방식으로 유체의 이동을 조절한다.⁽⁸⁻⁹⁾ 이러한 밸브 시스템을 2차원 구조의 랩온어디스크 플랫폼에서 구성하기 위해 한정적인 공간 내에 설계의 어려움이 있으며, 제작 비용의 증가로 이어진다.

본 연구에서는 기존에 수행된 3차원 경사 구조를 갖는 밸브 시스템⁽¹⁰⁾에 대해 최적화 설계를 수행하고자 한다. 랩온어디스크 플랫폼에서 밸브 구조물이 디스크의 평면방향으로 확장되지 않고, 디스크의 축 방향으로 구조물이 형성되어 있으며, 경사 구조의 길이 및 각도와 같은 형상 변수와 주입된 유체의 물성 및 체적을 통해서만 유체의 거동을 정밀하게 제어할 수 있다. 이는 경사구조물물 통과하는 유체는 오직 회전관성력과, 디스크의 축 방향으로 상승한 유체의 체적력으로 제어되는 passive 방식의 밸브 시스템이다. 따라서, 경사 밸브를 포함한 미세유체 채널 모듈을 구성하였으며, 디스크의 회전속도를 기반으로 경사 구조의 형상 조건과 유체의 체적 조건에 따른 밸브 작동 특성을 분석하였다.

2. 실험방법

SLA 방식의 3D 프린터를 통해 제작된 미세유체 채널 부품은 각 주입 챔버 (inlet chamber), 경사밸브 (slope valve), 연결채널 (connection channel), 그리고 끝단챔버 (end chamber)로 구성되어 있다. 미세유체 채널 부품들은 단일 모듈로 결합시켜, Fig. 1a와 같이 디스크와 결합하여 고정시킨다. 각 모듈은 Fig. 1b, c와 같이 경사밸브의 구조에 따라서 주입챔버에 있는 유체가 디스크의 회전 속도에 따라서 끝단챔버로 넘어가기 위해 필요한 회전력 차이가 발생한다.

경사밸브의 구조에 대한 주요 변수는 Fig. 1b에 나타나 있다. 디스크의 축으로부터 경사밸브를 이루고 있는 미세유체 채널의 중심선과 디스크 평면이 만나는 점까지의 반경 R_s (radius to start point of slope valve), 디스크 축으로부터 경사밸브 구조의 가장 높은 부분인 극점까지의 반경 R_c (radius to crest point)이며, 미세유체 채널의 경사 구간길이 L_s (length of slope) 그리고 L_s 와 디스크 평면이 이루는

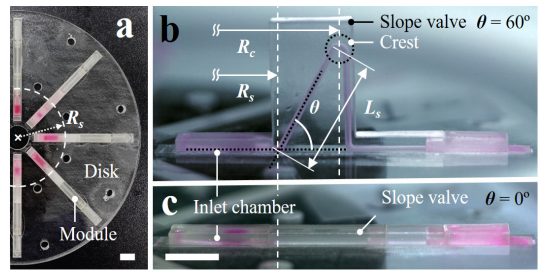


Fig. 1. (a) Graphical images of microfluidic modules on disk and (b, c) Microfluidic modules including slope valve with angles to $\theta=60^\circ$ and 0° (scale bar = 10 mm)

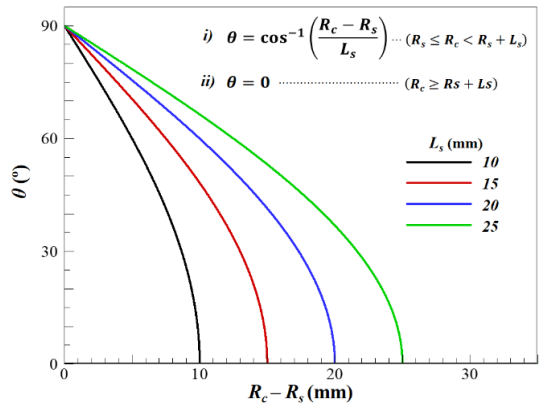


Fig. 2. Modeling of slope angle (θ) by length of slope ($L_s = 10, 15, 20$ and 25 mm)

각도 θ 로 이루어졌다.

Fig 2에서는 L_s 에 의해 $R_c - R_s$ 에 따른 θ 의 변화를 보여준다. R_c 가 증가함에 따라 θ 는 90° 에서 \cos 함수를 따라 변화 하며, $R_c \geq R_s + L_s$ 구간에서 θ 는 0° 이 된다.

원심력을 기반으로 하여 경사밸브의 미세유체 채널을 따라 액적이 이동한다. 경사밸브 내에서 액적은 디스크의 축방향으로 유체가 상승하게 되며, 디스크 평면에서부터 상승한 유체의 높이와 $\sin\theta$ 에 비례하여 중력 방향으로 체적력이 발생하게 된다. 이때 경사밸브 구조의 극점까지 이동하기 위해서 더 많은 회전력이 필요하며 액적의 한쪽 계면이 R_c 에 위치할 때 극점을 통과 하기 위한 디스크의 최소 회전 각속도 w_c (angular velocity for centrifugal force)가 필요하다. w_c 에 따른 경사밸브의 작동 조건을 먼저 이론적으로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3D 프린터로 제작된 미세유체 채널 부품들은 제작기법의 특성상 광 경화성 재료의 적층 방식으로 채널 내부구조가 형성 되므로 Fig. 3a, b 와 같이 단면에 미세유체 채널 방향으로 선 패턴 구조가 나타난다. 이러한 마이크로 구조는 채널 내부에서 액적이 모세관력이 의한 영향을 받게 되며, 일정한 회전 속도 이하에서 모세관력이 지배적이다. 모세관력은 Fig. 3c, d와 같이 액적이 미세유체 채널 내부의 계면에서 이루는 접촉각과 이루는 각도 θ_m (contact angle of liquid meniscus)와 액적의 표면장력 σ (surface tension)으로 계산되며 미세유체 채널에서 액적의 길이에 따라 경사 밸브의 극점을 지나기 위해 필요한 회전각속도 w 는 equation 1과 같이 나타낼 수 있다.

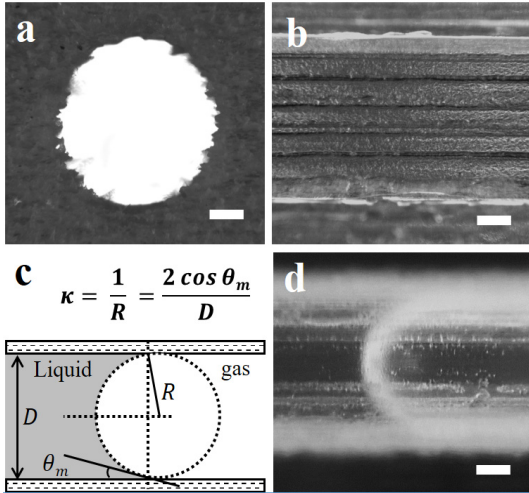


Fig. 3. Microscopic images of the straight microchannel (a) cross-sectional and (b) side view. (c) a schematic and (d) a microscopic image of liquid (DI water) curvature in the microchannel. (scale bar = 100 μm)

$$w = \sqrt{\frac{2(gL_s \sin \theta - \frac{\sigma \kappa}{\rho})}{(R_s^2 - R_1^2) + \cos \theta (R_2^2 - R_s^2)}}$$

여기서 g 는 중력가속도, κ 와 ρ 는 각각 액적의 곡률 반경, 밀도이다. 그리고, R_1 및 R_2 는 액적이 미세유체 채널 내에서 공기와 이루는 계면까지의 거리이며, 디스크의 중심에서 가까운 부분과 멀리 떨어진 부분까지의 거리를 각각 나타낸다.

미세유체 모듈에서 경사밸브의 각도에 상관없이, 채널 구조로 인한 모세관력은 위의 equation 1을 통해 계산하였으며, 끝단챔버까지 액적 ($\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3$)이 이동하기 위해 필요한 각속도 w_{cap} (angular velocity to escape the effect of capillary force) 는 230 rpm (at liquid volume = 20 μL , $R_s=30 \text{ mm}$) 이다.

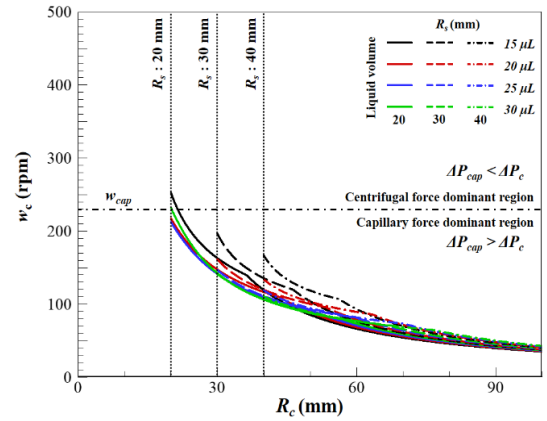


Fig. 4. Liquid switching frequency at $L_s = 10 \text{ mm}$ via R_s and liquid volume variation

Table 1. Coverage slope angle by the liquid volume, L_s and R_s variation

		Coverage slope valve angle, $\Delta\theta$			
L_s (mm)	R_s (mm)	Liquid volume (μL)			
		15	20	25	30
10	40	-	-	-	-
	30	-	-	-	-
	20	7.97	-	-	-
15	40	9.46	-	-	-
	30	18.09	-	-	-
	20	31.24	17.40	10.20	10.20
20	40	19.37	9.65	-	-
	30	23.69	17.74	4.86	-
	20	29.01	29.47	21.06	16.96
25	40	20.38	18.83	9.76	-
	30	22.49	24.20	17.54	8.42
	20	27.25	29.02	28.19	2.98

경사밸브의 주요 변수와 액적의 체적에 따른 밸브의 작동 조건을 분석하기 위해 경사 구조 길이 ($L_s = 10, 15, 20, 25$ mm)의 조절에 따라 R_s (20, 30, 40 mm)와 경사밸브 각도 ($90^\circ \geq \theta \geq 0^\circ$) 액적의 체적 (15, 20, 25, 30 μL)에 따른 w_c 를 비교하였다.

Fig. 4에서는 $L_s = 10$ mm 일 때의 w_c 를 보여준다. 유체가 이동하기 위해 필요한 힘은 최소 230 rpm이 필요하지만, R_s 가 30 mm 이상인 경우, 액적의 체적에 상관없이 극점을 통과 하므로, 밸브로서 역할을 수행하지 못한다. R_s 가 20 mm인 경우에도 액적이 15 μL 일 때, Table. 1과 같이, 경사 각도의 유효 변화 구간인 $\Delta\theta$ 는 7.97° 범위 에서만 조절이 가능하다.

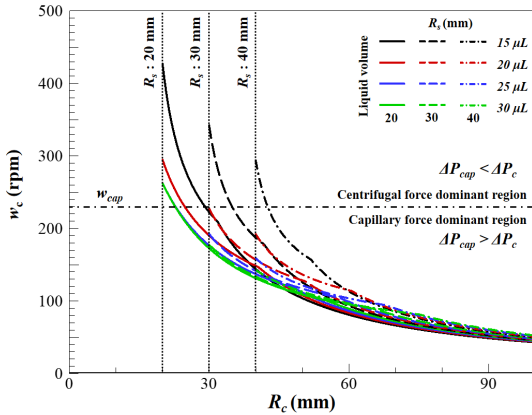


Fig. 5. Liquid switching frequency at $L_s=15$ mm via R_s and liquid volume variation

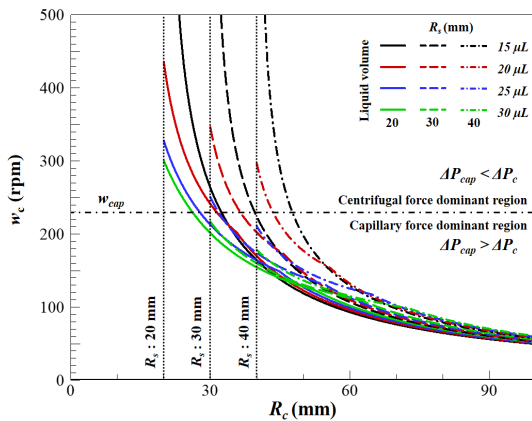


Fig. 6. Liquid switching frequency at $L_s = 20$ mm via R_s and liquid volume variation

Fig. 5에서는 $L_s = 15$ mm 일 때의 w_c 를 보여준다. R_s 가 30, 40 mm 인 경우에 액적이 15 μL 일 때 w_{cap} 이상이다. 그러나 액적이 20 μL 이상일 때 모두 스위치로서 역할을 수행하지 못한다. R_s 가 20 mm인 경우에는 액적의 체적에 상관없이 밸브로 기능을 수행할 수 있으나, 25와 30 μL 체적의 액적에서는 차이가 없었다.

Fig. 6에서는 $L_s = 20$ mm 일 때의 w_c 를 보여준다. 모든 R_s 에서 액적이 15 μL 일 때, $R_c = R_s$ 인 경우 필요한 회전력이 기하급수적으로 증가하며, Fig. 7과 같이 20 krpm 이상 필요하였다. R_s 가 20 mm에서는 액적의 체적에 따라 극점의 통과에 필요한 회전력은 체적에 따른 차이가 높으므로, 체적에 따른 유체 제어를 효과적으로 수행할 수 있는 L_s 조건임을 보여준다.

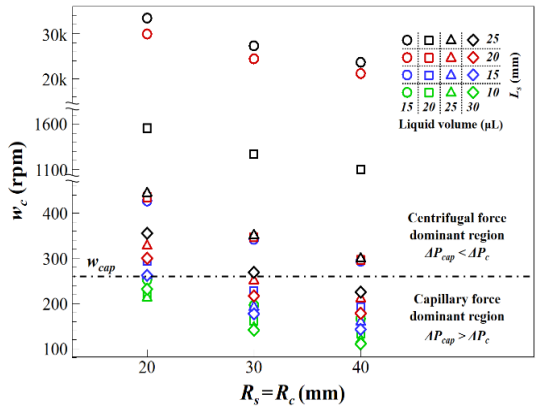


Fig. 7. Liquid switching frequency at $R_c = R_s$

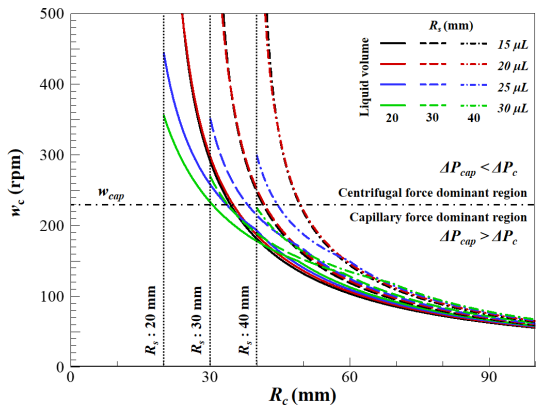


Fig. 8. Liquid switching frequency at $L_s = 25$ mm via R_s and liquid volume variation

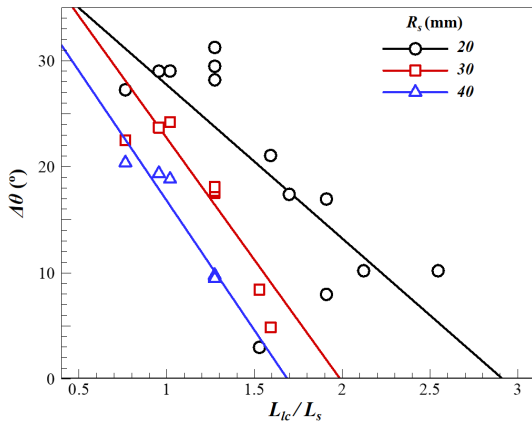


Fig. 9. Coverage of slope angle by the length of slope and liquid column ratio

Fig. 8에서는 $L_s = 25$ mm 일 때의 w_c 를 보여준다. 모든 R_s 에서 R_c 에 상관없이 액적이 15와 20 μL 일 때 500 rpm 이하 구간에서는 R_c 에 따른 w_c 의 차이는 평균 2.04%로 거의 동일하나, Fig. 7과 같이 $R_s = 20$ mm에서 w_c 는 각각 33.4, 1.56 krpm으로 차이가 발생하였다.

결과적으로 w_c 관련하여, R_s 에 따라서 체적에 따른 액적의 길이(L_{lc} , length of liquid column)와 L_s 와의 비율로 비교할 때 Fig. 9와 같이 나타난다. 경사 각도의 제어가 유효한 범위 ($\Delta\theta$) 구간에서는 L_{lc}/L_s 가 1에 가까울수록 가장 높으며, 이는 R_s 가 감소할수록 증가하였다. 또한, L_{lc}/L_s 가 증가함에 따라, $\Delta\theta$ 는 감소하여 경사 각도에 따른 제어가 유효하지 않음을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서 원심력 기반의 랩온어디스크 플랫폼에서 3차원 경사구조를 갖는 밸브 요소의 최적화를 하였다. 밸브의 주요 설계 요소인 경사구조의 길이, 각도 및 위치와 같은 형상 변수와 유체의 체적 변수의 제어를 통해, 미세유체가 밸브 극점을 통과하는 각속도 분석을 수행하였다. 밸브 구조에서 미세유체가 받는 관성력인 원심력과 중력, 그리고 미세유체 채널 내부의 표면특성에 의한 모세관력을 기반으로 하여 회전각속도에 따른 평형식을 제시하였다. 이는, L_s , R_s , 액적의 체적 변수에 대해,

경사 각도의 유효 변화 구간 $\Delta\theta$ 변화를 특징으로 하는 원심력과 관성력의 상관관계를 보여주었다. 특히, 액적의 양 끝단에서의 관성력의 차이는 R_s 가 작을수록 액적의 끝단거리에 반비례하여 증가하기 때문에, 액적의 길이가 줄어들수록 제어 가능한 경사 각도의 범위가 감소하게 된다. 또한, L_{lc} 가 L_s 보다 작은 경우에는, $\theta = 90^\circ$ 에서의 유체가 받는 원심력이 없기 때문에 유체 제어가 불가능하며, 그리고 θ 가 줄어드는 과정에서도 액적의 길이가 짧은 경우 관성력을 더 적게 받으므로 제어 가능한 $\Delta\theta$ 도 상대적으로 줄어들게 된다. 이를 기반으로, 유체의 체적과 경사구조의 길이의 비를 통해 제어가 가능한 밸브의 각도 조건과 같은 핵심설계 요소를 제시하였다. 결과적으로, 기존에 없었던 passive 방식의 3차원 경사구조의 밸브를 제작하였으며, 제안된 평형식 기반의 설계 변수에 따른 액적 제어 특성을 보여주었다. 이는 랩온어디스크 플랫폼을 기반으로 하는 정밀진단 시스템뿐만 아니라, 액적의 물성 및 정량 분석 등 다양한 분야의 미세유체역학 분야에 응용이 가능할 것으로 기대된다.

후 기

이 연구는 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.NRF-2019R1A6A3A13096916)과 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-현장맞춤형 이공계 인재양성지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2019H1D8A1109673).

REFERENCE

- 1) Steigert, J., Brenner, T., Grumann, M., Riegger, L., Lutz, S., Zengerle, R., and Ducrée, J., 2007, "Integrated siphon-based metering and sedimentation of whole blood on a hydrophilic lab-on-a-disk," Biomedical microdevices, Vol. 9(5), pp. 675-679.
- 2) Riegger, L., Grumann, M., Nann, T., Riegler, J., Ehler, O., Bessler, W., Mittenbuehler, K., Urban, G., Pastewka, L., Brenner, T., and Zengerle, R., 2006, "Read-out concepts for multiplexed bead-based

- fluorescence immunoassays on centrifugal microfluidic platforms,” *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 126(2), pp. 455-462.
- 3) Miyazaki, C. M., Kinahan, D. J., Mishra, R., Mangwanya, F., Kilcawley, N., Ferreira, M., and Ducreé, J., 2018, “Label-free, spatially multiplexed SPR detection of immunoassays on a highly integrated centrifugal Lab-on-a-Disc platform,” *Biosensors and Bioelectronics*, Vol. 119, pp. 86-93.
 - 4) Clime, L., Brassard, D., Geissler, M., and Veres, T., 2015, “Active pneumatic control of centrifugal microfluidic flows for lab-on-a-chip applications,” *Lab on a Chip*, Vol. 15(11), pp. 2400-2411.
 - 5) La, M., Park, S. J., Kim, H. W., Park, J. J., Ahn, K. T., Ryew, S. M., and Kim, D. S., 2013, “A centrifugal force-based serpentine micromixer (CSM) on a plastic lab-on-a-disk for biochemical assays,” *Microfluidics and nanofluidics*, Vol. 15(1), pp. 87-98.
 - 6) Gorkin III, R., Nwankire, C. E., Gaughran, J., Zhang, X., Donohoe, G. G., Rook, M., O’Kennedy, R., and Ducreé, J., 2012, “Centrifugo-pneumatic valving utilizing dissolvable films,” *Lab on a Chip*, Vol. 12(16), pp. 2894-2902.
 - 7) Mark, D., Metz, T., Haeberle, S., Lutz, S., Ducreé, J., Zengerle, R., and von Stetten, F., 2009, “Centrifugo-pneumatic valve for metering of highly wetting liquids on centrifugal microfluidic platforms,” *Lab on a Chip*, Vol. 9(24), pp. 3599-3603.
 - 8) Lee, B. S., Lee, J. N., Park, J. M., Lee, J. G., Kim, S., Cho, Y. K., and Ko, C., 2009, “A fully automated immunoassay from whole blood on a disc,” *Lab on a Chip*, Vol. 9(11), pp. 1548-1555.
 - 9) Park, J. M., Cho, Y. K., Lee, B. S., Lee, J. G., and Ko, C., 2007, “Multifunctional microvalves control by optical illumination on nanoheaters and its application in centrifugal microfluidic devices,” *Lab on a Chip*, Vol. 7(5), pp. 557-564.
 - 10) Kang, D. H., Kim, N. K., Park, S. W., Lee, W., and Kang, H. W., 2020, “A microfluidic circuit consisting of individualized components with a 3D slope valve for automation of sequential liquid control,” *Lab on a Chip*, Advanced article.