

이중으로 텍스처 된 표면에 충돌하는 액적의 동적 특성

문주현* · 이성혁*[†]

Dynamic Characteristics of Droplet Impinging on Multi-layer Texture Surfaces

Joo Hyun Moon and Seong Hyuk Lee

Key Words: Anodization(양극 산화법), Droplet(액적), Impinging(충돌), Hydrophilic(친수성), Hydrophobic(소수성)

Abstract

This study presents the dynamic characteristics of an impinging droplet on hydrophobic and hydrophilic surfaces with various texture area fractions. The flat surface was fabricated by using the drilling technique to make micro-meter hole-patterned surfaces, which shows hydrophobic textured surfaces. Moreover, the hydrophilic textured surfaces were manufactured by anodizing technique on the micro-meter hole-patterned surfaces to generate multi-layer surfaces. Impinging droplet experiments were conducted for various hole-patterned surfaces, with changing impact velocity and texture area fractions. It is observed that an anodizing technique increases wettability by decrease in hole diameter on the textured surfaces. However, micro-drilled surfaces decreases wettability because the hole diameter was so large that air can be trapped under the holes. In addition, the maximum spreading diameter decreases with the texture area fraction for the micro-drilled surfaces because of decrease in wettability.

기호설명

- $D(t)$ 시간에 따른 접촉 지름, m
 D_0 초기 액적 직경, m
 D^* 무 차원 접촉 지름, -
 v_0 충돌 속도, m/s
 θ_c 캐시 상태에서의 평형 접촉각, °
 θ_e 접촉각, °
 θ_w 벤젤 상태에서의 평형 접촉각, °
 ρ 밀도, kg/m³
 σ_{LV} 표면장력(액체-기체), N/m

1. 서 론

고체표면에 충돌하는 단일 액적의 퍼짐과 수축에 대한 연구는 스프레이(Spray) 및 제트(Jet) 분야에 적용할 수 있는 중요한 연구주제 중 하나이다. 따라서 많은 연구자들은 열 및 물질전달 효율 향상을 위하여 단일 액적 충돌에 대한 연구를 진행하고 있다. 연구 결과들은 엔진분사(Engine injection), 쿼칭(Quenching), 열교환기(Heat-exchanger) 및 응축기(Condenser)와 같은 다양한 액체미립화 산업분야에 적용되고 있다⁽¹⁻¹⁰⁾. 충돌하는 액적과 고체 벽면의 온도가 서로 유사하고, 충돌 속도가 작은 액적은 퍼짐과 수축과정을 반복적으로 거친 이후 평형 상태에 도달한다. 특히 액적의 퍼짐과 수축 특성은 유체물성, 충돌조건, 젖음성(Wettability)에 의한 영향을 많이 받는다⁽¹⁻⁴⁾. 특히 액적과 고체 표면간의 열전달을 증가시키기 위해서는 표면의 물리적, 화학적 특성을 변경하여 충돌하는 단일 액적과 고체간 접촉 면적을 극대

(Received: 29 Feb 2016, Received in revised form: 14 March 2016, Accepted: 15 March 2016)

*중앙대학교 일반대학원 기계공학과

[†]책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학과

E-mail : shlee89@cau.ac.kr

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

화 해야 한다⁽¹⁾. 기존 많은 연구자들이 유체 물성, 충돌 조건을 변화시켜 많은 연구를 진행해 왔으나, 현재까지도 젖음성에 대한 연구가 많이 부족하며, 특히 기둥 형상(Pillar-patterned)에 대한 연구에 국한되어 있다. 하지만 기둥 형상은 외부 충격에 의한 집중응력이 상대적으로 크기 때문에 다양한 액체미립화 산업 분야에 적용하기 어려운 단점이 있다. 하지만 홀 패턴(Hole-patterned)의 형상으로 표면을 제작할 경우, 내구성이 우수하며 공정이 간단하다⁽¹⁾. 따라서 산업체에서 널리 적용할 수 있는 금속 표면을 다양한 홀 패턴으로 가공하여 젖음성을 조절할 수 있는 연구가 필요하며, 또한 단일 액적 충돌에 대한 연구가 뒷받침 되어야 한다⁽¹⁾.

본 연구의 목적은 다양한 소수성과 친수성을 가지는 다양한 형상의 홀 패턴 텍스처 표면을 제작하는 것이다. 본 연구에서는 홀 표면을 제작할 수 있는 드릴링 및 양극 산화법(Anodic Aluminum Oxide technique, AAO)을 적용하여 다양한 형상과 젖음성을 가지는 홀 텍스처 표면을 제작하였다. 특히 다양한 텍스처 표면에서 충돌하는 단일 액적의 퍼짐과 수축 특성을 초고속 카메라를 통하여 가시화 후, 비교 분석하였다.

2. 실험

텍스처 표면을 제작하기 위한 금속 시편은 알루미늄 시편을 연마하여 평균 조도를 0.06 μm 미만으로 조절하였다. 소수성 금속 표면을 제작하기 위하여 드릴링 장비(EGX-350, Roland)에 연결된 직경 0.3 mm의 미세드릴을 이용하여 표면을 제작하였다. 정방향으로 생성된 드릴링 홀 면적비는 단위 면적당 투영된 홀 면적으로(ϕ_0)로 정의되며, 본 실험에서는 홀 텍스처 표면의 면적비를 0.148, 0.296, 그리고 0.439로 각각 설정하였다.

또한 소수성 표면 텍스처 표면을 친수성으로 만들기 위해서 양극 산화법(Anodization technique)을 사용하였다. 먼저 내부를 25°C로 유지할 수 있는 이중비커에 옥살산을 담아 온도를 유지시킨다. 이후, 옥살산에 텍스처 표면을 양극에 연결하고, 음극에는 동일한 크기의 알루미늄 시편을 연결하여, 90 V 전압을 1시간동안 인가한다. 산화된 알루미늄 시편은 꺼내 오븐에 30°C로 24시간 건조시켜 이중으로 텍스처 된 친수성 표면을 제작하였다. 텍스처 표면의 형상은 기존 연구⁽¹⁾에서 제작된 표면의 촬영된 표면의 형상과 동일하다. Fig. 1은 액적 충돌 실험을 위한 실험 장치 구성도이다. 실험장치는 가시

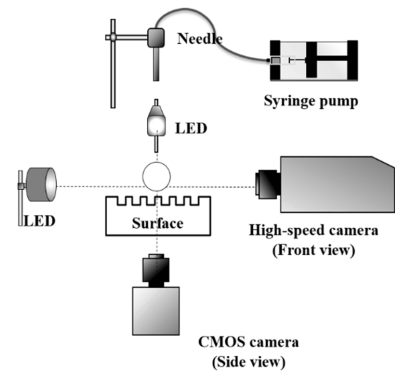


Fig. 1 Experimental set-up

화 장치와 액적 생성 장치로 구분할 수 있다. 액적이 충돌하는 정면에는 텔레센트릭 렌즈(TEC-M55, Computar)가 연결된 초고속카메라(HG-LE, Redlake)를 장착하여 5000 fps로 이미지를 획득하였다. 측면에는 최종 평형상태의 좌우대칭여부를 확인하기 위하여 CMOS 카메라(MI-300, Artlay)와 텔레센트릭 렌즈(TML-HP, Edmund optics)를 이용하여 가시화 하였다. 5 μs 의 짧은 노출시간으로 촬영하기 위하여 광원은 5 W LED 램프를 설치하였다. 액적의 퍼짐과 수축과정을 측정하기 위한 초고속 카메라의 해상도는 640256 pixel^2 이며, 이미지 분석 프로그램은 ImageJ를 사용하였다. 이미지 분석은 8비트 이미지의 Threshold를 170으로 설정하여 Binary 이미지로 획득하고, 이후 검은색으로 표시되는 부분의 최대와 최소 픽셀의 좌표를 읽어 직경을 측정하였다.

다양한 충돌속도를 가진 액적 생성을 위하여 수직방향으로 높이를 변경할 수 있는 스테이지를 이용하여 높이를 조절하였다. 33-게이지 바늘(90310, Hamilton)에 연결된 주사기 펌프(LSP01-2A, Longerpump)로 탈이온수 4.4 μL 를 가장 느린 속도로 주입하여 액적을 생성하고, 자유낙하 이후 충돌하도록 설계하였다. 충돌속도는 0.64 m/s로 설정하였으며, 초기 액적의 직경은 2.0 mm 이고, 계산된 웨버 수(Weber number = $\rho D_0 v_0^2 / \sigma_{LV}$)는 11.3 이다.

3. 결과 및 고찰

Figure 2는 평판과 드릴링 텍스처 표면, 그리고 평판과 드릴링 표면에서 각각 양극 산화를 한 이중 텍스처 표면의 접촉각을 각각 나타낸 사진이다.

평판에서 드릴링된 텍스처 표면은 소수성을 나타내며,

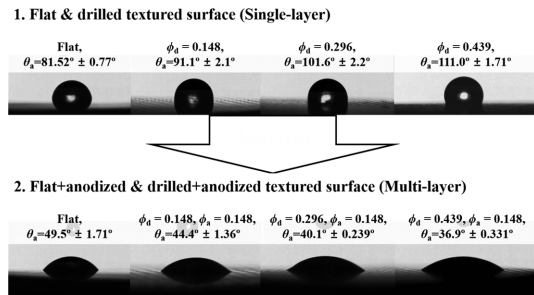


Fig. 2 Hole-patterned textured surfaces with respect to various texture area fractions

드릴링 홀 면적비가 증가할수록 젖음성이 감소하는 경향으로 나타난다. 반면, 평판에 양극 산화를 한 이중 텍스처 표면은 접촉각이 감소하여 젖음성이 높은 것으로 나타났으며, 드릴링 면적비가 증가할 수록 더욱 감소하는 경향으로 나타났다.

드릴링 표면의 경우 액적의 접촉각이 증가하는 이유는 홀 내부의 공기를 가두고 있기 때문이다⁽¹⁾. 상대적으로 큰 홀 크기로 인하여 유체가 공기에 의하여 안쪽으로 침투하지 못하고 홀 위쪽으로 부양된 상태로 있기 때문이다. 홀이 큰 직경의 모세관력은 상대적으로 작기 때문에 유체가 내부로 침투하며 발생하는 공기의 압축효과로 인한 홀 내부의 반발력보다 작아 유체가 더 이상 내부로 침투할 수 없기 때문에 결과적으로는 표면의 에너지가 작다⁽¹⁾. 따라서 마이크로 홀 크기를 가지는 드릴링의 면적비가 증가할 수록 더 많은 공기를 가두게 되며, 최종적으로는 접촉각이 점차 증가하는 경향으로 나타난다⁽¹⁾.

텍스처링된 홀 아래쪽에 유체가 침투하지 못하고 공기가 가두어진 경우, 액적이 표면 위에 떠있는 캐시 상태(Cassie-state)로 정의할 수 있다. 깁스가 제한한 표면 에너지 방정식(Gibbs-Free energy equation)에 따르면 액적의 접촉각은 식 (1)과 같은 캐시식(Cassie-equation)을 따르게 된다⁽¹⁾.

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

여기서 θ_{CB} 는 캐시 상태의 접촉각이다. 반면 액적이 홀 내부로 완전히 침투하게 되어 벤젤 상태(Wenzel-state)에 도달하면 고체-유체간 표면에너지가 크게 증가하여 최종적으로 식 (2)와 같은 벤젤 방정식(Wenzel-equation)을 따른다⁽¹⁾.

$$\cos \theta_W = r \cos \theta_{eq} \quad (2)$$

여기서 θ_W 는 텍스처 표면의 평형 접촉각이고, r 는 조도

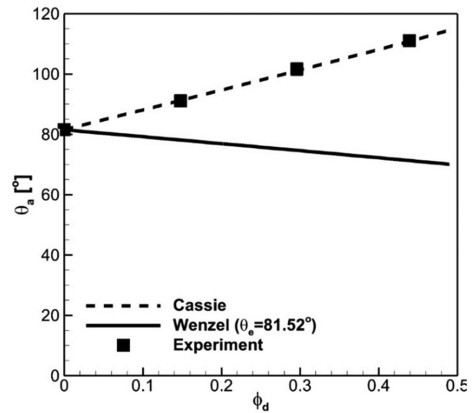


Fig. 3. Apparent contact angle estimation with respect to texture area fraction of drilled hole textured surfaces

변수(roughness factor)로서 홀 깊이, 지름, 그리고 간격에 주요한 영향을 받는다⁽¹⁾.

Figure 3은 평판과 드릴링한 홀 텍스처 표면에서의 측정된 접촉각을 캐시와 벤젤 식으로 각각 비교한 그래프이다. 평판에 드릴링한 표면에서는 상대적으로 큰 홀 크기로 인하여 공기를 더 많이 가두게 되는 것을 알 수 있다⁽¹⁾. 따라서 드릴링 표면에서 홀 갯수가 증가할 수록 캐시 상태를 유지하며 젖음성을 크게 떨어뜨리게 된다. 따라서 마이크로 단위의 홀 텍스처 표면을 제작하게 될 경우 젖음성이 크게 감소한다⁽¹⁾. 기존 연구⁽¹⁾에서 이미 지 분석 결과 금속 표면에 양극 산화를 진행하는 경우 평균직경이 57.27 nm, 면적비는 0.148의 작은 홀들의 군집을 형성하게 된다. 나노단위의 홀이 생성되면, 모세관력이 공기의 반발력보다 크게 증가하여 홀 내부로 유체가 침투하게 된다. 따라서 유체 침투량이 증가할 수록, 유체-고체간 표면에너지가 상승하여 젖음성이 크게 향상된다. 드릴링으로 형성된 마이크로 단위의 홀 내부에 새로운 나노 단위의 홀 표면을 형성하게 되면 드릴링 홀 내부로 유체가 강제적으로 침투할 수 있다. 따라서 양극 산화된 마이크로 홀의 개수가 많아질 수록 유체가 홀 내부로 더 많이 침투하게 되고, 표면에너지가 더욱 증가하여 젖음성이 크게 나타난 것으로 사료된다.

Figure 4는 평판과 텍스처 표면에 각각 양극 산화를 진행했을 때 측정된 접촉각과 캐시 및 벤젤 식을 비교한 그래프이다. 줄어든 평판의 접촉각을 기준으로 캐시와 벤젤 식을 예측한 결과 캐시와 벤젤 식을 모두 따르지 않는 중간 상태(Intermediate state)에 위치한 것을 알 수 있다. 기존 연구⁽¹⁾에 따르면 평판에 양극 산화로 제

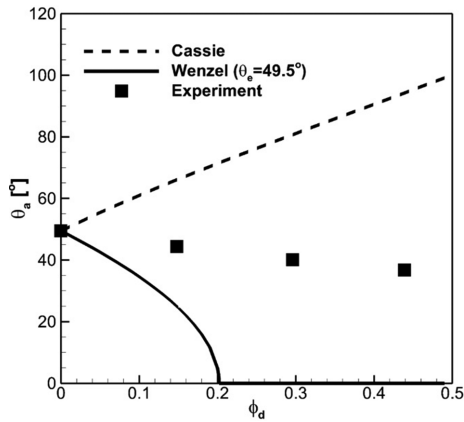


Fig. 4. Apparent contact angle estimation with respect to texture area fraction of anodized hole textured surfaces.

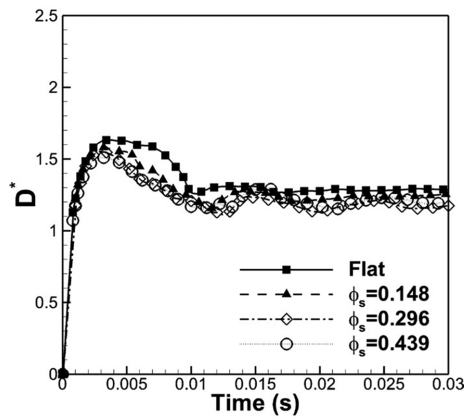


Fig. 6. Spreading and receding diameters on flat and textured surfaces (Single-layer) at $We = 11.3$

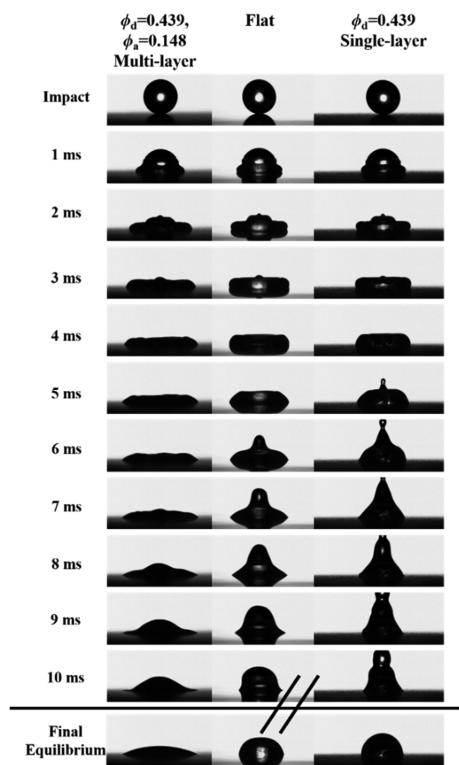


Fig. 5. Temporal evolution of spreading and receding droplets for different texture surfaces

작한 나노홀 패턴 텍스처 표면에서, 홀 지름이 57.27 nm, 면적비가 0.148인 홀 침투 비율은 88% 이므로 완벽한 벤젤 상태가 될 수 없다. 또한 마이크로 홀 크기에서 홀의 깊이 및 원주 방향에 생성된 홀의 방향이 서로 다르

기 때문에 양극 산화된 이중 홀 텍스처 표면은 중간 상태로 나타난 것으로 사료된다.

Figure 5는 다양한 텍스처 표면에 단일 액적이 충돌한 이후 퍼짐과 수축을 시간에 따라 표시한 그래프이다. 평판과는 달리 텍스처 표면은 홀 표면에서의 빛의 간섭으로 인하여 표면이 상대적으로 어둡게 나타나는 것을 알 수 있다. 액적이 고체표면에 충돌한 이후 빠른 시간에 퍼짐과 수축 과정을 거치고 최종적으로는 평형 상태에 도달하는 것을 알 수 있다. 따라서 텍스처 표면의 형태와 젖음성에 따라 퍼짐과 수축 형상은 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다.

Figure 6은 평판과 드릴링 홀 텍스처 표면에서 충돌하는 액적의 퍼짐과 수축 지름을 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 퍼짐과 수축 직경은 초기 액적의 직경을 나누어 무차원화했다 ($D^* = D(t)/D_0$). Fig. 6에서 알 수 있듯이, 액적은 충돌 후 퍼짐 과정을 거쳐 최대 퍼짐에 도달하며, 이후 추가적인 수축과 퍼짐 과정을 거쳐 최종 평형상태에 도달한다⁽¹⁾. 그래프에서도 알 수 있듯이 에너지 손실로 인하여 최대 퍼짐 직경과 다음 퍼짐 직경은 큰 차이를 보이며, 0.03초 이후에는 직경의 변화가 크지 않다. 같은 웨버 수임에도 불구하고 최대 퍼짐 직경이 평판에서 가장 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 접촉각 측정 결과를 나타낸 Fig. 3과 유사하게 접촉각이 높은 표면에서 퍼짐과 수축 직경이 모두 낮게 나오며, 드릴링으로 인한 표면에너지 감소가 액적의 퍼짐과 수축 과정에도 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서 면적비가 증가할 수록 액적의 퍼짐과 수축 직경이 감소하는 경향으로 나타났다. 또한 드릴링으로 텍스처된 표면에서는

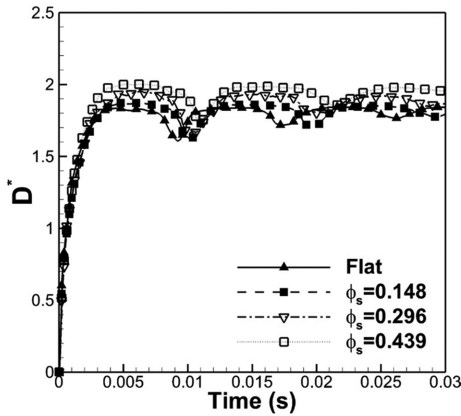


Fig. 7. Spreading and receding diameters on flat and textured surfaces(Multi-layer) at $We = 11.3$

퍼짐과 수축 이후 다시 퍼짐 과정을 거치는 시간이 짧은 것을 알 수 있다.

Figure 7은 이중으로 텍스처된 양극 산화 표면에 충돌하는 액적의 퍼짐과 수축 특성을 나타낸 그래프이다. 양극 산화를 한 표면에서는 최대 퍼짐 이후 수축직경이 크고, 그 감소량이 상대적으로 작다. 양극 산화를 한 표면은 퍼짐당시 홀 내부에 유체를 침투시키기 때문에 순간적인 표면에너지가 증가하고, 액적이 홀 내부로 고착되어 수축이 큰 폭으로 이루어 지지 않는 것으로 사료된다⁽¹⁾. 따라서 평판과 드릴링 한 표면들에 양극 산화를 할 경우 퍼짐과 수축 직경은 유사한 경향을 나타내는 것을 확인했다. 하지만 면적비가 0.439일 경우 평판에 양극 산화를 한 표면 보다는 최대 퍼짐 직경이 다소 높게 나오는 것을 확인했다. 드릴링 표면에 양극 산화를 한 이중 텍스처 표면에서는 강제적으로 홀 내부로 유체가 젖음으로써 표면에너지가 더욱 향상되었기 때문이다. 따라서 이중으로 텍스처 된 친수성 표면에서 충돌하는 액적은 최종 평형 상태의 직경 또한 크기 때문에, 동적 젖음성이 우수한 것으로 나타났다. 양극 산화를 한 평판과 드릴링 홀 표면들에서는 퍼짐과 수축 직경이 크며, 최종평형직경 또한 큰 것으로 나타났다. 따라서 표면의 젖음성을 극대화하기 위해서는 다양한 형태의 이중 텍스처 표면을 활용하는 것이 필수적이다.

4. 결 론

본 연구는 알루미늄 시편을 다양한 면적비를 가지는

소수성 드릴링 홀 텍스처 표면과 친수성 이중 홀 텍스처 표면으로 각각 제작하여 단일 액적의 충돌 후 퍼짐과 수축 특성을 비교하였다.

1) 드릴링한 홀 텍스처 시편의 경우 큰 홀 직경으로 인하여 홀 내부에 유체가 침투하기 어려워 상대적으로 많은 공기를 가두게 된다. 따라서 표면에너지가 감소하여 접촉각이 증가한다. 하지만 드릴링 홀 표면들에 양극 산화법을 적용한 경우, 나노미터 크기의 작은 홀 직경으로 인하여 모세관력이 증가하여 유체-고체간 표면에너지가 증가하게 되어 젖음성이 향상되었다.

2) 같은 마이크로 홀 면적비를 가지는 친수성 이중 표면과, 소수성 단층 표면에 단일 액적을 충돌시켰을 경우 젖음성이 우수한 친수성 텍스처 시편에서 퍼짐 직경이 더욱 커졌으며, 양극 산화된 이중 표면에서는 동적 젖음성 또한 크게 증가한 것으로 나타났다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2014R1A2A2A01006186).

참고문헌

- (1) 문주현, 이상민, 정정열, 이성혁, “홀 패턴 텍스처 표면에서 충돌하는 단일 액적의 젖음 특성”, 한국액체미립화학회지, Vol. 20, No. 3, 2015, pp. 181-186.
- (2) 김으뜸, 박인한, 배녹호, 강보선, “고온벽과 충돌하는 나노유체 액적 거동에 관한 연구”, 한국액체미립화학회지, Vol. 20, No. 1, 2015, pp. 7-13.
- (3) 김대윤, 정정열, 이성혁, “비등점의 가열 표면에서 나노유체 액적의 증발 특성”, 한국액체미립화학회지, Vol. 20, No. 4, 2015, pp. 236-240.
- (4) 김영찬, “가열 표면에서 액적의 증발열전달에 관한 실험적 연구”, 한국액체미립화학회지, Vol. 19, No. 1, 2014, pp. 15-18.
- (5) 성기수, 이진욱, 김진수, 정석철, “커먼레일 시스템용 구동방식에 따른 인젝터 별 바이오디젤 분무 특성 연구”, 한국액체미립화학회지, Vol. 20, No. 2, 2014, pp. 88-94.
- (6) 손 민, 유기정, 김정수, 구자예, 권오재, “액체로켓 핀틀 인젝터의 분사조건이 미립화 성능에 미치는 영향”,

- 한국액체미립화학회지, Vol. 20, No. 2, pp. 114-120.
- (7) 박구정, 윤영빈, 이정호, 이인규, “분무 조건에 따른 기체 중심 스월 동축형 분사기의 분무 특성”, 한국액체미립화학회지, Vol. 19, No. 4, pp. 167-173.
- (8) 서현규, “Methanol 연료 액적의 연소 특성에 관한 연구”, 한국액체미립화학회지, Vol. 19, No. 3, pp. 109-114.
- (9) 강보선, 이신표, “물과 알루미늄 나노유체 분무의 분무냉각특성 비교”, 한국액체미립화학회지, Vol. 19, No. 2, pp. 88-93.
- (10) 강보선, 이신표, “물과 나노유체의 분무 특성 비교”, 한국액체미립화학회지, Vol. 19, No. 2, pp. 82-87.