

극친수/극소수 표면에서 탄산용액의 기포 발생 촉진/억제 효과 분석 연구

이정원*.#

*조선대학교 기계공학과

Effect of Promoting/Inhibiting Bubble Generation of Carbonate Solution on Superhydrophilic/Superhydrophobic Surfaces

Jeong-Won Lee*.#

*Department of Mechanical Engineering, Chosun University

(Received 01 April 2022; received in revised form 24 May 2022; accepted 22 June 2022)

ABSTRACT

When carbon dioxide in a liquid becomes supersaturated, carbon dioxide gas bubbles are generated in the liquid, and they ascend to the surface as they develop further. At this time, the inner wall of the cup with carbon gas attached is known as the entrapped gas cavity (EGS); once an EGS is established, it does not disappear and will continuously create carbon bubbles. This bubbling phenomenon can be activated or suppressed by changing the properties of the solid surface in contact with the carbonated liquid. In this study, the foaming of carbonated liquid is promoted or suppressed by modifying the wettability of the surface. A micro/nano surface structure is formed on the surface of an aluminum cup to produce a superhydrophilic surface, and a superhydrophobic surface similar to a lotus leaf is synthesized via fluorination. Experiment results show that the amount of carbon dioxide bubble generated differs significantly in the first few seconds depending on the surface, and that the amount of gas generated after it enters the stabilization period is the same regardless of the wettability of the cup surface.

Keywords : Carbonated Liquid(탄산용액), Bubble Nucleation(기포핵형성), Superhydrophobic Surface(극소수성 표면), Superhydrophilic Surface(극친수성 표면), Entrapped Gas Cavity(갇힌기공)

1. 서 론

이산화 탄소가 액체의 포화 용해량 이상 녹아서 과포화 상태가 되면 기체가 되어 표면으로 방출되는데 이것이 잘 알려진 탄산음료의 기포 발생 원리가 된다. 따라서 기본적으로 탄산음료가 컵에

담겨있을 때 기포가 발생하는 정도는 액체에 들어있는 이산화 탄소의 농도와 직접적인 연관이 있다. 지난 수십 년간 이산화 탄소 농도가 과포화 상태인 액체에서 거품이 발생하고 성장하는 원리에 관해서 많은 연구가 이루어져 왔다^[1-3]. 2000년대 초반에는 Diet Coke and Mentos reaction 에피소드를 통해 탄산음료의 탄산 농도와 관계없이 거품 발생량을 폭발적으로 증가시킨 사례가 나오면서 주목을 받았다. T. Coffey는 탄산 액체와 맞

Corresponding Author : jwlee07@chosun.ac.kr

Tel: +82-62-230-7058, Fax: +82-62-608-5233

닿는 표면의 성질을 화학적, 물리적으로 분석하여 폭발적인 거품 발생에 대해 설명하였다^[3]. 본 논문에서 탄산 농도를 제외하고 탄산 용액 내에서 기포의 발생에 관여하는 요소를 정리하면 표면의 젖음성과 기포 핵 형성 사이트(nucleation sites)의 개수로 압축된다. Mentos 표면 성분이 친수성을 띄었던 것과 표면의 작은 미세 돌기가 nucleation sites의 개수를 극대화한 것이 폭발적 거품 발생의 원인이었던 것이다.

그렇다면 반대로 표면을 소수성으로 만들고 nucleation site를 없앤다면 무슨 일이 일어날 것인가? 표면을 극소수성으로 만들면 이론적으로 탄산 기포가 형성되는 조건에 반하는 조건을 조성할 수 있다. 극소수성 표면은 물에 대해 강력한 반발성을 가지는 것이 특징으로 각종 재료에 극소수성을 부여하기 위한 연구가 다수 보고되었다^[4-6]. 물속에서 극소수성 표면은 공기층을 머금은 현상으로 잘 알려져 있고 이를 이용하여 공기를 포집하거나 유체 마찰 저항 감소 등의 응용연구가 이루어지고 있다^[7-9]. 하지만 지금까지 탄산 용액 내에서 기포 형성을 획기적으로 억제한 사례는 보고된 바 없다. 본 연구에서는 마이크로/나노 표면구조를 가진 극소수성 컵을 제작하고 탄산 액체 접촉을 통해 기포를 획기적으로 억제하였다. 또한, 일반 표면 컵과 극친수성 표면 컵을 제작하여 기포 발생량의 극적인 변화를 관찰하고 비교하였다. 본 연구는 액체와 고체 사이의 공기층을 다룸으로써 피부조직 배양 연구 분야에 중요한 가이드를 제시해 줄 수 있다^[10-12].

2. 재료 및 방법

2.1 표면 젖음성 개질 및 측정

표면 젖음성 개질이 적용되는 컵으로는 산업용 알루미늄 소재의 직경 6cm 반구 형태가 쓰였으며, 염산(HCl), 수산화나트륨(NaOH), n-헥산(n-hexane) 용액은 시약전문업체(삼전화학, 대한민국)로부터 구매하였다. 소수성 코팅제 PFOTS(1H, 1H, 2H, 2H-Perfluorodecyltrichlorocilane)는 Alfa Aesar제를 이용하였다. 원활한 표면 젖음성 개질 공정 적용을 위해 모든 알루미늄 컵의 표면은 에탄올에 초

음과 세척되고 초순수로 씻은 뒤 건조되었다. 사전 세척된 알루미늄 표면은 1몰농도의 NaOH 수용액에서 1분간 침지 및 초순수에 세척된 이후 바로 3 몰농도의 HCl 수용액에 5분간 식각 후 다시 초순수로 세척되었다. 다음으로 알루미늄 컵을 90°C 온도의 초순수에 5분간 침지하여 산화 공정을 거친 후 60°C 건조오븐에 20분 이상 건조하였다. 식각 및 산화가 완료된 표면에 소수성 성질을 부여하기 위하여 완전히 건조된 상태의 알루미늄 컵을 n-hexane과 PFOTS의 1000:1 혼합액에 10분간 침지한 뒤 60°C 건조 오븐에 20분 이상 건조하였다. 젖음성 개질 공정이 완료된 표면은 고분해능 주사전자현미경(FE-SEM, high-resolution field-emission electron microscopy, HITACHI)을 이용하여 면밀히 관찰되고 분석되었다. 표면의 젖음성 변화를 객관화시키기 위하여 접촉각 측정기(Smart Drop, FemtoFAB)를 이용하여 각 표면에 대해 다섯 군데씩 젖음성 측정을 하고 평균 내었다. 물방울의 사이즈는 마이크로 피펫을 이용하여 5 μ l 로 제어된 탈이온수(DI water, Deionized water)를 이용하였다.

2.2 기포발생량 측정

미세 스케일 저울을 준비하여 제작된 베어, 극친수성, 극소수성 알루미늄 컵의 무게를 측정하고 가득 액체를 담았을 때의 무게를 확인하여 만수시 액체만의 무게를 측정하였다. 이후 각 알루미늄 컵에 만수일 때와 같은 무게의 4°C 탄산 액체를 부어서 액체와 컵 표면이 맞닿은 시점부터 정해진 무게만큼 액체가 부어진 이후까지 비디오를 촬영하여 거품의 발생 양상을 관찰하였다. 또한, 각 알루미늄 컵에 부어진 탄산 액체에서 기체가 발생한 양을 측정하였다. 경향성 파악의 정확도를 높이기 위해 5회씩 반복 측정되었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 탄산수의 기포 발생 원리

이산화 탄소가 녹아있는 물이 들어있는 컵에서 기포가 형성되는 것은 물속에 이산화 탄소가 과포화 상태로 존재하기 때문이다. 이렇게 탄산이 과

포화 상태일 때 액체 속에서 이산화 탄소 기포가 형성되어 올라오는 효과를 볼 수 있다. 일반적으로 이 기포 핵이 처음 형성되면 그것을 씨앗으로 물속에 녹아있는 이산화 탄소가 스며들면서 기포가 성장하게 된다. 이후 점점 커진 기포는 부력에 의해서 물 위로 상승하는 힘을 받게 된다(Fig. 1).

이론상 이산화 탄소의 기포핵 형성은 액체 내 어디에서나 발생이 가능하지만 일반적으로 표면에서 기포의 성장이 관찰되는 것을 알 수 있다. 이는 최초 탄산수가 고체 표면과 만날 때 액체와 고체의 계면 사이에 갇힌 기공(entrapped gas cavity, EGC)을 갖기 쉽기 때문이다. 고체와 액체 사이 계면에서 EGC가 형성되면 Fig. 1(a)와 같이 동일한 기공 위치에서 연속해서 기포가 생성되는 것이다^[13]. 탄산수가 들어있는 컵의 표면에서 기포 핵

이 생성되는 최소한의 일 (W)은 다음과 같이 표현될 수 있다^[3,14].

$$W = \frac{16\pi\gamma_{LV}^3}{(P-P_0)}f(\theta) \quad (1)$$

$$f(\theta) = \frac{(1-\cos\theta)^2(2+\cos\theta)}{4} \quad (2)$$

γ_{LV} 는 액체-기체 간의 표면장력, $P-P_0$ 는 계면에서의 압력 차, 그리고 θ 는 액체와 고체 사이의 접촉각을 의미한다. 따라서 θ 가 작을수록 기포의 형성이 쉬워진다. 이는 컵의 표면이 친수성일수록 기포 핵생성이 쉽게 일어난다는 뜻이 된다.

고체 표면에서 기포가 성장하면서 점점 강한 부력을 받게 되는데 이때 기포가 받는 힘을 표현한 그림이 Fig. 1(b)에 표현되어 있다. 기포가 특정 크기가 되어 부력의 힘(F_b)이 증가하다가 기포가 표면에 고정되어있으려 하는 힘($F_\sigma \sin\theta'$)을 넘어서는 순간 분리가 일어난다. 이는 다음과 같이 식으로 표현될 수 있다^[13].

$$F_b = \frac{4}{3}\pi\Delta\rho gr_0^3 = p\sigma \sin\theta' \quad (3)$$

$\Delta\rho$ 는 기체와 액체 간의 밀도 차이이며, g 는 중력가속도, r_0 는 기포가 표면으로부터 탈락하는 순간의 직경, p 는 기포가 접촉하는 테두리의 길이, σ 는 기포의 동적 표면장력, 그리고 θ' 은 기체-액체 계면과 고체 표면 간의 접촉각이다. 기포 접촉면의 둘레 길이에서 작용하는 표면을 붙잡는 힘을 F_σ 라 한다($F_\sigma = p\sigma$). 이 식에서 독립변수는 p 로, EGC가 작아서 p 가 작아지면 떠오르는 임계 방울의 크기가 작아지고 발생 빈도가 높아지게 된다. T. Coffey는 'The Diet Coke and Mentos reaction' 실험을 통해 표면에 따른 기포 발생 정도를 비교하였으며 이는 식(1-3)을 입증한 것과 같다. Mentos 표면에 코팅된 아라비아검(gum Arabic)에 의한 표면 친수화는 기포가 발생하는데 필요한 일을 낮춰주었고, 표면의 미세 구조는 EGC의 둘레 길이를 작게 만들어 기포 발생 속도를 높였다. 결국, Diet Coke에 들어간 Mentos 표면에서의 기포 발생 효과는 거품의 폭발로 이어진 것이다.

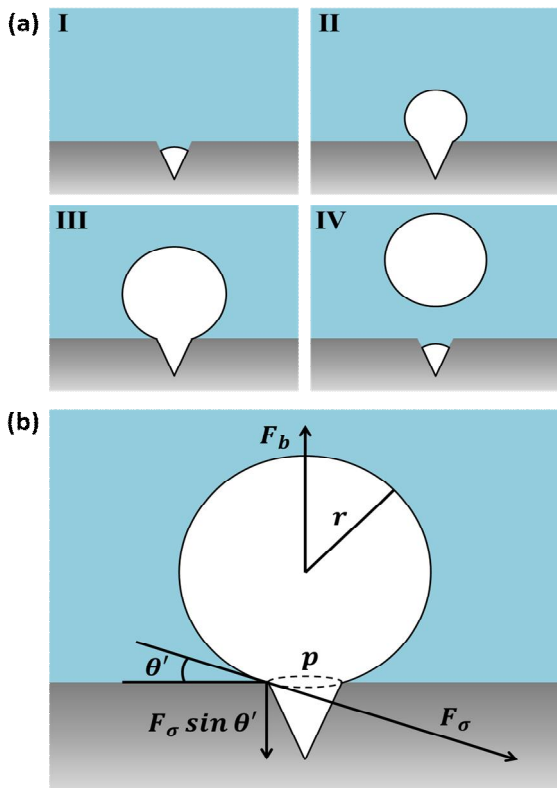


Fig. 1 (a) Bubble generation process at the entrapped gas cavity (EGC) (b) Dimensions of bubble at the EGC

3.2 극친수/극소수성 표면

이처럼 동일한 이산화탄소 농도의 물이라 할지라도 표면의 젖음성, 표면구조에 따라 거품의 발생량은 극도로 달라질 수 있다. 따라서 극적인 탄산수의 거품 발생 반응을 관찰하기 위해서 극친수성, 극소수성 성질을 갖는 컵을 각각 제조하였다 (Fig. 2).

HCl 용액에서의 식각은 알루미늄판에 입방체와 같은 마이크로구조를 형성하는 역할을 하고, 끓는 온도에서의 초순수 산화는 플레이크 형태의 나노구조를 형성한다. 따라서 이러한 모든 공정을 거친 알루미늄판의 표면은 계층적 마이크로/나노 구조가 형성된다(Fig. 2(a)). PFOTS를 이용한 자가결합 단분자층(SAM, Self-assembled monolayer) 형성 코팅은 표면구조에 변화를 주지 않으면서 젖음성을 극친수성에서 극소수성으로 변환시킬 수 있다. 극친수성과 극소수성 성질의 발현은 각각 Wenzel과 Cassie-Baxter 이론으로 잘 알려져 있다. 친수성과 소수성 젖음성질은 표면 거칠기가 형성되면 급격히 정도가 증가하게 된다^[15,16]. Fig. 2(b)는 알루미늄의 표면이 개질된 결과 얻게 되는 젖음성 변화를 나타낸다. 5번 측정으로부터 구한 평균 접촉각은 극친수성 표면에서는 10° 미만으로 측정범위를 벗어나 정확한 측정이 불가하였으며 극소수성 표면에서는 168.9±3.8°를 나타냈다.

3.3 표면에 의한 기포 축진 및 억제 효과

Fig. 3은 각 표면 성질이 다른 컵에 탄산수를 부었을 때 표면에서의 기포 형성을 도식화한 것이다. 미처리 표면에서는 잘 알려진 대로 크고 작은 기포가 산발적으로 형성되고 뭉쳐지며 수면 위로 떠 오른다(Fig. 3(a)). 극친수성을 갖는 마이크로나노 구조 표면은 나노 스케일의 EGC를 무수히 많이 보유하게 되며 수많은 작은 기포를 빠르게 형성 및 분리 시킨다(Fig. 3(b)). 더욱이 산화된 표면 Al(OH)₃가 갖는 친수 성질에 의해 이 반응은 더 격렬하게 일어날 수 있다. 반면에, Fig. 3(c)과 같이 마이크로나노 구조 표면이 극소수성을 띠게 되면 구조가 액체를 떠받드는 현상이 일어나 표면과 액체 사이에 얇은 공기층이 형성된다. 언뜻 보면 EGC가 크게 형성될 것으로 보일 수 있지만,

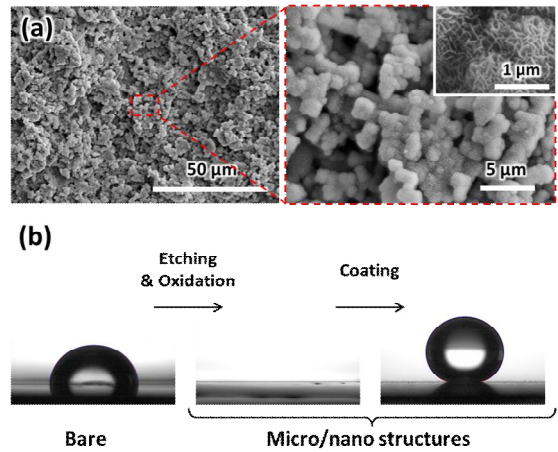


Fig. 2 (a) SEM images of micro/nano structure formed on the aluminum surface (b) Wettability transition of surface

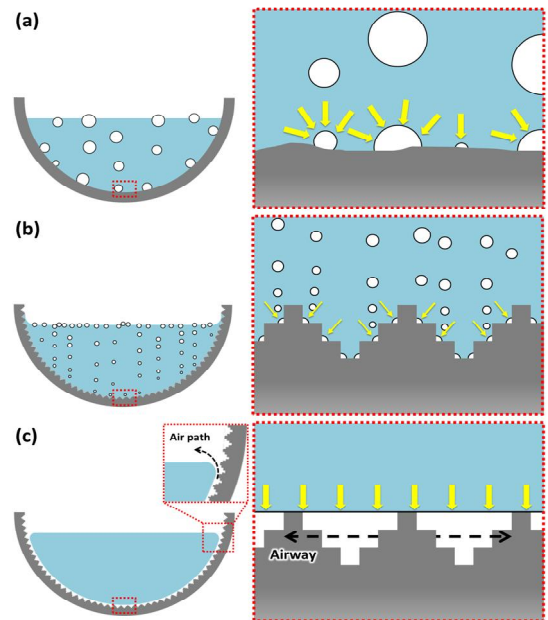


Fig. 3 Bubbles generated at EGCs on (a) bare, (b) superhydrophilic and (c) superhydrophobic surface

해당 공기층은 액체가 공기와 맞닿는 표면까지 이어지기 때문에 결국 EGC가 아예 형성되지 않는

것으로 볼 수 있다. 즉, 액체와 컵의 표면 사이가 가두어진 공기가 없이 모두 연결된 통로가 되기 때문에 표면에서 기포가 발생할 수 없는 환경이 된다. 기포 발생 양상 관찰을 용이하게 하기 위해 항상 같은 탄산 압을 유지할 수 있는 시중 탄산음료를 이용하여 비교실험을 진행하였다. 색 구별이 용이하고 탄산음료 중 가장 탄산 발생 정도가 강한 Diet Coke를 이용하였다. Diet Coke는 벤조산칼륨(Potassium benzoate), 아스파탐(aspartame) 등의 첨가제로 인해 다른 탄산음료에 비해 낮은 표면장력을 가져 Eq. (1)에서 기술된 바와 같이 기포 발생에 유리하다.

Fig. 4는 동일한 양의 탄산음료가 각기 다른 표면 성질을 갖는 컵에 담기는 모습을 촬영한 사진이다. 우선 동일한 양의 탄산음료를 동일한 조건으로 주입하기 위해서 탄산 손실 최소화 및 정량을 떨어낼 수 있는 극소수성 컵을 이용하였다. 세 가지 컵에 모두 4°C, 65g의 Diet Coke가 대략 6 cm 높이에서 주입되었으며 거품 형성 반응은 큰 차이를 보였다. 미처리 알루미늄 컵에 붓기 전 극소수성 컵에 가득 담겨있는 Diet Coke는 평온한 상태를 유지하고 있지만, 미처리 알루미늄 표면과 만나는 순간부터 거품 무리를 형성하는 것이 관찰되었다 (Fig. 4(a)). 이후 컵을 제거하고 약간의 Diet Coke가 넘쳐있는 것이 확인되었다. 극친수성 알루미늄 컵에서의 반응은 훨씬 더 격렬하였다. Diet Coke를 반 정도 부은 시점에서 거품은 이미 컵을 가득 메우고 넘치기 시작하였다. Diet Coke가 모두 부어진 후 컵 표면의 거품이 잦아드는 데까지는 수십 초의 시간이 더 걸렸다. 이후 컵을 치운 바닥에는 많은 양의 Diet Coke가 넘쳐있는 것이 확인되었다 (Fig. 4(b)). 이는 액체가 컵 표면과 만나는 단시간 동안 마이크로/나노 구조에 의해 수많은 EGC를 형성했기 때문이다. 거품이 모두 잦아들고 난 다음에도 일반 컵과 달리 미세한 사이즈의 기포가 다수 올라왔다. 극소수성 알루미늄 컵에서는 앞서 기술했던 바와 비슷한 양상을 보였다 (Fig. 4(c)). 다소 높은 위치 (6 cm)에서 액체가 낙하하여 충돌로 인한 기포가 약간 형성된 것이 보이지만 이내 사라지며 거의 눈에 띄지 않았고 밖으로도 전혀 넘치지 않았다.

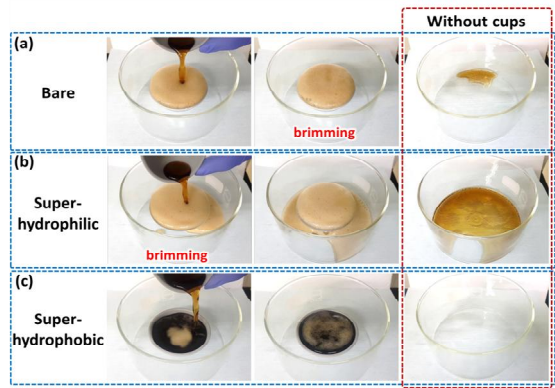


Fig. 4 Diet Coke being poured into (a) bare, (b) superhydrophilic and (c) superhydrophobic cup

거품 발생으로 탄산음료가 넘친 양과 더불어 거품이 많이 발생한 컵일수록 음료를 붓고 난 후 기체발생량이 많았을 것이다. 각 표면에서의 기체 발생량을 정량적으로 측정 및 비교하기 위한 실험을 진행하였다(Fig. 5). Diet Coke가 컵에 부어지는 과정을 밀폐된 컨테이너 내에 구축하여 발생하는 기체를 모을 수 있도록 하였다. 그리고 밀폐 컨테이너에 연결된 호스를 통해 물속에서 뒤집힌 메스 실린더에 발생 기체가 모이게 하였다. Fig. 5(a)와 같이 극소수성 컵의 탄산음료를 미처리, 극친수, 극소수 표면에 각각 옮겨 담으면서 발생한 가스의 양을 정량측정하였다. Fig. 4의 실험과 같이 4°C에서 다이어트 콜라 65g을 사용하였고, 용액이 옮겨지기 시작하고 5초 단위로 가스 수집량을 측정하였다. 동일한 실험을 4회 반복하며 측정 및 평균값을 계산하였다. 각 표면 특성별 실험결과를 비교한 그래프가 Fig. 5(b)에 나타나 있다. 미량의 호스 내부 체적은 무시하였다. 측정 결과, 예상했던 바와 같이 극친수성에서 가장 많은 기체 발생이 일어나고, 일반 표면, 극소수성 표면의 순서로 기체 발생이 적게 일어났다. 최초 5초간 각 표면에서의 기체발생량은 극친수성 표면에서 $81.25 \pm 4.46 \text{ ml}$, 일반 표면에서는 $21.67 \pm 1.18 \text{ ml}$ 로 대략 4분의 1정도 수준의 차이를 보였으며, 극소수성 표면에서는 발생한 기체량이 측정되지 않았다. 하지만 흥미롭게도, 극명한 기체발생량의 차이는 최초 5초에서의 측정에서만 확인할 수 있었으며 5초

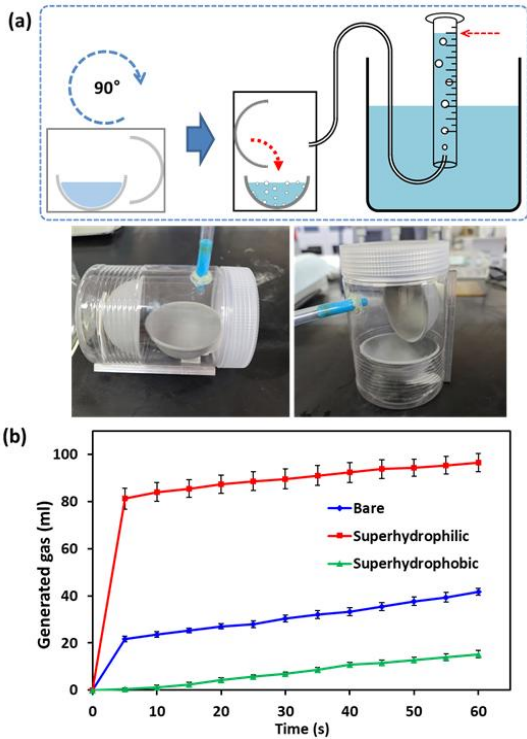


Fig. 5 (a) Schematic diagram and photos of generated gas gathering experiment (b) Cumulative gas generation according to time by surface wettability

이후부터 기체발생량이 모든 표면에서 대폭 낮아진 것을 알 수 있었다. 5초부터 1분까지의 측정에서 기체발생량은 미처리/극친수성/극소수성 세 종류의 서로 다른 젖음성 표면에서 모두 매 5초당 평균 1.5 ml 수준으로 나타났다. 이를 통해 동일한 탄산 기압을 가진 용액에서는 표면 거칠기 및 젖음성과 관계없이 동일한 이산화탄소 방출 속도를 갖는다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 표면의 젖음성 개질을 통해 탄산 액체의 기포 발생을 극단적으로 증가 또는 억제할 수 있음을 발견하였다. 알루미늄 컵의 표면 젖음성은 극친수성, 극소수성으로 개질되었으며,

표면 특성에 따라 탄산음료의 기포 발생 현상을 관찰하였다. 극친수성 표면에서는 작고 많은 EGC로 인해 순간적인 폭발적 기포 발생이 관찰된 반면, 극소수성 표면에서는 액체와 표면 사이의 공기층으로 인해 표면의 어느 부분에서도 기포 발생이 관찰되지 않았다. 이 연구의 결과는 탄산 용액과 고체 사이의 계면에서의 기포 형성에 대한 더 나은 이해를 제공하였다. 탄산액의 기포핵생성 억제제가 최초로 발견된 2020년 이후 추가 연구를 통하여 기체발생량의 차이는 초반 약 5초에서 종료되며 이후 지속 시 가스 발생속도는 거의 동일하다는 새로운 현상을 보고하였다. 이러한 현상은 기체 내의 탄산압만이 영향을 미친다는 것을 유추할 수 있으나, 향후 현상 규명을 위하여 추가적인 분석 연구가 가능할 것으로 보인다. 본 연구 결과는 잠재적 응용 분야인 피부조직 배양에 중요하게 활용될 것으로 기대된다. 피부조직을 배양하는 표면과 조직 사이에 공기 공급을 통해 조직의 성장 속도를 높일 수 있으며, 배양이후 이식수술 시에 표면으로부터 손상 없는 탈거를 도울 수 있다.

후 기

이 논문은 2020학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

REFERENCES

- Liger-Belair, G., Polidori, G. and Jeandet, P., "Recent advances in the science of champagne bubbles," *Chemical Society Reviews*, Vol. 37, pp. 2490-2511, 2008.
- Barker, G. S., Jefferson, B. and Judd, S. J., "The control of bubble size in carbonated beverages," *Chemical Engineering Science*, Vol. 57, pp. 565-573, 2002.
- Coffey, T. S., "Diet Coke and Mentos: What is really behind this physical reaction?," *American Journal of Physics*, Vol. 76, pp. 551-557, 2008.
- Park, B. and Hwang, W., "A facile fabrication method for corrosion-resistant micro/nanostructures

- on stainless steel surfaces with tunable wettability,” *Scripta Materiala*, Vol. 113, pp. 118-121, 2016.
5. Lee, J.-W. and Hwang, W., “Exploiting the silicon content of aluminum alloys to create a superhydrophobic surface using the sol-gel process,” *Materials Letters*, Vol. 168, pp. 83-85, 2016.
 6. Kim, S., Hwang, H. J., Cho, H., Choi, D. and Hwang, W., “Repeatable replication method with liquid infiltration to fabricate robust, flexible, and transparent, anti-reflective superhydrophobic polymer films on a large scale,” *Chemical Engineering Journal*, Vol. 350, pp. 225-232, 2018.
 7. Hwang, G. B., Patir, A., Page, K., Lu, Y., Allan, E. and Parkin, I. P., “Buoyancy increase and drag-reduction through a simple superhydrophobic coating,” *Nanoscale*, Vol. 9, pp. 7588-7594, 2017.
 8. Lee, C. and Kim, C. J., “Underwater restoration and retention of gases on superhydrophobic surfaces for drag reduction,” *Physics Review Letters*, Vol. 106, pp. 014502, 2011.
 9. Lyu, S., Nguyen, D. C., Kim, D., Hwang, W. and Yoon, B., “Experimental drag reduction study of super-hydrophobic surface with dual-scale structures,” *Applied Surface Science*, Vol. 286, pp. 206-211, 2013.
 10. Azzopardi, D., Haswell, L.E., Foss-Smith, G., Hewitt, K., Asquith, N., Corke, S. and Phillips, G., “Evaluation of an air-liquid interface cell culture model for studies on the inflammatory and cytotoxic responses to tobacco smoke aerosols,” *Toxicology in Vitro*, Vol. 29, pp. 1720-1728, 2015.
 11. Chandrasekaran, A., Kouthouridis, S., Lee, W., Lin, N., Ma, Z., Turner, M. J., Hanrahan, J. W. and Moraes, C., “Magnetic microboats for floating, stiffness tunable, air-liquid interface epithelial cultures,” *Lab on a Chip*, Vol. 19, pp. 2786, 2019.
 12. Riet, S. V., Ninaber, D. K., Mikkers, H. M. M., Tetley, T. D., Jost, C. R., Mulder, A. A., Pasman, T., Baptista, D., Poot, A.A., Truckenmüller, R., Mummery, C. L., Freund, C., Rottier, R. J. and Hiemstra, P. S., “In vitro modelling of alveolar repair at the air-liquid interface using alveolar epithelial cells derived from human induced pluripotent stem cells,” *Scientific Reports*, Vol. 10, pp. 5499, 2020.
 13. Jones, S. F., Evans, G. M. and Galvin, K. P., “Bubble nucleation from gas cavities-a review,” *Advanced Colloid Interface Science*, Vol. 80, pp. 27-50, 1999.
 14. Debenedetti, P. G., “Metastable Liquids: Concepts and Principles,” Princeton University Press, pp. 218, 1996.
 15. Wenzel, R. N., “Resistance of solid surfaces to wetting by water,” *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 28, pp. 988-994, 1936.
 16. Cassie, A. B. D. and Baxter, S., “Wettability of porous surfaces,” *Transactions of the Faraday Society*, Vol. 40, pp. 546-551, 1944.