

홀 패턴 텍스처 표면에서 충돌하는 단일 액적의 젖음 특성

문주현* · 이상민* · 정정열** · 이성혁*,†

Wetting Characteristic of Single Droplet Impinging on Hole-Patterned Texture Surfaces

Joo Hyun Moon, Sangmin Lee, Jung-Yeul Jung and Seong Hyuk Lee

Key Words: Anodization(양극산화법), Droplet(액적), Impinging(충돌), Hydrophilic(친수성), Hydrophobic(소수성).

Abstract

This study presents the dynamic wetting characteristics of an impact droplet on hole-patterned textured surfaces. The flat surfaces were manufactured by a drilling machine to generate the micro-order holes, leading to make the surface hydrophobic. Other flat surfaces were fabricated by the anodizing technique to make hydrophilic texture surfaces with a nanometer order. For hydrophilic and hydrophobic textured surfaces with similar texture area fractions, the impinging droplet experiments were conducted and compared with flat surface cases. As results, an anodized textured surface decreases apparent equilibrium contact angle and increases contact diameters, because of increase in contact area and surface energy. This is attributed to more penetration inside holes from larger capillary pressure on nanometer-order holes. On the other hand, temporal evolution of the contact diameter is smaller for the hydrophobic textured surface from less penetration on the micro-order holes.

기호설명

d : 홀 지름, m
 $D(t)$: 시간에 따른 접촉 지름, m
 D^* : 무 차원 접촉 지름, -
 h : 홀 깊이, m
 p : 홀 간격, m
 r : 조도 계수, m
 v_0 : 충돌 속도, m/s
 θ_c : 캐시 상태에서의 평형 접촉각, m

θ_c : 접촉각, °
 θ_w : 벤젤 상태에서의 평형 접촉각, °
 ρ : 밀도, kg/m³
 σ_{LV} : 표면장력(액체-기체), N/m

1. 서론

단일 액적의 동적 퍼짐과 수축에 대한 연구는 스프레이 응용 분야에 적용할 수 있는 기본적으로 중요한 연구 분야이며, 최근까지도 연구자들은 열 및 물질전달 효율 제고를 위한 연구를 진행하고 있다. 또한 이러한 연구들을 바탕으로 열교환기(heat exchanger), 증발기(evaporator) 그리고 응축기(condenser)와 같은 다양한 열유체공학 산업분야에도 적용할 수 있다⁽¹⁻⁴⁾. 고체 벽면과 충돌하는 액적의 온도가 동일한 경우, 상대적으로 낮은 충돌 속도를 가진 액적은 되튐(rebound)을 거치지 않고

(Received: 6 Sep 2015, Received in revised form: 17 Sep 2015, Accepted: 18 Sep 2015)

*중앙대학교 기계공학부

**선박해양플랜트연구소 해양플랜트산업기술센터

†책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학부

E-mail : shlee89@cau.ac.kr

TEL : (02)820-5254 FAX : (02)823-5332

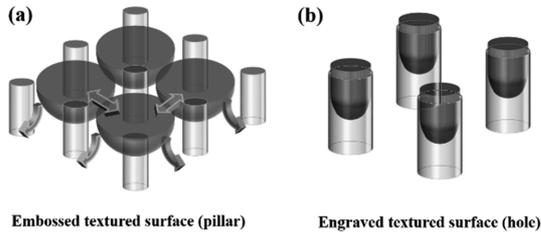


Fig. 1. Comparison between pillar-patterned and hole-patterned textured surfaces

반복적인 피집과 수축 후 평형 상태에 도달하여 표면에 고착된다. 액적의 피집과 수축 특성은 유체 물성, 충돌 조건, 표면의 젖음성(wettability) 등에 영향을 받는다⁽⁴⁻⁸⁾. 특히 충돌하는 단일 액적 과 고체간 접촉 면적과 극대화하기 위해서는 표면의 물리적, 화학적 특성을 변경하여 표면의 젖음성을 향상시키는 방향으로 설계해야 한다⁽⁹⁾.

다양한 표면 젖음성에 따른 액적 피집 및 수축 거동에 대한 실험 및 수치해석을 진행하였으나⁽⁴⁻⁵⁾, 대부분의 표면들은 Fig. 1(a)와 같이 기둥(pillar) 형상을 적용한 연구들에 국한되어 있다. 하지만 기둥 형상은 외부 충격 시 각 기둥마다 집중응력이 발생하여 변형이 쉽다는 단점이 있어 산업체에 적용하기 어렵다. 하지만 Fig. 1(b)와 같은 홀 패턴(hole-pattern)의 형상으로 표면을 텍스처링한 경우, 고체 표면은 외부 충격에도 고체 주변으로 응력을 분산시켜 내구성이 우수하며 복잡한 공정을 거치지 않고 간단하게 제작할 수 있는 장점이 있다⁽¹⁰⁾. 따라서 산업체에서 쉽게 적용할 수 있는 금속 표면을 홀 패턴으로 가공하여 젖음성을 조절하는 연구가 필수적이다⁽¹⁰⁾.

본 연구의 목적은 금속 알루미늄(Al 6061) 시편에 드릴링 기법과, 양극산화법(AAO, Anodic Aluminum Oxide)을 각각 적용하여 소수성과 친수성 텍스처 표면으로 제작하여 단일 액적의 젖음성을 비교하는 것이다. 그리고 텍스처된 표면 위에 단일 액적을 충돌시켜 동적 거동에 대해 분석하였다. 그리고 초고속 카메라를 이용하여 충돌 전과 후의 액적 거동을 가시화 하였으며, 이미지 분석을 통해 시간에 따른 직경과 접촉각을 비교하였다.

2. 실험

본 실험에 사용한 금속 표면은 알루미늄(Al 6061) 시편을 4000 Grit의 샌드페이퍼로 그라인딩(grinding) 하여 0.06 μm로 조절하여 거칠기 변화에 대한 영향을 최소화

했다⁽¹⁰⁾.

시편을 소수성으로 제작하기 위하여 마이크로-드릴링 장비(EGX-350, Roland)에 연결된 직경 0.3 mm의 초경 드릴을 이용하여 정방향으로 제작하였다. 드릴링으로 생성된 홀 면적은 표면 면적에 대한 투영된 공동 면적으로 면적비(ϕ_s)로 정의하였고, 친수성 시편과 동일한 면적비를 만들기 위하여 홀 간 거리(pitch)를 0.691 mm로 설정하여 0.148의 면적비를 얻었다. 알루미늄 시편은 친수성 표면으로서, 접촉각이 더 낮은 친수성 표면을 만들기 위해서 양극 산화(Anodization) 법을 이용하여 텍스처 시편을 제작하였다. 옥살산 용액 0.3 M을 이용하여 에틸렌 글리콜을 냉매로 하는 이중비커에 담아 내부를 25°C로 냉각시킨 후 온도를 유지시킨다. 친수성 텍스처 표면을 제작하기 위한 시편을 양극에 연결하여 옥살산 용액에 담그고, 음극에는 동일한 크기의 알루미늄 시편을 연결한 후, 전압 90 V를 인가한다. 1시간의 전압 인가 후 산화된 알루미늄 시편을 꺼내 30°C로 유지된 오븐에 24시간 건조시켜 친수성 표면을 제작하였다.

이미지 임계값(threshold) 를 125로 조절하여 이미지를 분석한 결과 양극산화 시편의 평균 홀 직경은 57.27 nm이며 면적비는 0.149로 나타나 드릴링 시편과 면적비가 유사하다.

Figure 2는 접촉각 측정과, 액적 충돌 실험을 위한 실험 장치를 나타낸 그림이다. 실험장치 구성은 영상화 장치와 액적 생성 장치로 구분할 수 있다. 고체표면에 충돌하는 단일 액적은 Fig. 2과 같은 형태로 정면에서 초고속 카메라(HG-LE, Redlake)에 연결된 텔레센트릭 렌즈(TEC-M55, Computar)를 이용하여 초당 5000장

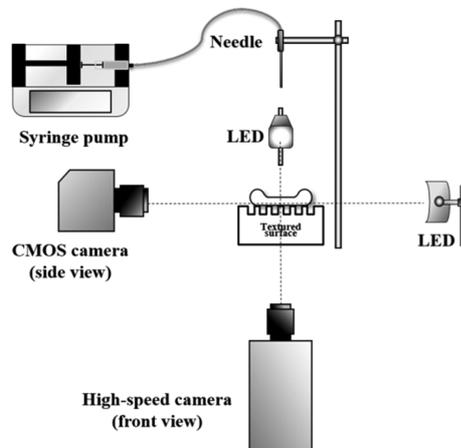


Fig. 2. Schematics of experimental set-up

으로 촬영하였다. 측면에는 CMOS 카메라(MI-300, Artlay)를 텔레센트릭 렌즈(TML-HP, Edmund optics)를 이용하여 촬영하였다. 두 카메라의 노출시간은 모두 5 μ s로 촬영하였으며, 실험에 사용한 광원은 모두 5 W LED 램프를 이용하였다. 초고속 카메라의 해상도는 640·256으로 설정하였으며, 시간에 따른 촬영된 이미지는 ImageJ를 이용해 분석하였다. 단일 액적 생성을 위하여 높이를 변경할 수 있는 스테이지를 설치하고 수직 방향으로 액적 분사 높이를 설정하였다. 33 gage 미세 바늘(90310, Hamilton)에 연결된 시린지 펌프(LSP01-2A, Longerpu- mp)로 4.4 μ L의 탈이온수를 가장 느린 속도로 주입하여 바늘 끝에 생성된 액적이 최소의 내부 유동을 가지고 자중에 의하여 수직 낙하할 수 있도록 설계하였다.

3. 결과 및 고찰

Figure 3은 양극산화 텍스처 표면, 평판, 그리고 드릴링 텍스처 표면에서의 접촉각과 표면 사진을 나타낸 그림이다. 양극산화 텍스처 표면 사진의 스케일 바는 1 μ m 이고, 평판과 드릴링 텍스처 표면 사진의 경우 1 mm 이다.

Figure 3에서 양극산화를 한 시편과 드릴링 한 시편 모두 홀 표면의 텍스처 형상인 것을 확인하였다. 양극산화 텍스처 시편의 경우에는 평판보다 젖음성이 크게 향상되었으며, 드릴링 텍스처 시편의 경우 접촉각이 증가하여 젖음성이 감소하였다.

같은 홀 면적비 임에도 불구하고 접촉각이 다르게 나타나는 이유는 홀 지름에 의한 영향이 크기 때문이다. 홀 패턴의 텍스처 표면의 경우 기둥 형태의 텍스처 표면과 달리 기둥 사이로 유체가 침투하지 않는 헤미-위킹(hemi-wicking) 현상이 발생하지 않는다.

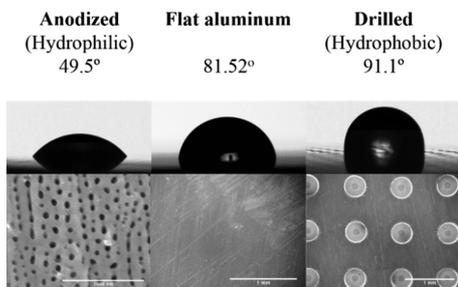


Fig. 3. Equilibrium contact angle of anodized and drilled surfaces with flat aluminum surface

홀 텍스처 표면위쪽으로 액적이 접촉한 이후 평형 상태에 이르게 되면 액적의 유체 아래쪽으로 순간적으로 공기가 갇히게 된다^(11,12). 그리고 홀 내부에서는 갇힌 공기 위쪽으로 액적의 일부 유체가 모세관력에 의하여 안쪽으로 침투하게 된다. 따라서 침투하는 액적의 길이는 홀 형상과 밀접한 관련이 있으며, 특히 지름과 깊이에 큰 영향을 받는다. 단일 홀에서 작용하는 액적과 공기의 압력 변화를 살펴보게 되면 모넨뎀 보존 방정식에 따라 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$F_c = \pi\sigma_{LV}d\cos\theta_V \quad (1)$$

$$F_p = \frac{-P_0L_{eq}\pi d^2}{4(h-L_{eq})} \quad (2)$$

여기서 F_c 는 모세관력을 나타내고, F_p 는 공기의 반발력을 나타낸다. 그리고 σ_{LV} , P_0 , L_{eq} , θ_{eq} , d , 그리고 h 는 각각 표면장력, 대기압, 유체 침투길이, 평형 접촉각, 홀 지름, 그리고 홀 깊이를 나타낸다. 따라서 식 (1)과 (2)를 합치게 되면 아래와 같이 액적의 침투 길이를 계산할 수 있다⁽¹¹⁾.

$$L_{eq} = \frac{4h\sigma_{LV}\cos\theta_{eq}}{P_0d+4\sigma_{LV}\cos\theta_{eq}} \quad (3)$$

따라서 텍스처 표면에 고착된 액적의 침투한 길이를 계산할 수 있으며, 이에 따라 접촉각 또한 계산할 수 있다⁽¹²⁾.

Figure 4는 홀 깊이에 따른 액적의 침투량을 전체 깊이당 침투량을 비율로 계산한 그래프이다. 홀 내부에서

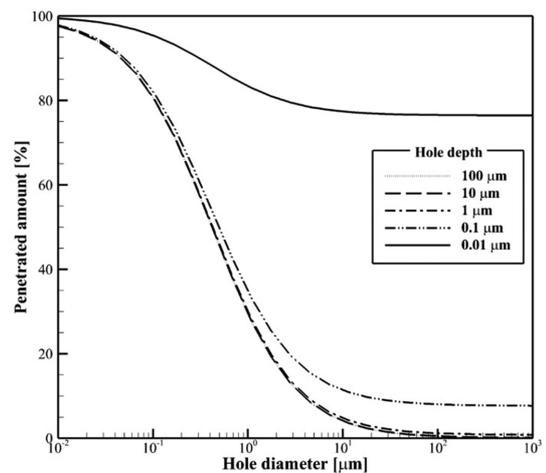


Fig. 4. Penetrated amount with respect to hole diameter and hole depth

의 유체의 단면은 직각($\theta=0$)으로 가정하였다.

그림에 따르면 홀 지름이 감소할수록 홀 깊이 대비 유체 침투량이 증가하는 것을 알 수 있으며, 홀 깊이가 증가할수록 유체 침투량이 증가하는 것을 알 수 있다. 홀 지름이 감소할수록 침투량이 증가하는 이유는 모세관력이 공기의 반발력보다 상대적으로 커졌기 때문이다.

또한 홀 깊이가 깊어질 수록, 반발력이 감소하여 더 많은 유체가 침투할 수 있다. 홀 면적비가 같은 경우 더 많은 유체가 안으로 침투하게 되면 홀 내부의 젖음 면적이 증가하게 된다. 따라서 같은 깊이를 가지는 친수성과 소수성 홀 패턴의 경우 홀 내부의 고체-액체간 접촉 면적은 상당히 큰 차이를 보인다. 본 연구에서 제작된 표면의 경우 홀 지름 57.27 nm의 친수성 표면의 경우 침투 분율은 약 88%이며, 300 μm 소수성 표면의 경우 0.0014%이므로 약 628배 차이를 가진다.

고체-액체간 접촉 지름은 접촉각이 감소할수록 증가하게 된다. 친수성 홀 패턴 표면의 고체-유체의 접촉지름은 3.6 mm이고, 해당 면적은 10.18 mm^2 이다. 그리고 소수성 홀 패턴의 접촉지름은 2.64 mm로서 접촉면적은 친수성 표면의 접촉면적의 절반 수준이다. 따라서 친수성 홀 텍스처 표면은 소수성 표면에 비해 액적-고체간 접촉면적이 크게 증가하게 되어, 열 및 물질전달 효율을 크게 향상시킬 수 있다.

고체 텍스처 홀 아래쪽에 공기가 모두 가두어진 경우, 액적이 표면 위에 떠있는 캐시 상태(Cassie-state)가 된다. 이때, 깁스 표면에너지 방정식(Gibbs-Free energy equation)에 의하여 액적의 접촉각은 식 (4)의 캐시방정식(Cassie-equation)을 따르게 된다:

$$\cos \theta_{CB} = (1 - \phi_s)(\cos \theta_{eq} + 1) - 1 \quad (4)$$

따라서 고착된 액적 아래 공기로 인하여 텍스처 면적비가 증가하게 되면 액적의 접촉각은 평판보다 증가하게 되지만, 깊이에 따라서는 차이가 없다.

하지만 액적이 홀 내부로 완전히 침투하게 되어 벤젤 상태(Wenzel-state)가 된 경우 고체-유체간 접촉면적과 표면에너지가 증가하게 될 경우 액적은 벤젤 방정식(Wenzel-equation)을 따르게 된다:

$$\cos \theta_W = r \cos \theta_{eq} \quad (5)$$

여기서 θ_W 는 텍스처 표면의 평형 접촉각이고, r 는 조도 변수(roughness factor)로서 홀 지름과 깊이, 그리고 간격에 영향을 받는다. 따라서 고체 평판에서 접촉각이 증가할 수록 텍스처 표면에서의 액적의 평형 접촉각은 증가

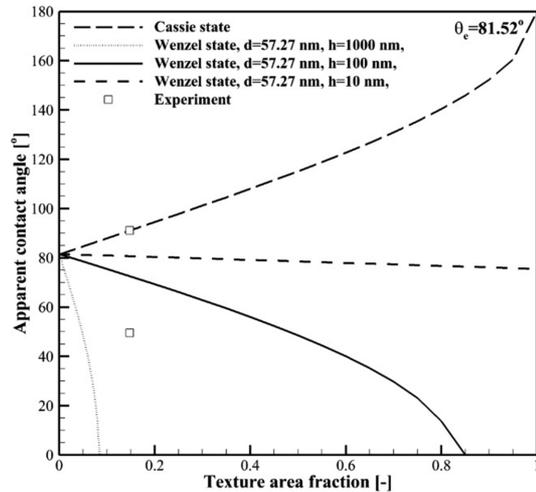


Fig. 5. Contact angle variation with respect to hole depth, diameter and pitch

한다. 하지만 산업 분야에서 사용하는 대부분의 금속 표면이 친수성 ($\theta_{eq} < 90^\circ$)인 점을 감안해볼 때, r 값이 증가할 경우 텍스처 표면의 접촉각이 감소하게 된다. 벤젤 상태인 경우 표면의 형상을 조절하여 원하는 접촉각을 만들 수 있다. 따라서 홀 텍스처 표면의 경우 조도 변수는 $1 + (\pi dh)/p^2$ 이므로 홀 지름과 깊이가 증가할수록, 그리고 간격이 줄어들수록 표면의 접촉각이 감소하게 된다.

Figure 5는 텍스처 표면을 캐시상태와 벤젤 상태로 각각 가정했을 경우 면적비에 따른 접촉각 변화를 나타낸 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이, 벤젤 상태인 경우 평판의 접촉각 보다 감소하는 경향을 보인다. 특히 깊이가 증가할수록 더욱 큰 감소량을 보인다. 따라서 양극산화 공정을 통해 홀 표면의 지름을 작게 만들어 홀 내부로 유체가 많이 침투한 경우 벤젤 상태에 도달하게 되고, 젖음성을 향상시킬 수 있다. 그리고 깊이를 깊게 만들수록 접촉각이 더 작게 나타날 수 있어, 다양한 가공 조건에 따라 접촉각을 조절할 수 있다. 반대로 홀 지름이 커져 300 μm 에 이르게 되면, 홀 내부로 침투하는 유체량이 적어 공기를 최대한으로 가두게 되고, 고체에 고착한 액적은 캐시 상태로 변하게 되어 표면이 소수성을 띄게 된다. 따라서 본 실험에서 소수성 표면에서의 평형 접촉각은 캐시 방정식과 잘 일치한다.

Figure 6은 홀 내부의 유체의 침투량에 따른 공기의 내부압력의 크기를 홀 깊이와 지름에 따라서 나타낸 그래프이다. 그림에 따르면 홀 깊이가 깊어질수록, 홀 지름이 감소할수록 침투량에 따른 내부 반발 압력이 증가

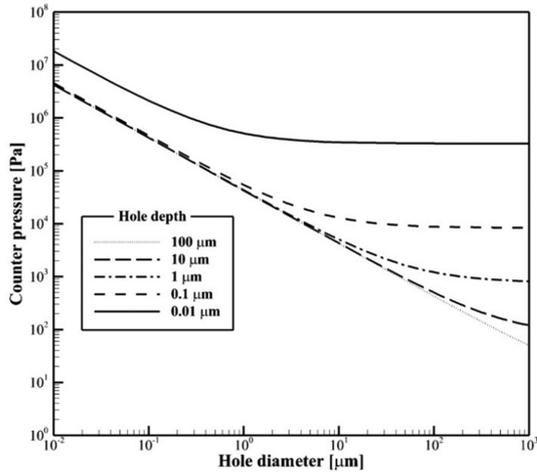


Fig. 6. The gas counter-pressure produced by the gas trapped inside the hole patterned surfaces

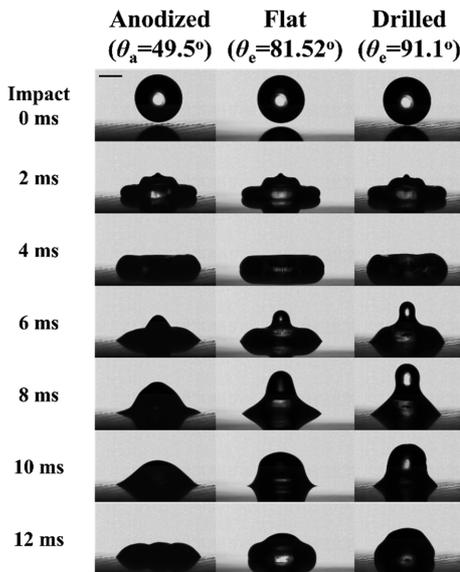


Fig. 7. Temporal evolution of droplets spreading and receding shape with respect to surface wettability

하게 된다. 이 경우, 액적 충돌로 인한 수격압(water-hammer pressure)과 같은 외력에 대한 반발력이 더욱 더 커지게 되어 유체가 더 침투하기가 어려워진다. 따라서 액적이 충돌하는 고체 표면의 형상을 설계하는 경우 유체 침투량과 내부 압력을 고려한 적정 깊이와 지름을 선택해야 한다.

Figure 7은 고체표면에 단일 액적이 충돌한 이후 시간에 따라서 퍼짐과 수축, 그리고 최종 평형 상태에 도달하기까지의 연속적인 사진을 같은 웨버 수(Weber num-

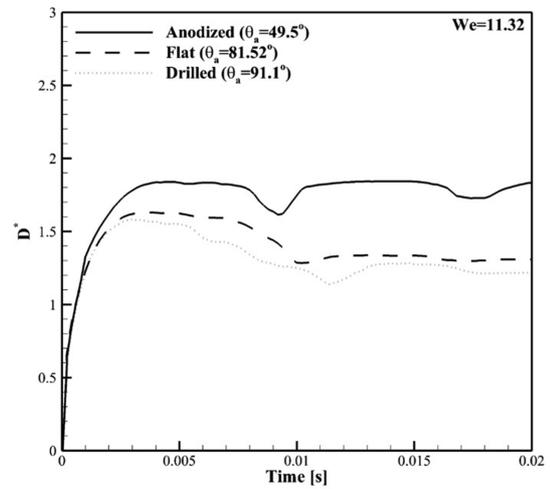


Fig. 8. Dimensionless spreading diameter for various surfaces

ber)에서 각 표면에 따라 나타낸 그래프이다. 고체 표면의 형태와 젖음성에 따라 액적 퍼짐과 수축 형상이 서로 다른 것을 알 수 있다.

Figure 8은 서로 다른 표면에서 충돌하는 액적의 접촉 지름을 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 여기서 접촉지름은 측정된 접촉지름을 충돌 당시 액적의 지름으로 나눈 무차원 값이다 ($D^*=D(t)/D_0$). 액적은 접촉각이 더 낮은 친수성 표면에서 퍼짐과 수축 직경 모두 큰 것을 알 수 있다. 또한 퍼짐과 수축 이후 다시 퍼짐 과정을 거치는 시간 또한 짧은 것을 알 수 있다. 따라서 친수성 텍스처 표면에서 충돌하는 액적은 최종 평형 상태의 직경이 커서 동적 젖음성 또한 우수한 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 알루미늄 시편을 소수성과 친수성 텍스처 표면으로 제작하여 단일 액적의 젖음성을 비교하였다. 그리고 텍스처된 표면 위에 단일 액적을 충돌시켜 동적 거동에 대해 분석하였으며 결론은 다음과 같다.

(1) 양극산화된 친수성 홀 텍스처 시편의 경우 나노미터 크기의 작은 홀 직경으로 인하여 모세관력이 커지게 된다. 따라서 유체가 홀 내부로 더 많이 침투하게 되며, 고체-액적간 접촉면적이 증가하게 되어 표면에너지가 증가하게 된다.

(2) 드릴링한 홀 텍스처 시편의 경우 큰 홀 직경으로

인하여 홀 내부에 유체가 침투하기 어려워 공기를 상대적으로 많이 가두게 된다. 따라서 젖음성이 감소하여 소수성을 띄게 되며 접촉면적이 감소한다.

(3) 같은 홀 면적비를 가지는 친수성 텍스처 시편, 소수성 텍스처 시편과 평판에 각각 단일 액적을 충돌시켰을 경우 접촉각이 낮은 친수성 텍스처 시편에서 같은 충돌속도임에도 불구하고 퍼짐 직경과 수축직경이 더 크게 나타났다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20132010500060) 그리고 해양수산부의 지원으로 수행된 “해양플랜트산업지원센터 구축 및 운영(PMS3010)” 과제의 연구결과 중 일부를 밝힙니다.

참고문헌

- (1) A. L. Yarin, “Drop Impact Dynamics: Splashing, Spreading, Receding, Bouncing”, Annual Reviews of Fluid Mechanics, Vol. 38, 2005, pp. 159-192.
- (2) C. G. L. Furnidge, “Studies at Phase Interfaces I. The Sliding of Liquid Drops on Solid Surfaces and a Theory for Spray Retention”, Journal of Colloid Science, Vol. 17, 1962, pp. 309-324.
- (3) H. Liu, 2000, “Science and Engineering of Droplets”, William Andrew.
- (4) E. B. Dussan V., “On The Spreading of Liquids on Solid Surfaces: Static and Dynamic Contact Lines”, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 11, 1979, pp. 371-400.
- (5) S. Chandra and C. T. Avedisian, “On the Collision of a Droplet with a Solid surface”, Proc. R. Soc. Lond. A, Vol. 432, 1991, pp. 13-41.
- (6) R. Rioboo, M. Voue, A. Vaillant and J. De Coninck, “Drop Impact on Porous Superhydrophobic Polymer Surfaces”, Langmuir, Vol. 24, 2008, pp. 14074-14077.
- (7) M. Pasandideh-Fard, R. Bhola, S. Chandra and J. Mostaghimi, “Deposition of Tin Droplets on a Steel Plate: Simulation and Experiments”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 41, 1998, pp. 2929-2945.
- (8) H. S. Park, J. Y. Zhu and J. F. Morris, “Single Drop Impaction on a Solid Surface”, AIChE Journal, Vol. 49, 2003, pp. 2461-2471.
- (9) I. Vakarelski, N. Patankar, J. Marston, D. Chan and S. Thoroddsen, “Stabilization of Leidenfrost vapour layer by textured superhydrophobic surfaces”, Nature, Vol. 489, 2012, pp. 274-277.
- (10) J. Lee and S. Lee, “Dynamic wetting and spreading characteristics of a liquid droplet impinging on hydrophobic textured surfaces”, Langmuir, Vol. 27, 2011, pp. 6565-6573.
- (11) C. Ran, G. Ding, W. Liu, Y. Deng and W. Hou, “Wetting on nanoporous alumina surfaces: transition between Wenzel and Cassie states controlled by surfaces structure”, Langmuir, Vol. 24, 2008, pp. 9952-9955.
- (12) J. Yang, J. Yang, C. Wang, X. He, Y. Le, J. Chen and F. Zhou, “Intermediate wetting states on nanoporous structures of anodic aluminum oxide structures”, Thin Solid Films, Vol. 562, 2014, pp. 353-360.