

연잎 효과를 모방한 초발수 표면 연구- 전산모사 해석을 통한 최적의 초발수 표면 도출

최세용, 안성배, 김효정, 장준경

[46241] 부산광역시 금정구 부산대학로 63 번길 2(장전동)
부산대학교 나노과학기술대학 나노에너지공학과

초록: 초발수 표면은 표면이 젖지 않으면서 물방울이 자유롭게 움직일 수 있는 표면을 말한다. 이는 자연에서 많이 관찰되며 예를 들면 연잎, 나비와 곤충의 다리가 대표적이다. 일반적으로 초발수 표면은 물방울과 접촉할 때 이루는 각이 150°보다 크며, 표면을 5°정도 기울이면 물방울이 굴러가기 시작한다. 특히 연잎 표면을 자세히 보면 마이크로/나노 단위의 미세한 돌기가 표면 위에 존재한다. 이러한 연잎 표면의 구조에 따른 특성을 모방하여 표면 위에 인위적으로 다양한 모양, 크기의 돌기를 만들어 표면의 초발수 특성을 향상시키는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 연구가 다양하고 광범위하게 진행되면서, 학문적인 원인 분석 외에도 산업에서의 활용가능성이 주목받고 있다. 이에 따라 이 논문은 전산모사 방법을 사용하여 표면 돌기와 관련된 다양한 변수(돌기의 모양, 높이, 너비, 돌기 사이의 간격, 표면과 물 분자 간의 에너지)에 따라 표면의 초발수 특성이 어떻게 변하는지 연구해보고, 초발수 현상의 특징과 그 발생 원인을 이해하는데 목적을 두며 이러한 연구결과는 실제 산업현장에서 최적의 초발수 표면을 제작하는데 도움을 줄 것이다.

핵심어: 연잎 효과, 초발수 표면, 몬테카를로 방법, 격자 기체 모형

Introduction

우리는 평소 일상 생활 속에서 Figure1과 같이 자동차 유리, 건축 외장재, 페인트, 섬유, 전자 부품 등 많은 방수 제품을 볼 수 있고 이를 활발히 사용하고 있다. 이러한 제품들이 방수 효과를 가질 수 있는 원리 중 일부는 자연에서 그 답을 찾을 수 있다. 자연

상태에서 표면은 젖지 않고 물방울은 쉽게 미끄러지는 특성을 가지는 대표적인 예로는 연잎 표면, 게코(Geko) 도마뱀의 발, 나비, 곤충의 다리와 날개 등이 있다(Figure2 참고). 그 중에서 대표적으로 연잎에 대해서 조사해본 결과 연잎 표면에는 미세한 돌기가 존재하고 있으며 이로 인해 표면에 물이 스며들지 않고 표면 위를 굴러다닌다는 사실을 알게 되었다. 그리고 이러한 특성을 초발수 현상이라고 한다¹.

연잎 효과를 모방한 초발수 표면 연구 - 전산모사 해석을 통한 최적의 초발수 표면 도출

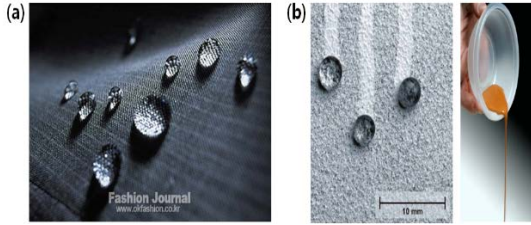


Figure 2. 자연 현상을 이용한 생활 속의 예
 (a)방수 효과를 이용한 옷감
 (b)연잎 효과를 적용한 그릇

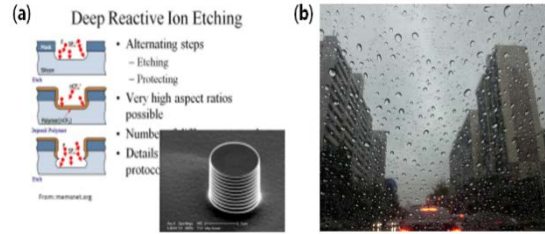


Figure 1. 초발수 표면을 만드는 두가지 방법
 (a)물리적 방법: 이온 Etching을 통한 초발수표면 제작
 (b)화학적 방법: 자동차유리에 방수코팅제를 뿌림

이론 및 계산방법

1

고체 표면에 물방울을 떨어뜨리면 물방울은 고체 표면과 어느 정도의 각도를 형성하는데, 이를 접촉각이라 한다. 만약 고체의 표면이 매끄러울 경우, 표면과 물방울의 접촉각은 Young의 방정식에 의해 결정된다². (Figure4 참고)

$$\cos(\theta) = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (1)$$

식 (1)에서 γ_{SV} 는 표면(Surface)과 기체(Vapor)의 표면장력, γ_{SL} 는 표면과 액체(Liquid)의 표면장력, γ_{LV} 는 액체와 기체의 표면장력을 나타낸다.

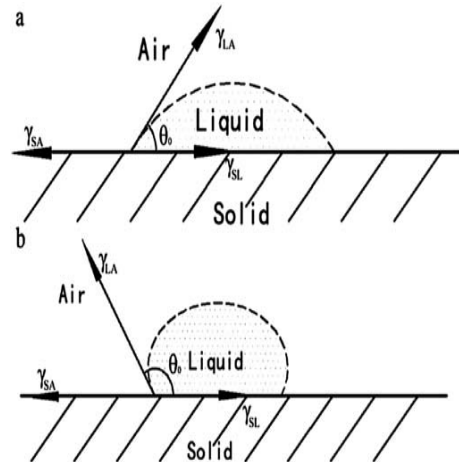


Figure 4. 표면에서의 접촉각
 (a) 친수성 표면(접촉각<math>< 90^\circ</math>) (b) 발수성 표면(접촉각>math>90^\circ</math>)

일반적으로 표면에 돌기가 있는 거친 표면에서는 물방울이 Wenzel 상태와 Cassie-Baxter 상태로 불리는 이 두 가지 상태로 존재할 수 있다. (Figure5

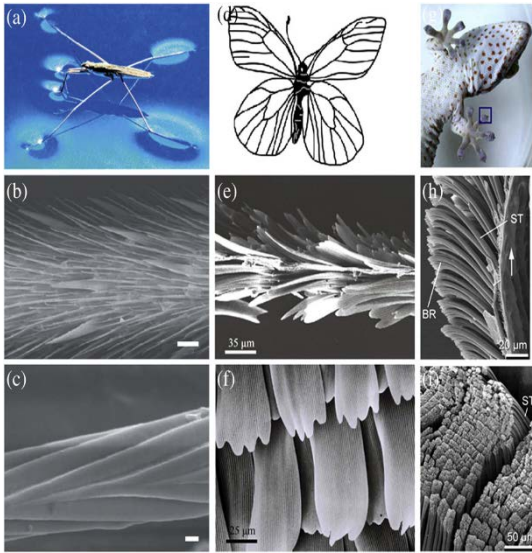


Figure 3. 자연에서 발견할 수 있는 초발수현상의 예
 a,b,c : 소금쟁이; d,e,f : 나비; g,h,i : 게코 도마뱀

초발수 특성을 갖는 표면은 물리, 화학적 방법으로 만들 수 있다(Figure3 참고). 물리적인 방법은 레이저나 이온 등으로 표면을 깎아서 인위적으로 표면에 거칠기를 주어서 초발수성을 만드는 것이고, 화학적 방법은 표면에 소수성 물질로 코팅을 하여서 초발수성을 입히는 것이다. 대체로 독립적으로 사용하기 보다는 함께 사용되는 경우가 많다⁷.

이 실험에서는 위의 방법 중 물리적인 방법만으로 표면에 돌기를 만들어 초발수 특성을 갖는 표면을 만드는 방법에 초점을 맞추고 연구를 진행했다. 그리고 표면에 나노 사이즈의 돌기를 설정할 때 돌기의 모양, 돌기의 너비, 돌기 사이의 간격에 변화를 주어 초발수 특성이 잘 나타나는 조건을 찾는 것이 이 연구의 목적이다.

최세용, 안성배, 김효정, 장준경

참고) Wenzel 상태는 돌기 사이에 물방울이 스며들어, 물이 돌기 표면 전체와 맞닿아있는 상태이고 Cassie-Baxter 상태는 물방울이 돌기 사이의 공간에 스며들지 않고, 돌기의 꼭대기 부분과 맞닿아 있는 상태이다. Wenzel 상태에서 Cassie-Baxter 상태로 갈수록 물방울이 구조물과 닿는 면적이 줄어들고, 표면을 기울였을 때 물방울이 구르기 시작하는 각도가 작아지는 경향을 보인다³⁻⁴.

이 실험은 격자 기체 기반의 몬테카를로 방법을 사용하여 물리적 방법으로 제작할 수 있는 직사각형, 원통형 돌기를 만들고 돌기의 높이, 너비, 돌기 사이 간격과 b의 값에 따라 물방울이 어떤 상태로 존재하는지 알아 보았다.

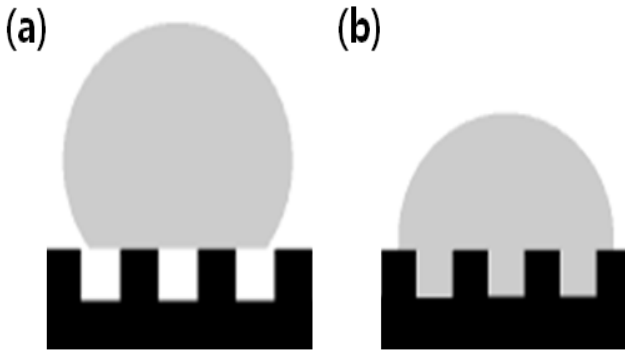


Figure 5. 거친 표면에서 물방울이 갖는 두가지 상태
(a) Cassie-Baxter상태; (b) Wenzel상태

대부분의 이상적인 초발수 표면에서 물방울은 Cassie-Baxter상태로 존재하며, 일반적으로 Wenzel 상태에 비해서 높은 접촉각을 갖는다. 거친 표면에서 나타나는 Wenzel상태와 Cassie-Baxter상태는 같은 분자끼리 서로 뭉치려고 하는 성질과 서로 다른 두 물질이 만나는 경계면에 작용하는 에너지의 상호작용에 의해 결정된다.

2

직접 나노 크기의 돌기가 있는 표면을 만들고 이를 이용해서 실험을 하기는 제약이 많이 있기 때문에, 컴퓨터 프로그램을 이용한 전산모사 방법을 사용해 연구를 진행한다. 전산모사는 생체 분자에서부터 재료 분야에 이르기까지 자연과학이나 공학 등 여러 분야에 걸쳐 광범위하게 활용되고 있는 방법이다. 전산모사 방법을 사용하면 실험적으로 얻기 힘든 분자 수준의 정보를 얻을 수 있으며, 실험만으로는 설명하기 힘든 현상들을 이해하는 데 많은 도움을 줄 수 있다.

2-1. 몬테카를로 방법⁵⁻⁶

일반적으로 몬테카를로 방법은 계산하려는 값이 복잡한 경우에 근사적으로 계산할 때 사용하는 확률적인 계산 알고리즘으로서 수학이나 물리학 등에 자주 사용된다. 이를 이 실험에 적용하면 주어진 초기의 상태에서 다음 상태로 변화할 때 각각의 에너지들을 서로 비교하여 에너지가 낮은 방향으로 상태를 변화하게 하며 이 과정을 반복하여 에너지가 가장 안정한 위치를 찾을 때까지 상태를 변화시키는 방법이다. 하지만 이 방법은 시스템이 항상 현재보다 더 낮은 에너지 상태로만 변화하게 된다. 예를 들어 아래 Figure6을 보면 빨간 원은 그 상태보다 더 낮은 에너지 상태가 있지만 반응 과정의 에너지가 현재의 에너지보다 높은 에너지 상태이므로 더 이상 현재 위치에서 움직이지 않는 것을 볼 수 있다.

따라서 이를 극복하기 위해서 메트로폴리스 알고리즘을 도입할 필요가 있다. 이 알고리즘을 사용하게 되면 몬테카를로 방법의 한계점인 주위의 에너지 상태가 현재의 상태보다 높을 경우 이 상태는 안정적인 상태로 인식되는 점을 극복하여 특정한 확률에 따라 주위의 에너지가 높을 경우에도 변화가 일어나게 되어 본래 안정적이라 인식되어 있던 상태보다 더 안정적인 상태를 찾을 수 있는 가능성이 생기게 되어 최종적으로 에너지 곡선에서 우리가 찾는 가장 안정한 상태에 대한 결과를 얻을 수 있다.

연잎 효과를 모방한 초발수 표면 연구 - 전산모사 해석을 통한 최적의 초발수 표면 도출

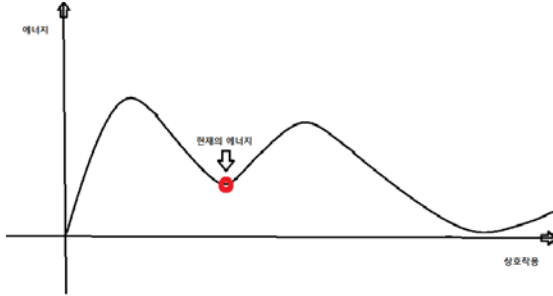


Figure 6. 시스템의 에너지 상태

2-2. 격자 기체 모형

주어진 돌기 조건에서 각 상태에 대한 에너지를 구할 때에는 Figure7과 같이 표면에 돌기가 하나만 있는 시스템을 구성한다. 이때 실제 돌기가 있는 표면 위에 존재하는 물방울은 돌기에 비해 매우 크고 돌기 하나만 떼어내어 그 돌기가 연속적으로 반복된다고 가정하고 계산을 수행한다. 이러한 방법을 연속적인 경계조건(Periodic Boundary Condition, PBC)라고 한다.

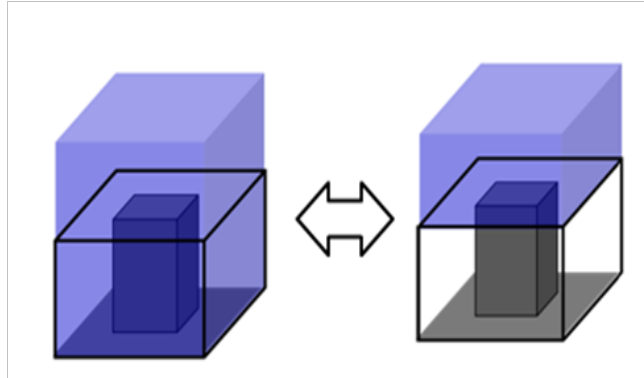


Figure 7. 격자 기체 모형에서 고려된 시스템의 모양

그리고 구성된 시스템을 격자로 나누어 나타내는 격자 기체 모형을 도입한다. 이 모형에서 분자는 일정한 격자 자리에만 있을 수 있으며, 격자 사이 거리는 물 분자의 직경인 0.27nm로 정의한다. 이 격자 사이 거리는 전산모사에서 사용하는 기본 단위이다. 물 분자는 표면을 제외한 모든 격자자리에 들어갈 수 있으며 물 분자간에는 가장 가까운 물 분자를 서로 당기는 인력이 작용한다. 만약 물 분자가 표면 근처에 존재해서 물 분자와 가장 가까운 격자 자리에

있는 분자가 표면을 구성하는 분자일 경우 물 분자는 표면으로부터의 에너지인 b 를 느끼게 된다. 이러한 과정에 따라 전체 계의 에너지는 아래의 식(2)으로 나타낼 수 있다.

$$E = -\epsilon \sum_{i,j=n,m} c_i c_j - b \sum_{i=surf} c_i - \mu N_{bound} \quad (2)$$

여기에서 c_i 는 i 번째 위치에서 물 분자의 상태(1=액체, 0=기체)를, N 은 시스템의 액체 물 분자 수를 나타낸다. 식에서 첫 번째 전체 합은 물 분자끼리의 인력에 대한 것이고, 두 번째 전체 합은 물 분자와 표면 사이의 인력을 나타낸다.

이 식을 사용하여 주어진 돌기 조건에서 무작위적으로 물 분자의 상태를 변화시키고, 전체 시스템 에너지를 계산하여 가장 낮은 에너지 상태를 찾아가는 과정을 10만번 반복한다. 이 중 처음 6만번의 결과는 버리고(아직 평형 상태에 가는 과정이라 생각이 되기 때문) 4만번의 결과를 평균하여 돌기 사이 공간의 밀도를 구한다. 이렇게 구한 돌기 사이 공간의 밀도 평균값이 0.5보다 크면 Wenzel상태, 0.5보다 작으면 Cassie-Baxter상태에 있다고 본다.

이 실험에서는 다양한 돌기 조건(돌기 모양, 너비, 높이)을 설정하고 돌기 사이 간격을 변화시키면서 돌기 사이 공간에서 물의 밀도가 어떻게 변하는지 확인하였다. 돌기 사이 공간에서 물의 밀도가 0.5이하에서 0.5이상으로 바뀌는(Cassie-Baxter상태에서 Wenzel상태로 전이가 일어난다) 돌기 사이 간격과 바로 이전 간격의 중간 값을 '임계 간격'이라 한다. 또한 물 분자와 표면 사이의 에너지인 b 의 값에 따라서의 임계 간격의 변화에 대해서도 확인하였다.

2-3. 진행방법

이 실험에서는 Edsion_chem의 웹사이트(chem.edison.re.kr)에 업로드 되어 있는 '격자 기체 기반의 초발수 표면 몬테카를로 시뮬레이션 프로그램(PNU-PILLAR_MC)'을 사용하여 전산모사를 수행하였다. 이 Edsion_chem 웹사이트는 한국과학기술

EDISON 계산화학 경진대회

최세용, 안성배, 김효정, 장준경

정보연구원에서 진행 중인 국가 과제의 결과물로, 직접하기 어려운 실험을 대신하여 전산모사를 수행할 수 있는 프로그램을 일반인에게 공개하고, 사용할 수 있게 만들어오는 계산화학 프로그램 홈페이지이다. 이 실험은 웹사이트를 사용하여 우리가 하려는 몬테카를로 시뮬레이션 프로그램을 찾아 실행하고 그 결과를 분석하였다.

그 결과, 표면 돌기의 모양, 높이, 너비, 돌기 사이의 간격, 물 분자와 표면 사이의 에너지를 변화시키면서 시뮬레이션을 해보기로 결정하고 각 경우에 대한 가장 안정한 상태를 얻었다.

전산모사 결과는 3차원적인 그림, 돌기 사이의 공간에 존재하는 물의 밀도 값 등으로 확인할 수 있으며, 시뮬레이션 결과 값으로 나온 3차원적인 그림을 일리노이대학에서 개발한 VMD프로그램을 통해 확인하였다. VMD프로그램이란 여러가지 분자 모델의 데이터를 가시적으로 보여주는 프로그램이다.

이렇게 시뮬레이션의 결과를 눈과 수치로 확인한 후, 결과값들을 이용하여서 MATLAB을 통해 수식을 이용하여서 결과값을 변환하고 돌기들의 조건에 따른 물 밀도의 그래프를 나타내고, b의 크기에 따라 임계 간격의 변화도 볼 수 있다.

결과 및 토의

1

1-1. 돌기 사이의 간격, 돌기 크기에 따른 밀도 변화

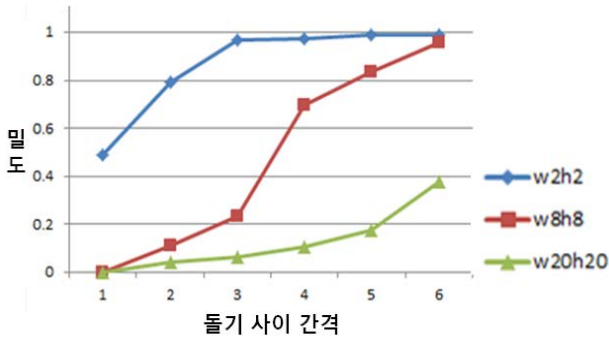


Figure 8. 원통형 돌기 사이 간격에 따른 밀도 변화

Figure8은 돌기 높이, 너비의 비가 1:1로 일정한 원

통형 돌기의 돌기 크기 변화에 대하여 돌기 사이 간격에 따른 밀도 변화를 나타낸 것이다. 이 그림을 따르면 돌기의 크기가 클수록, 같은 돌기 사이 간격에서 물의 밀도 값이 작음을 알 수 있다. 따라서 돌기 전체의 크기가 클수록 물방울은 Cassie-Baxter상태로 존재하려고 한다. 이는 돌기 사이 간격에 따라 물의 밀도 값이 0.5보다 작은 경우가 돌기가 클수록 많음을 의미한다고 볼 수 있다. 즉 초발수성은 돌기의 크기가 클수록 좋아진다는 것을 알 수 있다.

1-2. 돌기 모양에 따른 초발수 특성 변화

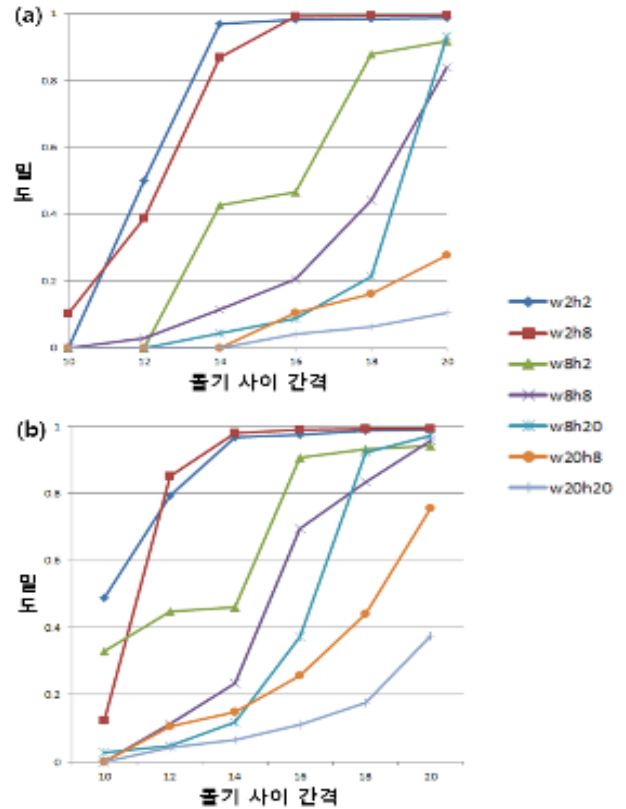


Figure 9. 돌기 사이 간격 변화에 따른 밀도 분포 (a)사각형; (b)원통형

Figure9는 서로 다른 돌기 모양에 대하여, 돌기 사이 간격에 따른 밀도 변화를 나타낸 것이다. 돌기 모양을 제외한 나머지 값들을 같게 하고 Figure 10의 a와 b에서 같은 색을 비교하면 사각형모양의 돌기의 물의 밀도보다 원형 모양의 돌기의 물의 밀도가 더 큰 것을 볼 수 있다. 따라서 사각형 모양의 돌기가

EDISON 계산화학 경진대회

연외 효과를 모방한 초발수 표면 연구 - 전산모사 해석을 통한 최적의 초발수 표면 도출

원통형 모양의 돌기보다 임계간격이 큼을 확인할 수 있다. 즉 돌기 사이의 공간이 클수록 간격 사이로 물 분자가 들어가기 쉬워지게 된다. 물 분자의 수가 많아 짐에 따라 물 분자간 작용하는 인력이 표면과 물 분자에서 작용하는 에너지보다 커지게 되고 간격이 점점 더 커지게 될수록 그 간격에 존재하는 물의 밀도는 점점 더 커지게 된다.

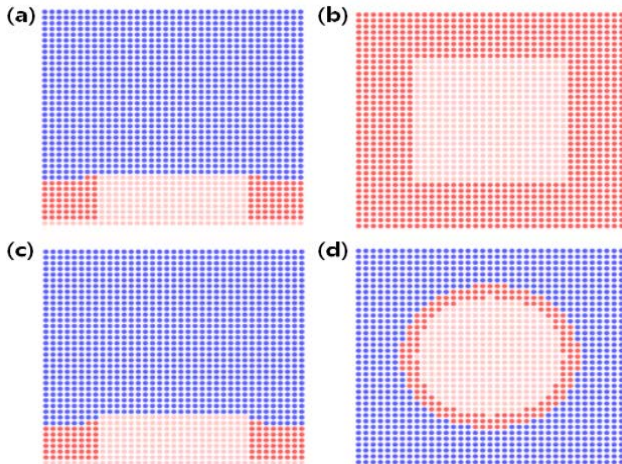


Figure 10. 가장 안정한 상태의 물의 평형 상태

[높이8, 너비20, 돌기사이간격 16]

(a)사각형 돌기에서 물의 평형상태

(b)사각형 돌기에서 높이 7에 대한 단면

(c)원통형 돌기에서 물의 평형상태

(d)원통형 돌기에서 높이 7에 대한 단면

[파란색=액체 상태 물, 빨간색=기체, 분홍색=돌기]

Figure10은 서로 다른 돌기 모양에 대하여 돌기높이, 너비, 돌기 사이의 간격이 같을 때 계산을 통해 얻은 가장 에너지가 안정한 상태를 그림으로 나타낸 것이다. 사각형보다 원통형 돌기에서 물이 돌기 사이 공간을 더 많이 채우고 있는 것을 확인할 수 있다. 실제 밀도 값을 계산해보면 사각형 돌기의 경우 0.105, 원통형 돌기의 경우 0.257로 원통형 돌기의 밀도 값이 크게 나온다. Figure10의 (b)와 (d)를 비교하면, 높이가 7인 단면에서 원통형 돌기가 사각형 돌기보다 물이 더 많이 들어온다는 것을 알 수 있다.

1-3. 돌기 높이에 따른 초발수 특성 변화

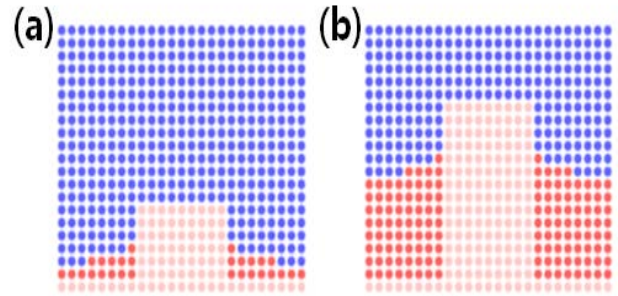


Figure 11. 높이에 따른 안정한 상태

[돌기 너비 8, 돌기사이간격 16]

(a)높이 6; (b)높이 14

[파란색=액체 상태 물, 빨간색=기체, 분홍색=돌기]

Figure11은 원통형 돌기의 너비, 돌기 사이 간격이 같을 때, 서로 다른 돌기 높이에 대한 가장 안정한 상태를 그림으로 나타낸 것이다. 높이가 낮은 경우에 물이 돌기 사이 공간을 더 많이 채우고 있는 것을 확인할 수 있다. 실제 밀도 값을 계산해보면 높이가 6일때는 0.762, 높이가 14일때는 0.421로 높이가 낮은 경우가 더 밀도 값이 크게 나온다. Figure12는 돌기 높이 변화에 따른 임계 간격을 나타낸 것이다. 원통형 돌기의 경우 돌기 높이가 증가할수록 임계 간격이 증가하는 것을 볼 수 있다.

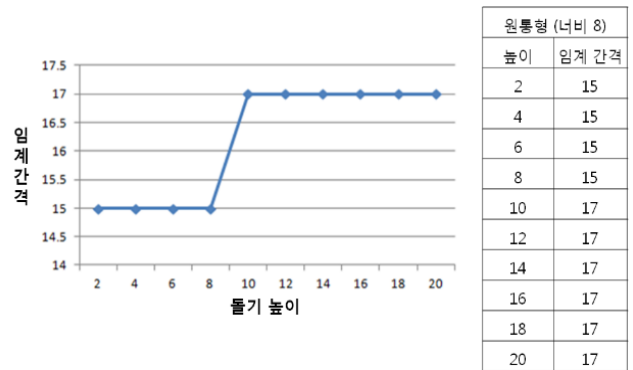


Figure 12. 원통형 돌기 높이 변화에 따른 임계 간격 변화

1-4. 돌기 너비에 따른 초발수 특성 변화

최세용, 안성배, 김효정, 장준경

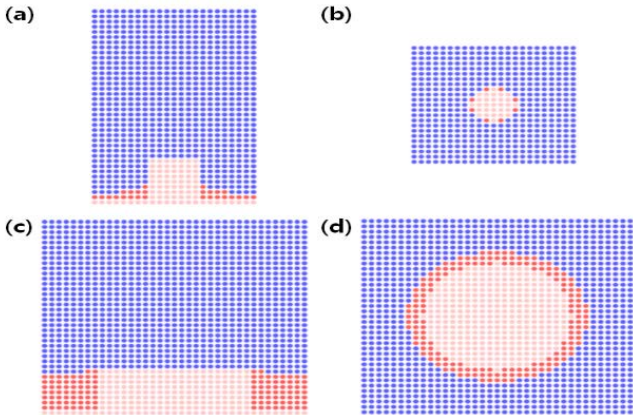


Figure 13. 돌기 너비에 따른 안정한 상태
 [돌기 높이 8, 돌기사이간격 16, 원통형]
 (a), (b) 너비 6일 때의 상태; (c), (d) 너비 20일 때의 상태
 [파란색=액체 상태 물, 빨간색=기체, 분홍색=돌기]

Figure13은 원통형 돌기의 높이와 돌기 사이의 간격이 같을 때, 서로 다른 돌기 너비에 대한 가장 안정한 상태를 그림으로 나타낸 것이다. 돌기 너비가 작은 경우에 물이 돌기 사이 공간을 더 많이 채우고 있는 것을 확인할 수 있다. 실제 밀도 값을 계산해보면 너비가 6일 때는 0.726, 너비가 20일 때는 0.257로 너비가 작은 경우 밀도 값이 크게 나온다는 것을 확인할 수 있다. Figure14는 돌기 너비 변화에 따른 임계 간격을 나타낸 것이다. 원통형 돌기의 경우, 돌기 너비가 증가할수록 임계 간격이 증가하는 것을 알 수 있다.

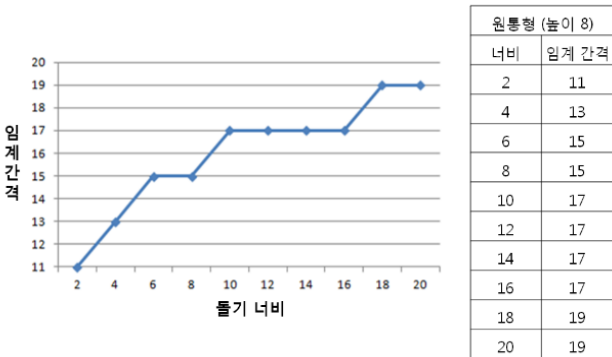


Figure 14. 원통형 돌기 너비 변화에 따른 임계 간격 변화

1-5. 물 분자와 표면 사이의 에너지에 따른 초발수 특성 변화

돌기의 구조(돌기의 높이, 너비, 돌기 사이의 간격) 뿐만 아니라 돌기를 만드는 표면과 물방울 사이의 간의 에너지인 b 에 따라서도 초발수 특성이 변화한다. 아래 Figure15에서 보듯이 b 의 크기가 커지면 임계간격이 줄어 들게 되는 것을 볼 수 있다. 이는 b 의 크기가 커질수록 표면과 물방울 간에 작용하는 힘이 커지게 되어 초발수성이 작용하는데 어려움을 주는 것을 확인할 수 있었다.

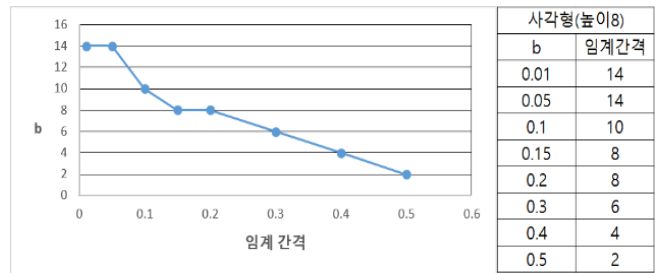


Figure 15. 사각형 돌기의 b 변화에 따른 임계 간격 변화

2

돌기 사이 간격이 증가함에 따라 빈 공간을 차지하는 물의 밀도는 증가한다. 그리고 돌기 높이, 너비가 증가하게 되면 빈 공간을 차지하는 물의 밀도가 감소한다. 즉, 돌기간격사이가 좁고 돌기 높이와 너비가 클수록 표면의 초발수 특성이 좋아진다는 사실을 알 수 있다. (Cassie-Baxter상태가 잘 나타난다고 할 수 있다.) 또 표면과 물 분자간에 작용하는 에너지가 클수록 임계간격이 작아지는 것을 보아 돌기의 높이, 너비와 돌기 사이의 간격이 같을 경우 에너지가 클수록 공간 사이의 물의 밀도가 크고 에너지가 작을수록 공간 사이의 물의 밀도가 작은 것을 확인할 수 있다. 하지만 돌기의 높이와 너비가 끝없이 증가한다고 초발수성을 가지는데 긍정적인 영향을 미치는 것만은 아니다. 돌기 사이의 간격이 비교적 좁은 경우를 생각해보면 같은 단위 면적당 돌기의 수가 간격이 비교적 넓을 때보다 많이 필요하므로 초발수 제품 생산 과정에 더 많은 비용이 들어갈 것이다. 즉, 돌기 사이 간격이 최대한 넓으면서도 초발수 효과를 낼 수 있을 때 가장 경제적인 초발수 표면을 만들

EDISON 계산화학 경진대회

연잎 효과를 모방한 초발수 표면 연구 - 전산모사 해석을 통한 최적의 초발수 표면 도출

수 있는 조건이라 할 수 있으며, 표면과 액체 사이의 에너지에 따라서도 달라질 수 있으므로 표면에 소수성이 높은 물질을 코팅을 하는 화학적 방법을 물리적 방법과 함께 사용하거나 소수성이 높은 물질 중에서 경제적으로 사용할 수 있는 재료를 이용하는 것도 경제적으로 초발수 표면을 만드는 방법이 될 수 있을 것이다.

결론

일상생활 속에서 많은 것들을 지나치며 살아간다. 왜 등산복은 물에 젖지 않고, 연잎의 표면은 항상 깨끗한지를 말이다. 연잎이 보여주는 독특한 특성을 초발수 특성이라고 하는데, 이를 연구하고 원리를 밝혀내어 우리 생활에 적용한지는 얼마되지 않았다. 우리는 표면 위의 미세한 나노 돌기에 의해 나타나는 초발수 특성을 전산 모사 방법을 사용해 연구해 보았고 표면 위 미세한 돌기가 표면의 초발수 특성에 영향을 주는 용인에 대하여 실험을 하였다. 그 결과, 돌기의 모양이 원통형보다는 사각형일 때, 돌기 사이의 간격이 넓을 때 보다는 좁을 때, 돌기의 높이가 높을 때, 돌기의 너비가 좁을 때 미세한 돌기가 있는 표면의 초발수 특성이 좋아지는 것을 알았고, 또한 표면과 물 분자간의 에너지가 작을 때 초발수 특성이 좋아지는 것도 확인할 수 있었다.

지금까지 이 연구는 돌기 모양, 너비, 높이, 돌기 사이 간격과 물 분자와 표면 사이의 에너지 라는 한정적인 범위 안에서만 변화시키고 비교했기 때문에 그 결과를 일반화하기 어려운 부분이 있다. 왜냐하면 실제 표면에 만들 수 있는 돌기 모양은 아주 다양하기 때문이다. 그 예로 실제 연잎의 표면은 계층적으로 큰 돌기 위에 작은 돌기들이 있는 구조이다. 하지만 이 실험에서는 단일 돌기에 대한 결과를 계산하는 것이므로, 추후 큰 돌기 위의 작은 돌기를 계층적으로 만들어서 그 영향을 알아보고 실제 계층적 표면 구조를 가진 연잎 표면이 왜 좋은 초발수 특성을 나

타내는지에 대하여 연구해 볼 수 있을 것이다. 또한 돌기의 너비, 높이, 돌기 사이의 간격 범위를 실제 실험 범위로 확장시켜 연구를 진행할 필요가 있으며, 이 결과를 바탕으로 실생활에 응용할 수 있는 가장 효율적인 구조를 찾는 것이 최종적인 목표이다.

감사의 말. 이 연구는 EDISION 과제를 통해 지원받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Andreas Solga, *Bioinsp.Biomim.* **2007**, 2, S126-S134
2. Y.Y.Yan, *Advances in Colloid and Interface Science*, **2011**, 169, 80.
3. Ben Wang, *J.Mater. Chem*, **2012**, 22, 20112.
4. Neelesh A. Patanker, *Langmuir*, **2003**, 19, 1249.
5. Joonkyung Jang, *Journal of Physical Chemistry C*, **2012**, 116, 19233
6. Joonkyung Jang, *Journal of Physical Chemistry C*, **2014**, 118, 26070.
7. Guangyi Sun, *Journal of Micromechanics Micoengineering*, **2010**, 20, 075028