

미세버블 기술

Fine Bubble Technology

이정민^{1,2} · 이성주³ · 박명환^{1,2} | Jung-Min Lee^{1,2} · Sung-Joo Lee³ · Myoung-Hwan Park^{1,2}

¹Department of Chemistry and Life Science, Sahmyook University, Hwaranro 815, Nowon-gu, Seoul 01795, Korea

²Nanobiomaterials Research Institute, Sahmyook University, Hwaranro 815, Nowon-gu, Seoul 01795, Korea

³Department of Environmental Engineering, Anyang University, 22 Samdeok-ro, 37beon-gil, Manan-gu, Anyang-si, Gyeonggi 14028, Korea
E-mail: mpark@syu.ac.kr

1. 서론

미세버블(fine bubble)은 1990년경 일본의 횃집 수족관에 있던 물고기가 3배로 자란 것이 방송에 보도되면서부터 관련 기업들의 관심을 얻기 시작하였다. 1995년에 일본 토쿠야마 고등전문학교의 다이세이 히로후미 교수가 세계 최초로 미세버블의 제조 기술을 개발하였고, 1998년에 이 기술을 적조 피해를 받은 굴 양식장에 적용하여 굴 성장에서도 놀라운 결과를 나타내었다. 다이세이 교수는 미세버블이 용존 산소 공급에 효율적 역할을 하여, 성장을 촉진시킨 것으로 해석하였으며, 살균 효과 또한 증진시킨다고 보고하였다. 그 후 일본 NHK방송에서 미세버블의 개념과 피부세포 재생, 혈액순환, 살균 등의 효과를 자세히 발표하면서 대중들에게 많이 알려졌다. 지금까지 다양한 연구가 진행되고 있다.

‘버블(bubble)’이란 액체 내부에 기체가 분산되어 발생한 기포를 의미한다. 일반적으로 액체 속에서 직경이 50 μm 초과인 조대버블은 수면위로 올라가는 속도가 브라운 운동(Brownian motion, 기체의 랜덤 분자운동) 속도보다 빠르므로 급격하게 상승하여 빠르게 터진다. 이에 반해, 직경이 50 μm 이하인 미세버블은 수면위로 올라가는 속도와 브라운 운동 속도가 비슷해지므로 천천히 상승하기 때문에, 내부기체를 밖으로 내보내며 크기가 점차 작아져 완전히 용해되거나, 최종적으로 수면위로 올라와 파열되는 특성을 가진다(그림 1).¹ 이렇게 버블이 작아지고 사라지는 과정에서 기체가 압축이 되어 내부압력이 상승하게 되면, 버블표면에 전하가 농축되고, 농축된 이온은 프리라디칼을 생성시키고 작아진 나노버블을 안정화시킨다.² 프리라디칼이란 물 분자 등이 분해되어 반응성이 높은 홀전자를 가진 물질이며, 에너지가 높기 때문에 유해한 화학물질을 분해할 수 있다.¹

Author



이정민

2018
2018-현재
삼육대학교 화학과 (학사)
삼육대학교 화학과 (석사과정)



박명환

2000
2002
2012
2011-2013
2013-현재
삼육대학교 화학과 (학사)
연세대학교 화학과 (석사)
매사추세츠대학 화학과(박사)
MIT 화학공학과 (Post-Doc.)
삼육대학교 화학생명과학과 조교수



이성주

2003
2012
2012-2013
2014-2016
2017-현재
안양대학교 환경공학과 (학사)
서울대학교 에너지시스템공학과 (석·박사)
한국지질자원연구원 (Post-Doc.)
한국원자력연구원 (Post-Doc.)
안양대학교 환경에너지공학과 조교수

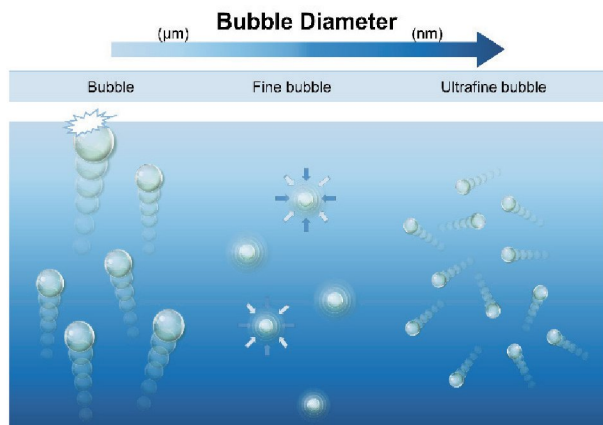


그림 1. 크기에 따른 버블의 운동 또는 수축과 팽창에 관한 모식도.

프리라디칼은 물 속에 존재 하는 이온들이 미세버블 주위에 모이게 되는데 이때, 버블의 크기가 작아져 사라지면 고농축의 이온 클러스터가 생성되고, 축적된 에너지에 의해 물 분자 등이 분해가 되어 발생한다.³ 버블은 2개의 계면(기체, 액체)을 가지고 있는데, 물 분자는 서로 잡아당기며 표면적을 작게 만들려고 하기 때문에 버블이 작아지며 내부에 있는 기체가 압축된다.³ 또한 크기가 작으면 작을수록 내압 상승이 효과적으로 작용하기 때문에, 기압이 높은 기체는 보다 효율적으로 물속에 들어가게 된다.¹ 이러한 미세버블의 다양한 특성을 이용해 수 처리, 피부미용, 유해물질과의 흡착에 의한 세정, 생물 성장촉진, 진단 및 치료, 연료 효율, 살균 및 소독 등의 다양한 영역에서 활용되고 있다.

직경이 1 μm 이하의 초미세버블(ultrafine bubble)은 브라운 운동 속도가 매우 빠르기 때문에 수면위로 올라가는 속도가 매우 느리며, 표면에는 미세버블보다 많은 이온이 둘러싸여 있어서 버블이 더욱 안정화된다.³ 그 결과, 표면의 이온장벽에 의해 버블내부의 기체가 용해되지 않고, 수중에 장기간 동안 잔존할 수 있다.³⁻⁵ 이처럼 초미세버블은 미세버블에서 볼 수 없었던 새로운 특성을 가지고 있어서 다양한 응용분야에서 놀라운 효과를 나타내고 있다. 본 총설에서는 이러한 미세버블 및 초미세버블의 생성과정과 이들의 다양한 응용분야에 대해 이야기할 것이다.

2. 본론

2.1 정의 및 특성

일반적으로 직경이 50 μm를 초과하는 기포를 조대버블이라 하고, 50 μm 이하의 기포를 미세버블이라 하며, 1 μm 이하의 매우 작은 기포를 초미세버블이라 하여 구분한다.

2.1.1 미세버블과 초미세버블의 거동

초미세버블과 미세버블이 조대버블과 구분되는 가장 큰

차이점은 액체 내에서의 수명이다. 직경이 큰 조대버블은 큰 부력으로 인해 수면으로 부상해 사라지고 상대적으로 직경이 작은 미세버블은 부상하기도 하지만 자기가압 효과로 인해 점점 수축되어 사라지기도 한다.¹ 반면 초미세버블은 Stokes의 법칙과 브라운 운동에 의해 수면으로 부상하여 사라지지 않는다.

$$V_{\text{bubble}} = \frac{2\Delta\rho g}{9\eta} r^2$$

여기에서 $\Delta\rho$ 는 버블과 주변 액체의 밀도차이, g 는 중력 가속도 그리고 η 는 액체의 점성 계수이다. 버블의 부상 속도, V_{bubble} 는 반지름, r 의 제곱에 비례하기에 버블의 크기가 작아질수록 더욱 작아진다.

$$V_R = \sqrt{\frac{3K_B T}{M}}$$

브라운 운동은 액체에 분산되어있는 작은 입자의 불규칙한 운동을 말하며, 여기에서 V_R 는 브라운 운동속도, K_B 는 볼츠만 상수, T 는 절대온도 그리고 M 은 미소입자의 질량이다. 부상 속도는 버블의 크기가 작아질 수록 작아지지만, 반대로 브라운 운동속도는 크기가 작아질 수록 커진다.³ 이 두 속도는 버블의 직경이 10 μm일 때 일치하였으며, 버블의 직경이 10 μm보다 작아지면 브라운 운동 속도가 부상속도보다 커지며 실제로 버블의 부상속도도 매우 감소한다. 따라서 1 μm 이하의 초미세버블은 액체 내에서 장기간 존재하게 된다.¹

2.1.2 표면에너지와 용해성

버블 주변에 위치하는 액체의 기체포화도는 버블 내의 가스 압력에 의존한다. 직경이 50 μm 이하인 크기가 작은 버블은 높은 내부압력을 가지며 수축하는 버블 주변의 액체로 기체를 방출시키는 반면, 크기가 큰 버블은 낮은 내부 압력을 가지며 주변 액체로부터 기체가 들어온다.¹⁶ 헨리의 법칙에 따르면, 수축하는 버블 주변의 액체에 용해된 기체의 양은 버블의 내부기압이 상승함에 따라 증가하며, 이 때 내부기체압력과 버블직경 사이의 관계는 아래의 Young-Laplace 방정식에 의해 표현된다.²⁷

$$P = P_1 + 2\sigma/r$$

여기서, P 는 기체 압력, P_1 는 액체 압력, σ 는 표면 장력, r 은 버블의 반지름이다. 따라서 기체압력은 버블의 크기가 작을수록 줄어들고, 크기가 클수록 성장하는 경향이 있다. 이 과정은 Ostwald 숙성으로 알려져 있는데, 작은 입자들이 높

은 표면에너지와 높은 용해성을 가짐으로써 용액 속에서 재 용해되어 큰 입자들은 더욱 크게 성장하게 된다.⁷

2.1.3 초미세버블의 안정성 및 투명성

초미세버블이 안정하게 존재함을 알 수 있는 것은 콜로이드 계(colloidal system)의 안정성을 가리키는 지표인 제타 전위를 측정함으로써 알 수 있다.⁴ 액체 내 분산된 입자들이 강한 음의 제타 전위, 또는 강한 양의 제타 전위를 나타낼 시, 입자들은 척력이 생기며 응집이 억제된다. 그러나 제타 전위의 절대 값이 작을 경우, 서로 가까워지며 응집이 일어나 미세버블은 사라지게 되며, 일반적으로 ± 30 mV가 용액의 안정성을 평가하는 경계가 된다.^{3,5,7-10} 높은 브라운 운동을 하며 -30.51 ± 0.82 mV의 제타 전위값을 갖는 초미세버블들의 반발력 때문에 용액속에서 미세버블보다 훨씬 안정해 질 수 있다.

일반적으로 미세버블은 육안으로 식별이 가능하고 불투명하게 보인다(그림 2a). 그러나 초미세버블의 경우 육안으로는 식별이 불가능하며, 물 안에서 투명하게 보이는 특징을 가진다(그림 2b). 초미세버블을 측정하기 위해서는 동적광산란(dynamic light scattering), 레이저 회전산란(laser diffraction scattering), 나노입자분석기(nanoparticle tracking analyzer)와 같은 장비로 분석한다. 초미세버블의 존재 유무를 간단히 확인하기 위해서는 그림 2c에서 보는 바와 같이 레이저의 산란 현상으로 확인이 가능하다. 초미세버블이 존재하는 물에 레이저를 비추면 레이저가 산란되는 선을 볼 수 있게 되는데, 초미세버블이 존재하지 않으면 레이저의 선이 보이지 않으며, 개체수가 많을수록 선의 강도가 진해지는 경향이 있다.

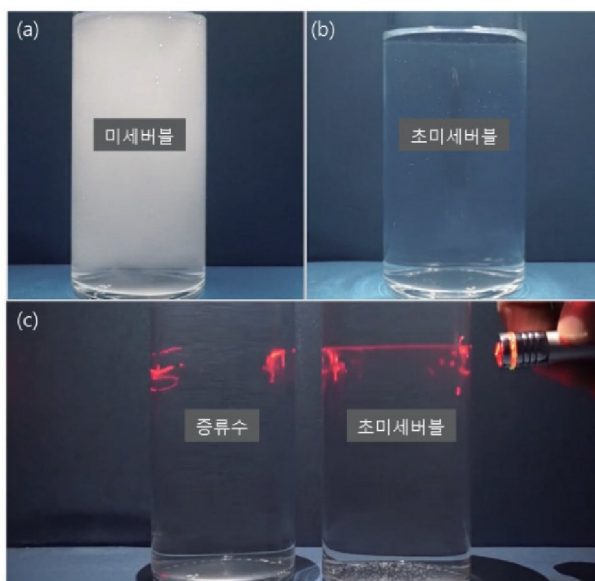


그림 2. (a) 불투명성을 보이는 미세버블수와 (b) 투명성을 보이는 초미세버블수의 사진 (c) 증류수와 초미세버블수의 레이저 투과비교 사진.

2.2 미세버블의 제조방법

미세버블은 물과 공기만으로 생성할 수 있으며, 생성과정과 소멸과정은 함께 동반되고, 소멸할 때 국소적인 고온고압과 대량의 음이온을 방출시킨다.¹¹ 미세버블의 제조방법은 일반적으로 가압기법, 전단기법, 전단선회기법을 사용하고 있으며, 입자의 크기가 현저히 작은 초미세버블은 감압형, 캐비테이션형, 기체액체혼합형 등의 기법을 사용하고 있다.

2.2.1 미세버블의 생성기법

기체가 용액에 용해되는 경우, 압력에 비례하여 기체의 용해도가 증가한다.⁶ 가압기법은 이러한 용해도의 특성을 이용한 것으로 고압으로 충분한 양의 기체를 용액에 용해시킨 후 추가적인 압력을 가해 다공성 투과막을 통과시켜 미세버블을 생성한다(그림 3a). 전단기법은 액체와 기체를 혼합하기 위하여 스크루를 사용하여 액체와 기체를 강제로 혼합시키거나 벤츄리(압력을 떨어뜨리기 위해서 설치한 단면이 좁은 통로) 형태를 사용하여 통로가 좁아지는 부분에서 압력이 낮아지는 현상을 이용하여 기체 혼합 및 미세버블을 생성하는 기법이다(그림 3b). 전단선회기법은 전단기법과 마찬가지로 벤츄리 형태로 구성되어 있으나 공기를 흡입하는 챔버에서 작은 입자형태의 공기로 전단 소용돌이를 발생시켜 미세버블을 생성시키는 기법이다(그림 3c).

2.2.2 초미세버블의 생성기법

입자의 크기가 현저히 작은 초미세버블은 감압형, 캐비테이션형, 기체-액체혼합형 등의 기법을 사용하여 생성시키고

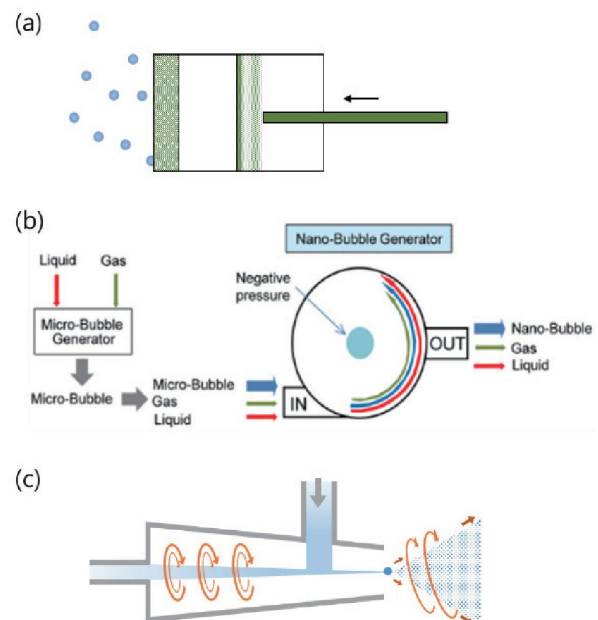


그림 3. 미세버블 생성 기법¹²: (a)가압기법, (b)전단기법, (c)전단 선회기법.

있으며, 기체-액체혼합형은 사용되는 교반용기에 따라 추가적으로 구분될 수 있다. 감압형은 저온에서 용액 안에 내포된 기체에 압력을 가하여 과포화상태인 용액으로 만든 후에 급격하게 가열하거나 압력을 낮춰 줌으로써 초미세버블을 생성하는 기법이다. 그림 4a에서 왼쪽(side view)은 가열이 시작되기 전에 초미세버블이 없는 상태를 보여주고 있으며, 오른쪽(front view)은 급격한 온도상승 후에 초미세버블의 핵이 생성된 것을 보여주고 있다.¹⁴ 캐비테이션형은 액체 내에 초음파와 고주파 같은 에너지를 가하여, 액체를 기화시키거나 액체 내에 녹아 있던 기체가 나와 초미세버블을 생성하는 기법이다.²

점도가 낮은 액체인 경우에는 기체와 액체의 혼합시에 발생하는 불규칙한 유체의 흐름을 이용한 다양한 초미세버블 생성 기법이 개발되었다. 그림 4c에서 보여주는 것과 같이 탱크 하단에 나노크기 단위의 다공성(pore)을 가진 판과 같은 기구를 통해 액체 속으로 기체를 넣어주는 버블탑(bubble column)을 사용하거나,⁶ 기체와 액체를 교반시켜주는 기계적 교반용기(mechanically agitated vessel)를 활용하기도 한다(그림 4d).¹³ 또한 액체와 기체를 한 용기에 담고, 용기 자체에 지속적인 운동에너지를 가하는 직렬형 고정믹서(in-line static mixer)를 활용하거나(그림 4e), 벤츨리 형태를 사용하여 기체를 흡입하고, 불규칙한 유체의 흐름을 일으켜 혼합하는 이젝터(ejector)(그림 4f)를 활용하는 방법 등이 있다.^{13,14}

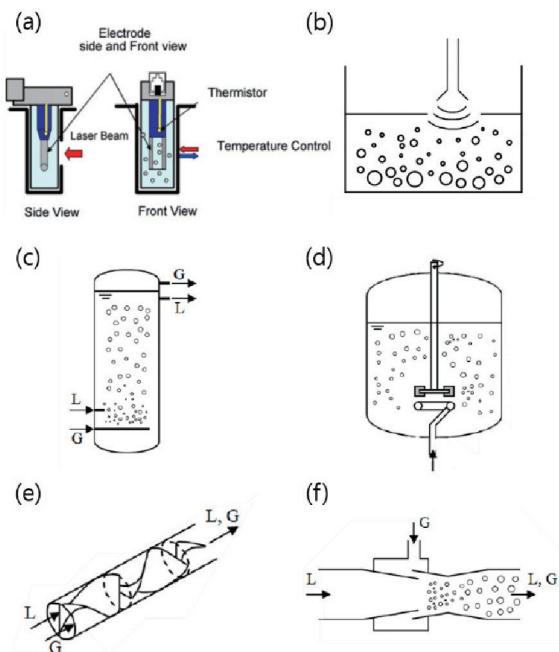


그림 4. 초미세버블 생성기법.^{6,13,14} (a) 감압형, (b) 캐비테이션형, (c)~(f) 기체-액체 혼합형; (c) 버블탑(bubble column) (d) 기계적 교반용기(mechanically agitated vessel) (e) 직렬형 고정믹서(in-line static mixer) (f) 이젝터(ejector).

2.3 응용분야

미세버블의 기본적인 특성은 단위부피 당 표면적의 증가, 표면전하의 증가, 버블 파열 순간의 높은 에너지 및 라디칼 생성 등이 있으며, 이를 활용하여 물질제조의 화학공학 프로세스, 수질정화, 세정, 살균, 소독, 미용, 토목, 염색 가공, 연료 연비 저감, 식품, 농업, 수산, 의료, 선박, 해수설비 등 매우 다양한 응용분야에서 미세버블이 적용되어 연구되고 있다. 본 총설에서는 살균, 수질정화, 세정, 성장촉진과 의료용 진단 및 치료에 대하여 중점적으로 기술하였다.

2.3.1 살균 및 수질정화

일반적으로 물에 용해되어 있는 미세버블은 약한 음의 전하를 가지게 되는데, 미세버블이 터지면서 순간적으로 높은 에너지를 발생하고, 라디칼을 생성시킨다고 알려져 있다.^{2,12} 현재 미세버블이 가장 많이 사용되고 있는 분야는 수질정화이며 대표적인 산업은 녹조제거라고 할 수 있다. 여름철에는 온도 상승으로 해수의 표층과 해저 밀도 차가 발생되어 물의 순환이 원활히 이루어지지 않아 해저에 낮은 산소 농도가 지속되고 결과적으로 녹조가 발생된다. 이러한 수질 내 유기오염물질 제거 및 살균처리를 위해 미세버블을 만들어 활용할 수 있다.² 이러한 활용을 위해 서울대학교의 한무영 교수팀은 미세버블의 크기, 내부압력, 전하와 전하값, 금속이온의 영향과 같은 다양한 요인들을 조절하여 효과적으로 녹조를 제거하는 방법들을 제시하였다.¹⁵⁻¹⁷

독일의 Broekman 그룹은 초음파로 제거된 녹조는 쉽게 재발생하게 되는데 미세버블수와 함께 초음파 처리를 하게 되면 녹조의 재성장을 거의 억제할 수 있다고 보고하였고, 영

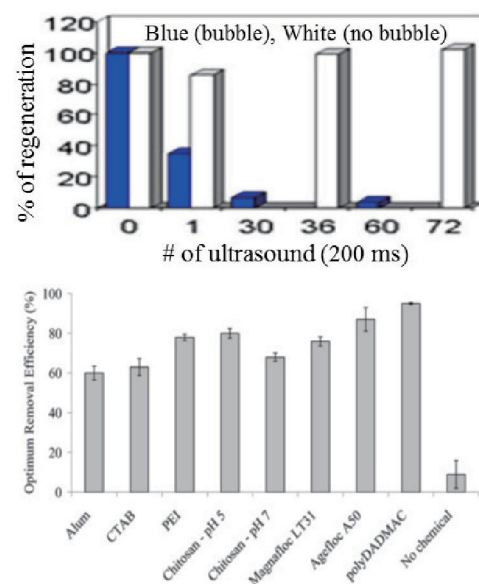


그림 5. 초음파를 활용하여 녹조제거시 미세버블 존재유무에 따른 녹조 재발생률과(위)¹⁸ 계면활성제 종류에 따른 녹조제거효율(아래).¹⁹

국의 Henderson 그룹은 미세버블에 적절한 계면활성제나 고분자를 도입하면 녹조제거 효과가 더욱 향상된다고 발표하였다(그림 5).^{18,19} 또한 미세버블은 세정 및 살균 효과 외에도, 수중 내에 용존 산소량을 증가시켜 혐기성 퇴적층을 호기성으로 바꾸어 주며 질소와 인산 등의 발생을 억제 시킴으로 적조와 녹조를 예방할 수 있고, 폐수 중의 이물질을 부상분리 제거하여 수질을 개선할 수 있다.²⁰⁻²²

2.3.2 세척 및 세정

음의 전하를 띠고 있는 미세버블은 양의 전하인 오염물질과 흡착하여 수면 위로 올라가게 된다. 이때, 수면위로 떠오르는 속도가 매우 느리기 때문에 오염물질을 흡착할 수 있는 확률이 높으며 수면에 도달했을 때 버블이 터지면서 오염물질을 제거할 수 있게 된다.²³ 또한 이러한 특성은 계면활성제를 사용하면 더 효과적이고, 양의 전하를 띤 미세버블을 생성할 수도 있으며, 최소한의 화학약품 사용을 돕기도 한다.² 태국의 Srilaong 연구팀은 신선편이(fresh-cut) 식품의 세정에 오존버블수를 사용하였더니 박테리아 발생과 갈변이 현저하게 줄었다고 보고하였고,²⁴ 태국의 까셋삿 대학교 연구그룹은 미세버블수를 기존 살균제와 함께 사용하였더니 박테리아 발현을 억제하여 채소의 유통기간을 향상시켰다는 연구를 발표하였다.²⁵

네델란드의 트웬테대학의 연구팀은 레이저에 의해 생성된 미세버블이 응집되거나 팽창하여 터질 때 전단흐름(shear flow)과 사류(jet flow)가 순간적으로 발생하여 표면의 입자들을 국소적으로 세정할 수 있다는 메커니즘을 발표하였다.²⁶ 이러한 메커니즘은 미리 형성된 미세버블수를 활용한 초음파 세정에 확대 연구되어 활용되고 있다.^{27,28} 특히 초음파세정공정을 반복 사용하는 반도체 세정을 위해 미세버블수 활용방안이 지속적으로 모색되고 있으며, 특히 펄스형의

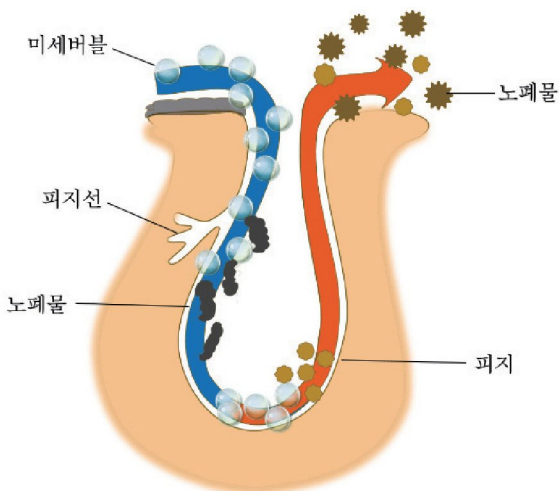


그림 6. 미세버블을 이용한 모공 속 세정에 관한 모식도.

메가소닉을 활용한 연구가 많이 이루어지고 있다.²⁴ 하지만 초음파와 버블에 의해 미세패턴이 붕괴될 수 있기 때문에 적용 시스템에 최적화된 버블의 크기와 주파수에 대한 추가연구가 우선시되어야 한다.²⁹

이러한 세정 특성은 피부미용 분야에서도 적용할 수 있는데, 20~50 μm 의 모공보다 작은 크기의 미세버블을 이용하여 모공 속 노폐물을 제거하며, 버블이 파열할 때 발생하는 순간적인 고온고압을 이용하여 모공 속의 피지와 각질 층을 제거할 수 있다(그림 6).³⁰ 또한 피부 미용 외에도 아토피, 여드름, 습진과 같은 치료에도 도움을 준다고 보고되고 있다.

2.3.3 성장촉진

미세버블은 살균과 같은 부정적인 측면 뿐만 아니라 식물과 동물의 성장촉진과 같은 긍정적인 역할을 수행하기도 한다. 미세버블수를 활용하여 성장을 촉진하는 방법은 크게 두 가지로 분류할 수 있는데, 하나는 성장 억제요인을 제거하여 성장을 촉진하는 것이고 다른 하나는 성장에 필요한 기체공급이나 영양분 공급을 용이하게 하여 성장을 촉진하는 것이다. 전자의 대표적인 예는 서울대학교 연구팀이 오존버블수를 활용하여 박테리아 성장을 억제하여 자주개자리의 성장을 촉진한 결과이다.³¹ 오존버블수에서 발아한 자주개자리는 비교군인 수돗물이나 오존수보다 높은 발아률과 성장촉진을 나타내었고, 우수한 성장률을 보인 염소수보다 높은 발아률과 생체중이 관측되었다.³¹

후자의 경우는 주로 수경재배에 많이 활용되는데, 일본 도

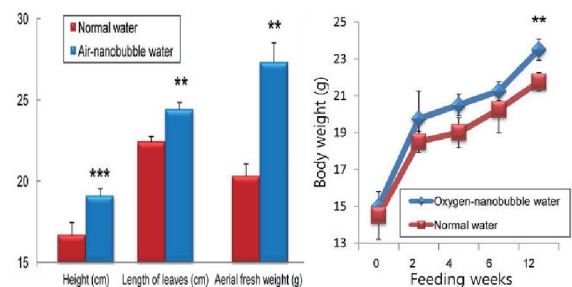


그림 7. 일반물과 초미세버블수를 사용한 배추의 4주간 성장 비교 그래프(좌)와 실험쥐의 12주간 성장비교 그래프(우).³³

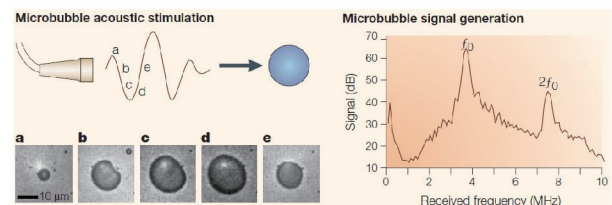


그림 8. 초음파에 의한 미세버블의 진동발생 원리 및 형상과 신호발생에 대한 모식도.³⁶

교대학교 연구팀은 미세버블수를 활용한 실험군이 수돗물을 사용한 비교군보다 씨앗의 발아속도가 15-25% 향상된 결과를 보였다고 발표하였다.³² 최근 일본 오사카대학 의료센터의 연구팀은 4주간 공기를 함유하는 초미세버블수를 활용하여 배추를 수경 재배하였는데, 배추 잎의 생체중이 대조군에 비해 현저하게 증가했다고 보고하였다(그림 7).¹² 이는 용액 내 버블의 내부압력이 주변 환경보다 훨씬 높기 때문에 액체 내에 기체의 용해를 촉진시켜 용존산소량이 높아져 성장이 촉진된 것이기 때문이다. 더 나아가, 버블의 표면이 음전하로 이루어져 있기 때문에 영양분이 있는 용액에서 음전하는 양 이온을 띤 영양분을 끌어 당김으로써 식물의 성장촉진에 도움을 준다.^{33,34} 또한 이 연구팀은 식물 외에도 동물 성장촉진에 관한 연구도 진행하였는데 지속적으로 산소버블수를 섭취한 쥐는 일반물을 섭취한 쥐보다 키와 무게의 성장이 빠르게 진행된다고 보고하였다(그림 7).¹² 따라서 대기 및 산소를 함유하는 미세버블수 또는 초미세버블수를 활용하면 동식물의 성장촉진에 큰 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

2.3.4 의료용 진단 및 치료

현재까지 의료용 진단 및 치료를 위해 미세버블을 가장 많이 활용하는 연구분야는 초음파를 활용한 이미징과 약물전달 시스템이다.³⁵ 초음파는 질병을 진단하기 위해 가장 많이 사용되는 장비로써, 보다 효과적인 대비(contrast)영상을 얻으려면 조영제의 사용은 필수적인데, 인체에 무해하면서도 활용도가 높은 대표적인 조영제는 미세버블이다.³⁶ 압축성을 가지며 초음파의 파장보다 작은 미세버블은 적혈구와 비슷하게 행동하기 때문에 혈액과 함께 순환될 수 있으며, 음파영역에서 초음파에 의한 미세한 진동을 신호화할 수 있다(그림 8). 이러한 신호는 미세버블의 압축성, 속도, 내부기체의 종류 및 밀도, 주변환경의 밀도와 구성물질, 적용되는 초음파의 주파수에 따라 다양하게 나타내어질 수 있으며, 미세버블의 표면에 계면활성제, 고분자, 또는 생체물질들을 활용하여 표적형 이미징에도 활용할 수 있다.³⁷ 무엇보다도 인체에 미치는 영향이 매우 적기 때문에 현재 의료현장에서 이미징 조영제로서 활발하게 활용되고 있다.

초음파 조영제로서의 미세버블의 특성은 약물전달시스템 플랫폼에서도 잘 활용되고 있는데, 미세버블의 내부공간과 표면을 활용하여 표적물질과 약물 및 유전자와 같은 다양한 생체물질들을 표적지역에 선택적으로 전달하고, 집속초음파 조사에 따른 미세버블의 응집 및 붕괴로 인해 선택지역에만 약물이 방출되는 시스템이다. 이러한 미세버블 매개 초음파 약물치료법은 비수술 치료법으로써 약물의 부작용을 최소화하고, 비정상조직에만 선택적으로 치료할 수 있는 시스템으로 적용되어 의료현장에서 다양하게 활용되고 있다. 또한 최근에는 약물치료가 어렵고, 고난이도의 수술을 요구하는 뇌

질환 같은 질병을 치료하기 위해 미세버블 매개 초음파치료법이 더욱 많이 활용되고 있다.³⁸ 일반적으로 뇌혈관막은 치료제와 같은 외부물질의 침입을 허용하지 않아 약물치료가 어렵기 때문에 뇌혈관막 주위에 집속초음파를 조사하여 약물주입을 시도하지만 그 효율이 매우 낮다. 이 때 미세버블과 함께 약물을 주사하고 집속초음파를 조사하게 되면 그 효율이 향상된다는 연구결과가 수년 전에 보고되어 이와 관련된 다양한 임상실험이 현재 진행되고 있다. 이러한 미세버블 기반 이미징과 약물전달시스템은 부작용이 적은 환자 친화적인 치료법이기 때문에 향후 의학발전에 지대한 방향성을 제시할 것이라 기대된다.

3. 결론

높은 표면적과 내부압력, 우수한 기체용해도와 높은 표면전하밀도와 같은 미세버블의 특성을 활용하여 살균, 수질정화, 세척 및 세정, 성장촉진, 의료용 진단 및 치료 등과 같은 다양한 분야에서 미세버블과 초미세버블이 사용되어지고 있다. 이러한 응용 연구의 핵심은 미세버블의 크기 조절과 개체수(농도) 증가 및 효율적인 생산성에 있기 때문에 이에 대한 많은 연구가 함께 이루어지고 있으며, 최근에는 투명성과 안정성이 우수한 초미세버블을 활용하기 위해 높은 개체수를 가지는 초미세버블을 빠르게 생성시키는 연구들이 진행되고 있다. 이에 따른 미세버블과 초미세버블 응용 분야는 더욱 다양화될 수 있는 잠재력을 가지고 있다고 기대된다.

참고문헌

1. A. Agarwal, W. J. Ng, and Y. Liu, *Chemosphere.*, **84**, 1175 (2011).
2. N. Matsuki, S. Ichiba, T. Ishikawa, O. Nagano, M. Takeda, Y. Ujike, and T. Yamaguchi, *Eur. Biophys. J.*, **41**, 571 (2012).
3. R.-H. Yoon and J. L. Yordan, *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, **113**, 430 (1986).
4. S. Calgaroto, K. Wilberg, and J. Rubio, *Miner. Eng.*, **60**, 33 (2014).
5. S.-H. Cho, J.-Y. Kim, J.-H. Chun, and J.-D. Kim, *Colloids Surf. A-Physicochem. Eng. Asp.*, **269**, 28 (2005).
6. M. Kukizaki and M. Goto, *J. Memb. Sci.*, **281**, 386 (2006).
7. M. Matsumoto and K. Tanaka, *Fluid Dyn. Res.*, **40**, 546 (2008).
8. M. Takahashi, K. Chiba, and P. Li, *J. Phys. Chem.*, **111**, 1343 (2007).
9. M. Takahashi, K. Chiba, and P. Li, *J. Phys. Chem. B*, **111**, 11443 (2007).
10. K. Yasui, T. Tuziuti, and W. Kanematsu, *Ultrason. Sonochem.*, **48**, 259 (2018).
11. A. S. Najafi, J. Drelich, A. Yeung, Z. Xu, and J. Masliyah, *Curr.*

- Opin. Colloid Interface Sci.* **308**, 344 (2007).
12. K. Ebina, K. Shi, M. Hirao, J. Hashimoto, Y. Kawato, S. Kaneshiro, T. Morimoto, K. Koizumi, and H. Yoshikawa, *PLoS One*, **8**, e65339 (2013).
 13. S. Kato, D. Matsuoka and N. Miwa, *Mater. Sci. Eng. C*, **53**, 7 (2015).
 14. I.-H. Jung, S. J. Lee and Y. S. Son, Google Patents, US20160243508A1 (2016).
 15. M. Y. Han, M. K. Kim, and M. S. Shin, *J. Water Supply: Res. Technol.-AQUA*, **55**, 471 (2006).
 16. M. Han, Y. Park, J. Lee, and J. Shim, *Water Sci. Tech.- Water Supply*, **2**, 41 (2002).
 17. T. T. Bui and M. Han, *Miner. Eng.*, **72**, 108 (2015).
 18. S. Broekman and O. Pohlmann, *Ultrason. Sonochem.*, **17**, 1041 (2010).
 19. R. K. Henderson, S. A. Parsons, and B. Jefferson, *Separ. Sci. Technol.*, **44**, 1923 (2009).
 20. K. Yamasaki, K. Sakata, and K. Chuhjoh, Google Patents, US8205277B2 (2010).
 21. K. Yamasaki, K. Uda, and K. Chuhjoh, Google Patents, US7625484B2 (2009).
 22. H. Li, L. Hu, D. Song, and F. Lin, *Water Environ. Res.*, **86**, 844 (2014).
 23. Y. Tano, A. Iizuka, E. Shibata, and T. Nakamura, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **52**, 15658 (2013).
 24. N. Pongprasert, P. Jitareerat, and V. Srilaong, *Acta Hort.*, **1120**, 177 (2016).
 25. P. Klintham, S. Tongchitpakdee, W. Chinsirikul, and W. Mahakarnchanakul, *Food Control*, **77**, 260 (2017).
 26. C.-D. Ohl, M. Arora, R. Dijkink, V. Janve, and D. Lohse, *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 074102 (2006).
 27. B. Zhou, H. Feng, and A. J. Pearlstein, *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, **16**, 427 (2012).
 28. B. Verhaagen and D. F. Rivas, *Ultrason. Sonochem.*, **29**, 619 (2016).
 29. M. Hauptmann, F. Frederickx, H. Struyf, P. Mertens, M. Heyns, S. De Gendt, C. Glorieux, and S. Brems, *Ultrason. Sonochem.*, **20**, 69 (2013).
 30. J.-W. Lee, H.-W. Kim, J.-I. Sohn, and G.-S. Yoon, *Adv. Sci. Lett.*, **19**, 2558 (2013).
 31. Y. Kwack, K. K. Kim, H. Hwang, and C. Chun, *Kor. J. Hort. Sci. Technol.*, **32**, 901 (2014).
 32. S. Liu, Y. Kawagoe, Y. Makino, and S. Oshita, *Chem. Eng. Sci.*, **93**, 250 (2013).
 33. W. B. Zimmerman, M. Zandi, H. H. Bandulasena, V. Tesař, D. J. Gilmour, and K. Ying, *Appl. Energy*, **88**, 3357 (2011).
 34. J.-S. Park and K. Kurata, *HortTechnology*, **19**, 212 (2009).
 35. A. L. Klibanov, *Invest. Radiol.*, **41**, 354 (2006).
 36. J. R. Lindner, *Nat. Rev. Drug Discov.*, **3**, 527 (2004).
 37. H. S. Min, S. Son, T. W. Lee, H. Koo, H. Y. Yoon, J. H. Na, Y. Choi, J. H. Park, J. Lee, and M. H. Han, *Adv. Funct. Mater.*, **23**, 5518 (2013).
 38. S. Hernot and A. L. Klibanov, *Adv. Drug Deliv. Rev.*, **60**, 1153 (2008).