

비 균일적 마이크로 원기둥 배열을 이용한 고성능 냉각 표면[§]

변 찬^{*†} · 김 성 진^{**}

* 영남대학교 기계공학부, ** KAIST 기계공학과

Experimental and Numerical Study on the Capillary Performance of Non-Homogeneous Micro-Post Arrays

Chan Byon^{*†} and Sung Jin Kim^{**}

* School of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ.,

** School of Mechanical, Aerospace and Systems Engineering, KAIST

(Received May 6, 2013 ; Revised September 15, 2013 ; Accepted September 16, 2013)

Key Words: Cooling Surface(냉각 표면), Micro-Post(마이크로 원기둥)

초록: 본 논문은 비 균일적 마이크로 원기둥 배열을 이용한 고성능 냉각 표면에 대해 다루고 있다. 비 균일적 원기둥 배열은 원기둥간의 거리 및 배열 규칙이 균일한 종전의 균일 배열과 달리, 두 개의 특성 공극 길이를 갖기 때문에 구조물의 모세관 능력을 획기적으로 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 비 균일적 마이크로 원기둥 배열을 제작하고, 모세관 상승률 실험을 통하여 모세관 능력을 측정하였다. 그리고 수치해석을 통하여 실험 결과를 검증하였고, 비 균일적 원기둥 배열의 모세관 능력 향상 원인에 대해 검토하였다. 실험 및 수치해석 결과, 마이크로 원기둥 배열의 모세관 능력은 배열의 고체 분율에 대한 일의적 함수로 주어지며, 고체 분율이 감소할수록 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 고체 분율이 약 0.25 이하로 줄어들면 모세관 능력은 급격히 감소한다.

Abstract: In this article, an advanced cooling surface based on micro-post arrays with non-homogeneous configurations is investigated and compared with conventional micro-post arrays with homogeneous configuration. The capillary performance of micro-post arrays are characterized using the capillary rate of rise experiments and numerical simulations which take into account the meniscus curvature. The experimental and numerical results show that that the capillary performance of the micro-post wick can be significantly enhanced, compared with the homogeneous type wick, by employing non-homogeneous configurations. The capillary performance is shown to be primarily a function of the solid fraction and increases linearly with decreasing solid fraction, regardless of the wick configuration, when the solid fraction is larger than 0.25. However, the capillary performance is found to be significantly reduced when the solid fraction falls below approximately 0.25.

- 기호설명 -

f_s : 고체분율 (Solid fraction) (-)
 K : 투과도(m²)
 R : 공극반지름(m)
 ε : 공극률 (-)

θ : 접촉각 (rad)
 σ : 표면장력 계수 (kg/s²)

1. 서론

액체의 모세관 흡입(Capillary wicking) 및 확장 표면(Extended surfaces)을 이용한 고성능 냉각 표면의 제작은 열전달, 유체공학 등 기계공학 다수 분야에서 매우 중요한 사안이다.^(1,2) 특히 최근에는 마이크로 스케일의 원기둥 형상 배열(Micro-post

§ 이 논문은 대한기계학회 열공학부문 2013년도 춘계학술대회 (2013. 5. 22.-24., BEXCO) 발표논문임.

† Corresponding Author, cbyon@ynu.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

array)을 MEMS 등의 마이크로 공정 기술로 제작함으로써, 이를 이용해 효율적으로 작동 유체를 흡입하여 냉각 성능의 획기적인 도모를 꾀하는 연구가 많이 수행되고 있다. 이러한 형태의 마이크로 구조물은 액체의 모세관 흡입을 위해 기존에 사용되던 소결 금속(Sintered metal), 그루브 구조(Groove), 금속망 구조(Mesh screen)등과 비교하였을 때, 탁월한 모세관 능력(Capillary performance)을 보일 뿐만 아니라, 폴리머 등 다양한 물질로 제작될 수도 있어 차세대 전자장치 냉각기 및 열교환기를 위한 대안으로 급속히 부상하고 있다.^(3,4) 하지만 이러한 마이크로 원기둥 배열에 대한 연구 수준은 아직 미약한 단계로, 지금까지의 연구는 균일 배열(Homogeneous configuration)에 대한 연구로 국한되어 있었다.⁽⁵⁻⁸⁾

본 연구에서는 비 균일적 마이크로 원기둥 배열(Non-homogeneous micro-post array)의 모세관 성능에 대해 연구하였다. 비 균일적 마이크로 원기둥 배열은 원기둥간의 거리 및 배열 규칙이 균일한 종전의 균일 배열과 달리, 두 개의 특성 공극 길이(Characteristic pore sizes)를 갖기 때문에 구조물의 모세관 능력을 획기적으로 향상시킬 수 있다. 본 연구는 마이크로 원기둥 배열의 모세관 성능 검증을 위한 모세관 상승률 실험(Capillary rate of rise experiment), 그리고 이를 특성화(Characterization)하기 위한 수치해석으로 구성된다. 또한 물리적인 이해를 위한 유동 가시화 실험을 추가적으로 수행하였으며, 이들 결과를 종합하여 결론을 도출하였다.

2. 실험

본 연구에서는 실리콘을 에칭(Etching)하여 마이크로 원기둥 배열을 제작하였다. 원기둥의 지름은 $60 \mu\text{m}$, 높이는 $100 \mu\text{m}$ 이다. Figure 1에 나타나 있듯 1 종류의 균일 원기둥 배열 및 5 종류의 비 균일 원기둥 배열이 제작되어 실험에 활용되었다. Table 1에 제작된 마이크로 원기둥 배열 샘플의 형상이 나열되어 있다. 제작된 각 샘플의 형상 변수(Geometric parameter)는 작은 특성 공극길이(Small characteristic pore size, d_p), 큰 특성 공극길이(Large characteristic pore size, D_p) 및 고체 분율(Solid fraction, f_s) 등이 있다. 특성 공극길이는 원기둥과 원기둥 사이에 유체가 흐르면서 메니스커스 및 모세관력을 형성할 수 있는 공극의 길이에 대한 정성적인 척도이다. 본 연구에서 다룬 마이크로 원기둥 배열의 경우 Fig. 1에서 확인할 수

Table 1 Design parameters of tested 2D wicks

Sample #	Type	d_p [μm]	D_p [μm]	f_s
1	Uniform array (Mono-scale)		-	0.349
2	Parallel		120	0.256
3			210	0.213
4	Quadratic	30	120	0.262
5			210	
6			300	
7	Diamond		200	0.182
8	Hexagonal		210	0.271
9	Periodic		60	0.299

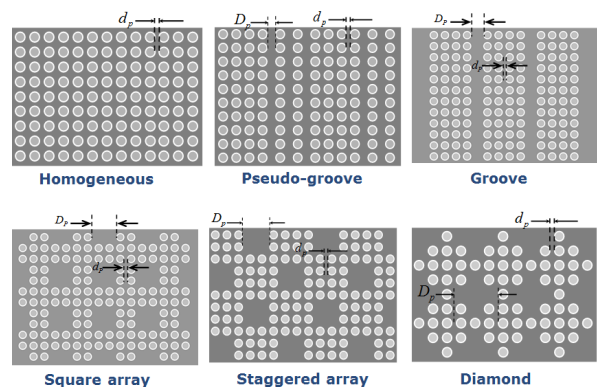


Fig. 1 Configurations of tested micro-post wicks

있듯이 작은 특성 공극길이는 균일 배열(Fig. 1(a))을 기준으로, 원기둥과 원기둥 사이의 거리로 정의함이 합당하다. 본 연구에서는 비 균일 원기둥 배열의 경우에도 균일 원기둥 배열과 같은 d_p 값을 적용하여 통제변인으로 삼았다. 비 균일 원기둥 배열의 경우, d_p 외에 또 하나의 특성 공극길이인 D_p 가 존재한다. 즉 각 비 균일 원기둥 배열은 균일 원기둥 배열에서 대략 D_p 만큼의 원기둥 구간을 공극으로 치환한 형태가 된다. 고체분율(f_s)는 원기둥 배열을 위에서 내려다 보았을 때, 원기둥 단면적의 합을 전체 면적으로 나눈 값이 된다. 즉, 얼마만큼 원기둥이 빼곡하게 나열되어 있는지에 대한 척도이다. 본 연구에서 제작한 비 균일 원기둥 배열은 큰 공극의 배열 구조에 따라 명명하였다. 정사각 배열(Square array, Sample 4-6),

교차 배열(Staggered array, Sample 8), 마름모 배열(Diamond array, Sample 7), 그루브 배열(Groove array, Sample 2-3), 그리고 준 그루브 배열(Pseudo groove array, Sample 9)가 그들이며, 이들 형상 및 각각의 큰 특성 공극길이 (D_p), 그리고 고체 분율 (f_s)이 Table 1 에 명시되어 있다.

다공성 물질(Wick)의 모세관 한계(Capillary limit)에 의한 최대 열성능은 일반적으로 다음 식과 같이 표현된다.⁽⁹⁾

$$Q_{\max, \text{capillary}} \cong 2 \left(\frac{\rho_l \sigma h_{\text{fg}}}{\mu_l} \right) \left(\frac{A_w}{L_{\text{eff}}} \right) \left(\frac{K}{R_{\text{eff}}} \right) \quad (1)$$

위 식에서, $\rho_l \sigma h_{\text{fg}} / \mu_l$ 은 작동유체의 Figure of merit 값이고, L_{eff} 는 Wick의 유효 길이, A_w 는 Wick의 단면적, K 는 Wick의 투과도(Permeability), R_{eff} 는 유효 공극반지름(Effective pore radius)이다. 식 (1)에서 확인할 수 있듯이, K/R_{eff} 는 Wick의 모세관 한계를 대변하는 핵심적인 설계 인자이다. 따라서, 이 항을 모세관 능력(Capillary performance)이라고 부른다.

본 연구에서는, 모세관 상승률 실험(Capillary rate of rise experiment)^(10,11)를 이용해 제작된 배열의 모세관 능력을 측정하였다. 실험에 사용된 샘플의 크기는 폭 1 cm, 길이 3 cm이다. 이 실험은 Fig. 2에 묘사된 것처럼 작동유체가 채워진 수면에 z-Stage를 이용하여 바닥이 유체에 살짝 닿도록 하

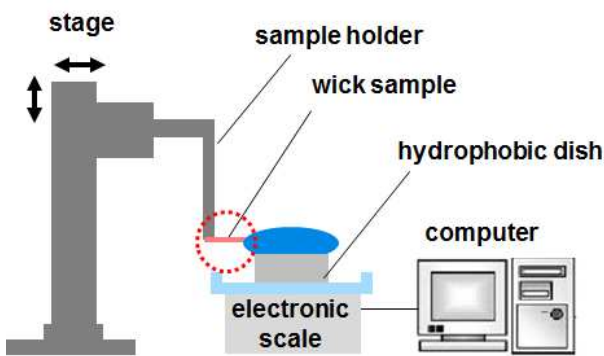


Fig. 2 Experimental apparatus for the capillary-rate-of-rise experiment

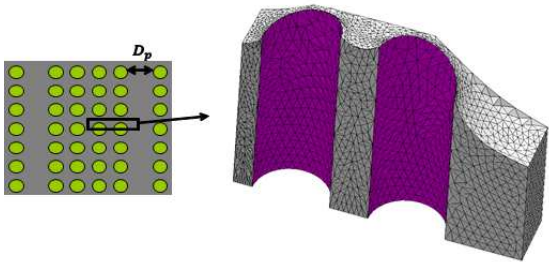


Fig. 3 Predicted meniscus shape using Surface Evolver (Square array type, $D_p = 210 \mu\text{m}$, $d_p = 30 \mu\text{m}$, $H = 100 \mu\text{m}$, $\theta = 7^\circ$)

여, 모세관력에 의해 빨려 올라가는 유체의 속도를 초고속 카메라(High speed camera)로 측정하여 모세관 능력을 추산하는 원리이다. 일반적으로, 액체의 모세관 상승률은 다음 식과 같이 모세관력, 점성력, 중력의 지배를 받게 된다.

$$\frac{2\sigma}{R_{\text{eff}}} = \frac{\varepsilon}{K} \mu h \frac{dh}{dt} + \rho gh \quad (2)$$

위 식에서 σ 는 표면장력계수이고, μ 는 점성계수, h 는 Liquid front의 높이, t 는 시간이다. 본 실험은 길이 3 cm의 짧은 샘플을 이용하므로, 중력의 영향은 무시할 수 있다. 위 식에서 중력 항을 배제하고, h 에 대하여 다시 써 주면 다음과 같다.⁽¹²⁾

$$h^2 = \left(\frac{4\sigma}{\varepsilon\mu} \right) \left(\frac{K}{R_{\text{eff}}} \right) t \quad (3)$$

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 Wick 샘플을 수평으로 배치시킴으로써 중력항을 배제하였다. 그러기 위해서는 Fig. 2와 같이 위로 돌출된 형태의 액체 풀의 형성이 필요하다. 본 연구에서는 극소수성(Superhydrophilic) 접시를 사용하여 이 문제를 해결하였다. 즉 액체를 담은 접시의 표면을 극소수성 물질을 이용해 코팅하고, 액체를 넘치게 부으면 액체는 흘러내리는 대신 Fig. 2와 같이 접시면 위로 타원체 형태의 메니스커스를 형성하게 된다. 본 연구에서는 액체가 빨려 올라가는 높이 h 대신 전자저울을 이용하여 빨려들어가는 액체의 질량을 측정함으로써, 보다 정확한 모세관 능력 측정을 피하였다.

위 식 (3)은 모세관 상승률 실험의 결과를 Fitting하는 데 이용된다. 즉 실험을 통해 h 와 t 의 관계가 주어지면, 식 (3)을 이용하여 모세관 능력인 K/R_{eff} 를 측정할 수 있다. Fitting의 Goodness는 Mean Absolute Deviation (MAD)를 계산함으로써 평가하였다. 계산된 MAD는 전 샘플에 대해 5% 이하로, 실험 결과가 식 (3)에서 예측하는 거동을 잘 따름을 확인할 수 있었다.

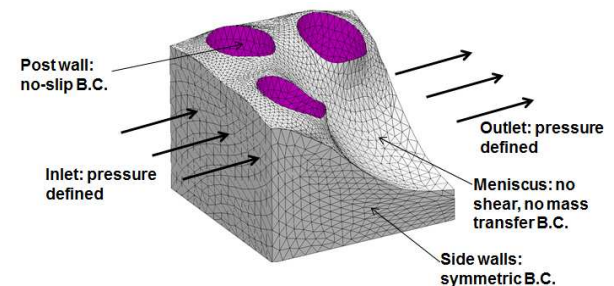


Fig. 4 Unit cell and boundary conditions used for the numerical simulation

Table 2 Capillary performance (K/R_{eff}) of wick samples (unit: μm)

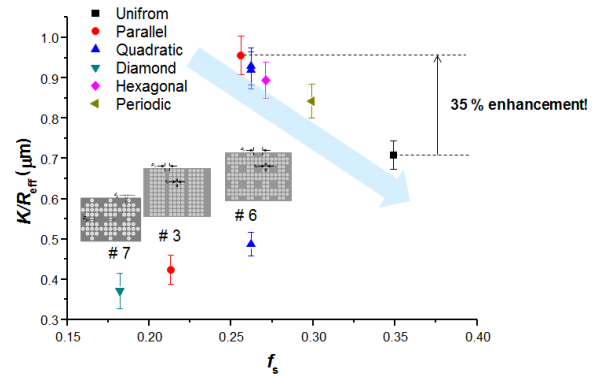
Case	Simulation K (μm^2)	Simulation R_{eff} (μm)	Simulation K/R_{eff} (μm)	Experiment K/R_{eff} (μm)
1	46.9	57.8	0.721	0.709
2	93.9	98.2	0.936	0.956
3	Not converged			0.724
4	89.4	99.7	0.897	0.929
5	112	123	0.914	0.919
6	Not converged			0.587
7	Not converged			0.871
8	104	119	0.875	0.894
9	78.5	93.2	0.863	0.842

3. 수치해석

본 연구에서는 실험 결과의 해석 및 보충을 위해 수치해석을 수행하였다. 모세관 능력을 예측하고 분석하기 위해 투과도 (K) 및 유효 공극반지름 (R_{eff})을 개별적으로 계산하였다. 유효 공극반지름을 계산하기 위해, 본 연구에서는 표면에너지 최소화 알고리즘(Surface energy minimization algorithm)을 이용하여⁽¹⁰⁾ 메니스커스의 형상을 예측하였다. Figure 3 은 표면에너지 최소화 알고리즘을 통해 예측된 메니스커스의 형상을 보여주고 있다. 예측된 메니스커스의 형상을 이용하면, 유효 공극반지름 (R_{eff})을 계산할 수 있고, 이를 이용하여 다음과 같이 잘 알려진 Laplace-Young's equation 을 통해 모세관 압력 (P_c) 또한 계산할 수 있다.

$$P_c = \frac{2\sigma}{R_{\text{eff}}} \quad (4)$$

투과도의 예측은 Navier-Stokes 방정식을 풀어야 하므로 조금 더 복잡하다. 본 연구에서는 앞서 기술한 바와 같이 예측된 유체의 메니스커스 형상을 고려하여 투과도를 예측하였다. 기존의 연구자들은 편리한 투과도의 예측을 위해, 마이크로 구조물 사이 공극의 메니스커스가 평탄하다고 가정하여 계산을 수행하였다. 하지만 이러한 가정은 Byon 등에 의해 지적되었듯이,⁽⁸⁾ 100% 이상의 높은 오차를 발생시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 마이크로 원기둥 사이 공극에서의 실제 메니스커스 형상을 고려함으로써, R_{eff} 를 개별적으로 예측할 뿐 아니라, K 를 더욱 정확하게 구하는 이점을 취하였다. 계산된 메니스커스 형상을 CFD package 인 COMSOL 로 Export 하여 주어진 형상에 대해, Fig. 4 와 같이 Unit cell 과 경계조건을 구성하여

**Fig. 5** Measured capillary performances of the tested wicks vs. solid fraction

수치해석 계산을 수행하였다. Figure 4 에 나타난 바와 같이, 마이크로 원기둥 표면에서는 no-slip 경계조건을 주었고, Unit cell 의 옆면에는 대칭 경계조건(Symmetry condition)을 주었다. 공기의 점성이 액체보다 훨씬 작기 때문에, 메니스커스 면에는 무전단 경계조건(no shear boundary condition)을 주었다. 따라서 메니스커스 면에서의 법선방향 유동 속도 및 접선방향 유동 속도의 구배는 0 이 된다. 또한 입구(Inlet)과 출구(Outlet)에는 주기적 압력 경계조건(Periodic pressure boundary condition)을 인가하였다. Mesh 의 수에 대한 Test 를 수행하여, 2 배의 Mesh 를 구성하여도 해석 오차가 1% 이내가 되도록 하였다. 주어진 경계조건에 대해 CFD Package 가 유동 속도 분포를 계산하면, Inlet 에서의 유동 평균 속도를 산출하고, Darcy's law⁽¹⁰⁾를 이용하여 투과도를 계산하였다. 본 수치해석에서는 Reynolds 수가 약 0.1 이 되도록 입구에서의 압력 조건을 조절하였다. 이는 미소구조 유체역학(Microfluidics)에서 흔히 발견할 수 있는 값이다.⁽⁹⁾ 실험을 통해서도 K 과 R_{eff} 값 간의 비(比)만을 알 수 있지만, 수치해석은 이 두 변수를 각각 개별적으로 예측할 수 있다는 의미를 지닌다.

4. 결 과

4.1 모세관 능력

모세관 상승률 실험을 통해 평가된 각 샘플의 모세관 능력이 Table 2 에 나열되어 있다. 수치해석을 통해 예측된 K 와 R_{eff} 의 값, 그리고 이들로부터 도출되는 모세관 능력에 대한 예측값 또한 이 테이블에 정리되어 있다. Table 2 에서 확인할 수 있는 바와 같이, 실험 및 수치해석을 통해 예측한 모세관 능력 값은 모든 샘플에 대해 약 3.4% 이내로 잘 일치하는 것을 알 수 있다. Table 2 에서

볼 수 있듯이 수치해석 결과는 비 균일 배열의 투과도 (K) 값 및 유효 공극 반지름 (R_{eff}) 값이 균일 배열보다 크다는 점을 시사한다. 즉 균일 배열과 비교했을 때, 비 균일 배열의 유동 효율은 우수한 반면, 모세관 압력은 낮은 것이다. 이는 D_p 로 대변되는 큰 특성 공극이 비 균일 원기둥 배열에 존재하기 때문으로 풀이될 수 있다. 즉 큰 공극의 존재가 원기둥 배열 자체의 특성 공극 길이를 높이는 효과를 주는 것이다. 다공성 물질의 투과도는 특성 공극 길이의 제곱에 비례하고 유효 공극 반지름은 특성 공극 길이에 비례한다는 점을 고려하였을 때,⁽¹³⁾ 이들 변수들의 비인 모세관 능력 (K/R_{eff})의 값이 증가하게 됨은 자명하다.

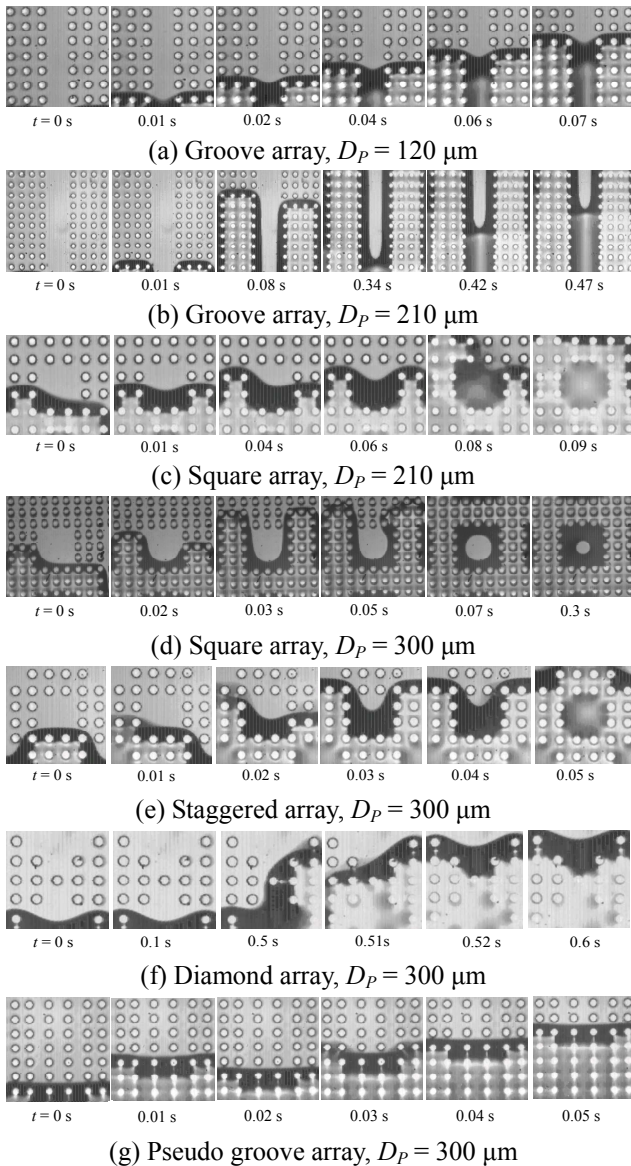


Fig. 6 Visualization of capillary flow in 2D bi-porous wicks

그루브 배열(Sample 2-3)의 경우, 2 번 샘플은 균일적 원기둥 배열에 비해 35% 높은 모세관 능력을 보였다. 하지만 좀 더 큰 D_p 값을 갖는 3 번 샘플의 경우 오히려 균일적 원기둥 배열에 비해 더 낮은 모세관 능력을 나타내었다. 또한, Table 2 에 나타나 있듯이 3 번 샘플에 대해서는 수치 해석 결과 또한 얻을 수 없었다. 3 번 샘플 내부 액체의 메니스커스 형상에 대한 안정적인 해를 얻을 수 없었다. 정사각 배열(Sample 4-6)의 경우에도 비슷한 결과를 얻었다. 4-5 번 샘플의 경우, 균일적 원기둥 배열에 비해 각각 31%, 30% 향상된 모세관 능력을 가짐을 알 수 있었다. 하지만 큰 D_p 값을 갖는 6 번 샘플의 경우 오히려 모세관 능력이 균일적 원기둥 배열에 비해 떨어졌고, 수치해석 결과 또한 얻지 못함을 알 수 있다. 이러한 경향은 7 번 샘플(마름모 배열)에서도 관찰할 수 있었다. 교차 배열(8 번) 및 준 그루브 배열(9 번) 샘플의 경우 균일 원기둥 배열에 비해 높은 모세관 능력을 보였다.

각각의 샘플들의 모세관 능력은 Fig. 5 에서 보듯이 고체 분율 (f_s)을 독립변수로 한 그래프에 일의적으로 나타낼 수 있다. 이 그림에서 보듯이, 마이크로 원기둥 배열의 모세관 능력은 각 샘플의 구조 및 종류와 관계 없이 고체 분율에 대한 일의적 함수로 표현이 가능하며, 고체 분율이 증가함에 따라 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 하지만, 3,6,7 번 샘플의 경우 Fig. 5 에 표시된 점선으로 예측 가능한 값보다 훨씬 낮은 모세관 능력을 가짐을 앞에서 살펴보았다. 따라서 이 그림은 마이크로 원기둥 배열의 고체 분율이 대략 0.25 보다 낮을 때 모세관 능력이 급격하게 감소함을 시사하고 있다. 그 원인에 대한 분석이 다음 절에서 이뤄진다.

4.2 마이크로 원기둥 배열에서의 모세관 유동

Figure 6 은 본 연구에서, 모세관 상승률 실험 외에 개별적으로 수행된 모세관 유동 가시화 실험 결과를 보여주고 있다. 이 그림에서 보듯이, 원기둥 배열 내부에서의 모세관 유동은 주로 모세관 압력이 큰 작은 공극(d_p 로 대변되는)을 통해서 이뤄지며, 큰 공극의 경우에는 주변의 작은 공극으로 흐르는 유동이 섭동(Perturbation)되면서 채워지는 것을 알 수 있다. 이러한 메커니즘에 의해 비 균일 원기둥 배열의 큰 공극은 효과적으로 채워지며 유동에 활용될 수 있으므로, 결과적으로 배열의 투과도 및 모세관 능력을 높일 수 있음을 알

수 있다. 하지만 Fig. 6(b-d)에서 보듯이, 3, 6 번 샘플의 경우 큰 공극이 채워지지 않음을 알 수 있다. 이 경우는 큰 공극의 존재가 오히려 유동의 유효 채널 폭을 좁게 만드는 결과를 초래하기 때문에 결과적으로 배열의 투과도를 급격하게 감소시켜 모세관 능력을 감소시키는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 3 번, 6 번 샘플에 대해 메니스커스 형상에 대한 수치해석 결과를 얻을 수 없다는 점도 설명할 수 있다. 즉, 구조물에 안정적인 메니스커스가 형성되지 않기 때문에 메니스커스 형상에 대한 해를 얻을 수 없는 것이다.

7 번 샘플의 경우 Fig. 6(e)에 나타난 것처럼 큰 공극이 유체에 의해 완벽하게 채워진다. 따라서 모세관 능력 감소에 대한 3, 6 번 샘플과 같은 설명은 7 번 샘플에 대해 유효하지 않다. 7 번 샘플의 경우 Fig. 6(e)를 자세히 보면, 큰 공극이 채워지는데 걸리는 시간 스케일이 매우 큼을 알 수 있다. Xia 등⁽¹⁴⁾이 지적했듯이, 마이크로 원기둥 배열을 흐르는 작동유체의 전과 과정은 두 개의 시간 스케일로 구분되어 분석할 수 있다. 첫째는 원기둥 배열 바닥을 흐르는 시간 스케일이고, 둘째는 원기둥 옆면을 따라 흐르는 시간 스케일이다. Xia 등⁽¹⁴⁾은 이들 두 시간 스케일이 비슷할 때에만 열역학적 평형을 가정할 수가 있다고 했다. 미세 구조물 내부를 흐르는 유체의 열역학적 평형이 중요한 이유는, 열역학적 평형이 가정되어야만 Laplace-Young 방정식으로 모세관력을 예측할 수 있기 때문이다. 만약 유동이 형성하는 메니스커스에 대해 열역학적 평형을 가정할 수 없다면 실제 모세관 압력은 Laplace-Young 방정식으로 예측할 수 있는 값보다 훨씬 작은 값을 갖게 될 것이다.⁽⁹⁾ Fig. 6(e)를 보면, 원기둥 바닥을 흐르는 시간 스케일과 원기둥 옆면을 따라 흐르는 시간 스케일은 매우 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 따라서 이 경우, 모세관 유동에서의 열역학적인 평형을 보장할 수 없으며, 모세관 압력이 균일 원기둥 배열에 비해 큰 폭으로 감소하게 될 것임을 예측할 수 있다. 즉 본 연구에서 실험을 통해 얻은 0.25 라는 고체 분율 기준값은 유체역학적인 효과와 열역학적인 효과의 상충에 따른 중간값임을 알 수 있다. 고체 분율이 클수록 유체역학적으로는 유동 채널이 넓어져서 투과도가 증가하지만, 열역학적으로는 메니스커스의 형성이 불안정하게 되어서 모세관 압력이 감소하는 것이다. 따라서 최적의 고체 분율 값은 이 두 가지 부분의 효과인 균형에 의해 결정되어지는 값이라는 해석이 가능하다. 이에 대한

정밀한 해석 및 계산 연구는 본 연구의 범위 밖이며, 본 연구에서는 비 균일 마이크로 원기둥 배열의 성능에 대한 실험, 수치적 연구 및 이에 대한 정성적인 해석으로 요를 맺고자 한다.

5. 결 론

본 논문은 비 균일적 마이크로 원기둥 배열을 이용한 고성능 냉각 표면에 대해 다루고 있다. 비 균일적 원기둥 배열은 원기둥간의 거리 및 배열 규칙이 균일한 종전의 균일 배열과 달리, 두 개의 특성 공극 길이를 갖기 때문에 구조물의 모세관 능력을 획기적으로 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 비 균일적 마이크로 원기둥 배열을 제작하고, 모세관 상승률 실험을 통하여 모세관 능력을 측정하였다. 그리고 수치해석을 통하여 실험 결과를 검증하였고, 비 균일적 원기둥 배열의 모세관 능력 향상 원인에 대해 검토하였다. 실험 및 수치해석 결과, 마이크로 원기둥 배열의 모세관 능력은 배열의 고체 분율에 대한 일의적 함수로 주어지며, 고체 분율이 감소할수록 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 고체 분율이 약 0.25 이하로 줄어들면 모세관 능력은 급격히 감소한다.

참고문헌

- (1) Do, K. H, Kim T. H. and Kim S. J., 2010, "Analytical and Experimental Investigations on Fluid Flow and Thermal Characteristics of a Plate-fin Heat Sink subject to a Uniformly Impinging Jet," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 2318~2323.
- (2) Byon, C. and Kim, S. J., 2012, "Capillary Performance of Bi-porous Sintered Metal Wicks," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp. 4096~4103.
- (3) Sobhan, C. B., Rag, R. L. and Peterson, G. P., 2007, "A Review and Comparative Study of the Investigations on Micro Heat Pipes," *International Journal of Energy Research*, Vol. 31, pp. 664~688.
- (4) Cao, X. L., Cheng, P. and Zhao, T. S., 2002, "Experimental Study of Evaporative Heat Transfer in Sintered Copper Bidispersed Wick Structures," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 16, pp. 547~552.
- (5) Lips, S., Lefevre, F. and Bonjour, J., 2010, "Thermohydraulic Study of a Flat Plate Heat Pipe by Means of Confocal Microscopy: Application to a 2D Capillary Structure," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 132, pp. 112901.

- (6) Nam, Y., Sharratt, S., Byon, C., Kim, S. J. and Ju, Y. S., 2010, "Fabrication and Characterization of the Capillary Performance of Superhydrophilic Cu Micropost Arrays," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 19, pp. 581-588.
- (7) Lefevre, F. and Lallemand, M., 2006, "Coupled Thermal and Hydrodynamic Models of Flat Micro Heat Pipes for the Cooling of Multiple Electronic Components," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 1375~1383.
- (8) Byon, C. and Kim, S. J., 2011, "The Effect of Meniscus on the Permeability of Micro-post Wicks," *Journal of Micromechanics and Microengineering* Vol. 21, pp. 115011.
- (9) Faghri, A., 1995, *Heat Pipe Science and Technology*, Taylor & Francis, Washington.
- (10) Holley, B. and Faghri, A., 2006, "Permeability and Effective Pore Radius Measurements for Heat Pipe and Fuel Cell Applications," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, pp. 448~462.
- (11) Fries, N., Odic, K., Conrath, M. and Dreyer, M., 2008, "The Effect of Evaporation on the Wicking of Liquids into a Metallic Weave," *Journal of Colloid Interface Science* Vol. 321, pp. 118~129.
- (12) Washburn, E. W., 1921, "The Dynamics of Capillary Flow," *Physical Review*, Vol. 17, pp. 273~283.
- (13) Chi, S. W., 1976, *Heat Pipe Theory and Practice*, Hemisphere, Washington.
- (14) Xiao, R., Enright R. and Wang, E. N., 2010, "Prediction and Optimization of Liquid Propagation in Micropillar Arrays," *Langmuir* Vol. 26, pp. 15070-15075.