

미세기포의 식물재배활용 효과_리뷰

박영철 · 박정연[†] · 유규철^{*} · 김장균^{**}

(주)뉴워터텍

^{*}극지연구소

^{**}인천대학교

Effects of Fine Bubbles in Plant Cultivation_Review

Young Cheol Park · Jeong Yeon Park[†] · Kyu Cheul Yoo^{*} · Jang Kyun Kim^{**}

New Water Tec Co. Ltd., Incheon Korea

^{}Korea Polar Research Institute, Incheon Korea*

*^{**}Incheon National University, Incheon Korea*

(Received : 14 November 2024, Revised : 20 February 2025, Accepted : 22 May 2025)

요약

미세기포는 용존산소 증가, 물질 전달, 브라운 운동과 결합된 높은 제타 전위 등 포함한 고유한 특성으로 인해 식물재배에 중요한 종자 발아 효과, 식물의 생리적 발달 효과 등이 있다. 이에 본 논문에서는 미세기포 사용을 통해 식물재배활용 효과를 분석하기 위해 국내외 문헌 조사를 수행하였다. 그 결과, 미세기포를 사용할 경우, 벼, 상추, 토마토, 방울토마토, 수박 및 멜론의 수확량은 각각 최대 14.3%, 35%, 50%, 9.1%, 44.9% 및 31.5%가 증대된 것을 확인하였다. 이는 식물 생산성 향상과 관련한 빛의 강도, 온도, 습도 등 다른 요인에 대한 추가 연구의 필요성에도 불구하고, 미세기포의 사용은 종자 발아의 효율을 향상시킬 수 있고, 식물의 수확량을 증가시키며, 지구온난화 예방을 위한 이산화탄소 저감에도 기여할 수 있는 방안이 될 수 있다.

핵심용어 : 미세기포, 식물재배, 수확량 증대, 식량, 환경

Abstract

Fine bubbles have unique properties, including increased dissolved oxygen, mass transfer, and high zeta potential combined with Brownian motion, which are important for plant cultivation, such as seed germination effects and plant physiological development effects. Therefore, in this paper, we conducted a literature review at domestic and international articles to analyze the effects of using fine bubbles in plant cultivation. As a result, it was confirmed that when fine bubbles were used, the yields of rice, lettuce, tomatoes, cherry tomatoes, watermelon, and melon increased by up to 14.3%, 35%, 50%, 9.1%, 44.9%, and 31.5%, respectively. Despite the need for further research on other factors, such as light intensity, temperature, and humidity, related to improving plant productivity, the use of fine bubbles can be a way to improve the efficiency of seed germination, increase plant yields, and contribute to reducing carbon dioxide to prevent global warming.

Key words : Fine bubbles, Plant cultivation, Increased yield, Food, Environment

[†]Corresponding author: Jeong Yeon Park

E-mail: olivavien@naver.com

• Young Cheol Park New Water Tec Co. Ltd (ypark115@naver.com)

• Kyu Cheul Yoo Korea Polar Research Institute (kcyoo@kopri.re.kr)

• Jang Kyun Kim Incheon National University (jang.kim@inu.ac.kr)



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

세계 인구는 지속적으로 증가해 왔고, 이로 인한 식량 수요도 증가하고 있어, 2050년에는 2019년 대비 식량은 50 ~ 60% 증가가 필요하다(Falcon et al., 2022). 농업과 어업은 증가하는 인구의 식량 수요를 충족시키기 위해 생산 방식 강화를 통해 대응해 왔다. 식량 생산의 강화는 수질 오염, 인간의 건강 및 지구 온난화에 부정적인 영향을 미치는 심각한 환경 문제를 야기했다(FAO, 2002). 수질 오염은 비료와 살충제를 포함한 화학 물질의 과도한 사용으로 인해 발생하고, 비료의 과도한 질산염과 인산염은 수계에 부영양화를 일으키거나 지하수 자원으로 흡수되어 오염을 유발시킨다. 질소 비료의 과도한 사용은 토양 산성화, 대기 오염(NH_3 및 NOX 배출) 및 온실 가스 배출에 영향을 미치고, 살충제의 광범위한 사용은 인간과 다양한 야생 동물 중에 영향을 미치는 발암성 및 기타 독성 영향과 관련이 있다(Rajmohan et al., 2020). 이에 농업 및 어업 생산량을 유지하면서, 오염을 저감시킬 수 있는 효과적이고 효율적인 기술(Balsalobre-Lorente et al., 2018)이 필요하다.

미세기포(FB, Fine Bubble)는 직경 d 가 $100\ \mu\text{m}$ 미만인 모든 기포를 말하며, $1\ \mu\text{m}$ 이상의 기포(MB, Micro Bubble)와 $1\ \mu\text{m}$ 미만일 경우 기포(UFB, Ultra-Fine Bubble)로 세분화된다(Uchida et al., 2018). 미세기포에는 성질이 다른 마이크로버블과 초미세기포(나노버블)가 포함되어 있어 농업용으로 사용되는 환경수에 각각의 영향을 개별적으로 평가하기 어려워 두 가지를 결합한 효과를 제시한다(Hata et al., 2019).

미세기포는 용존산소 증가, 대량 가스 전달, 브라운 운동과 결합된 높은 제타 전위 등을 포함한 고유한 특성을 가지고 있다(Temesgen et al., 2017). 미세기포는 양액 등과 같은 물질을 전달하는데, 효과적으로 사용할 수 있는데, 이는 물질전달 함수가 표면적과 체류시간이기에 미세기포의 표면적이 넓고 부상속도가 낮아서 물질전달율을 높일 수 있기 때문에 식물의 재배효과를 향상시킬 수 있다(Tanaka et al., 2020, Yang et al. 2016).

미세기포는 화학 물질이 없으며 산업 및 환경 응용 분야에서 에너지 효율성을 높이는 동시에 생산량을 늘릴 수 있다(Ebina

et al., 2013). 이러한 특징이 있는 미세기포는 환경의 지속 가능성을 촉진하고, 지속 가능한 농업 및 어업 시스템에 대한 잠재적인 솔루션을 제공할 수 있다(Chirwa et al., 2024) (Figure 1).

따라서 본 연구의 목적은 환경에 미치는 영향을 최소화 하면서, 식물 재배에 효과적으로 활용될 수 있는 미세기포의 생성 방법, 특징 및 농업 분야의 적용 사례를 조사하여 향후 농업분야에 적용 가능성을 검토하는 것이다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 미세기포의 식물재배활용 효과를 고찰하기 위하여 미세기포 생성방법 및 식물재배 효과를 제시한 논문을 검토하였고, 그 중에서 총 14편의 국내외 기존 사례를 선정하여 고찰하였다. 이 사례들로부터 정리한 미세기포 생성 방법과 관련한 내용은 3.1절에 제시하였고, 미세기포를 활용한 식물 재배 효과는 3.2절에 제시하였다. 식물재배 효과와 관련한 사례는 식물의 발아를 촉진하는 연구와 식물의 생리적 발달 향상 분야로 구분되며, 식물의 생리활성화 관련한 사례는 Table 1에 간추려 정리하였다. 미세기포 사용으로 인한 생리활성화 효과와 관련한 논문들은 각 식물종, 효과, 생리학적 표지 및 참고논문으로 분류하여 제시하였다.

3. 결 과

3.1. 기포 및 미세기포 발생장치의 종류와 특징

기포발생장치는 다양한 산업에서 물속에 용존산소를 높이기 위한 목적으로 공기방울을 이용하는데, 이 때 물속에 공기 또는 목적에 따른 기체를 용존시키기 위해 기포를 발생시키는 장치를 기포발생장치라 하며, 미세기포 발생장치는 임펠러에 의한 부압이나 전단력 또는 압력변화 등 다양한 물리, 화학적 특징을 이용하여 미세한 크기의 기포를 생성시키는 장치이다(환경부, 2021). 본 논문에서는 환경부(2021) 및 최근에 개발되고 있는 기포 및 미세기포 발생장치의 종류와 특징을 아래에 재정리하여 제시하였다.

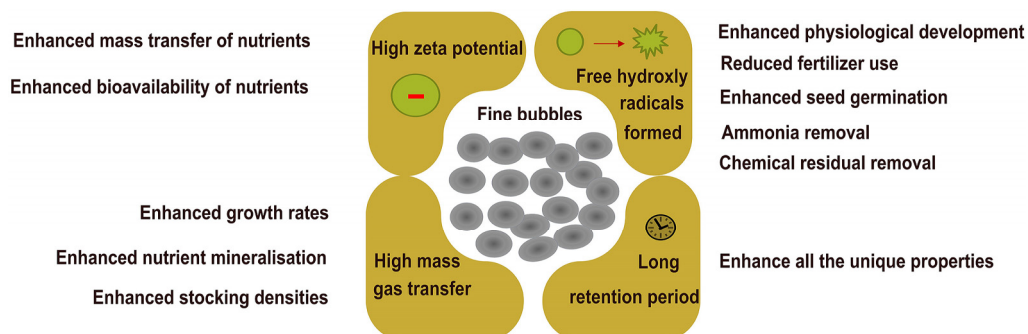


Fig. 1. Properties of fine bubbles as applied in agriculture and fisheries(Chirwa et al., 2024).

Table 1. Fine bubbles effect on plant physiological development

Crop	Effect	Physiological Marker	Reference
Rice	Increased yield by 7.9%	Total Chlorophyll	Wang et al. (2021)
Rice	•Increased yield by 4.8~10.9% of early rice •Increased yield by 6.1~14.3% of late rice	Total Chlorophyll	Qian et al. (2022)
Lettuce	Increased yield by 19.2%	Anti-oxidant capacity	Adilaksono et al. (2022)
Lettuce	Better morphological and biochemical profile	Anti-oxidant capacity	Abu-Shahba et al. (2021)
Lettuce	Increased yield by 35%	Total Chlorophyll	Marcelino et al.(2023)
Tomato	Increase growth rate by 30~50%	Peroxidase activity	Xue et al. (2023)
Cherry tomato	Increased yield by 9.1% without fertilizer	Nutrient uptake gene LeAMT2	Li et al. (2024)
Strawberry	Improved flavor	FaLOX aroma gene expression	Li et al. (2022)
Cucumis sativus	Leaf area improved by 77%	Chlorophyll a	Dahrazma et al. (2019)
Watermelon	Increased yield by 44.9% with 20% reduction in fertilizer and water in spring	Total Chlorophyll	He et al.(2022)
Muskmelon	Increased yield by 31.5% with 20% reduction in fertilizer and water in spring		
Soybean	Maximize both shoot and root growth under nutrient stress	Total Chlorophyll	Iijima et al. (2020)
Spinach	Same growth under 10% diluted nutrient solution conditions	Total Chlorophyll	Hata et al. (2019)

3.1.1 유도공기 기포발생장치

공기를 폭기조에 바로 넣거나 흡입관에 주입시킨 후 임펠러의 회전으로 생기는 부분적인 진공을 이용하여 기포를 생성 시키고, 이때 생성된 기포들 중에는 직경 100 μ m 크기 내외인 미세기포도 발생 된다. 이 장치는 구성이 간단하여 유지관리가 쉬우며 운전비용이 저렴한 특징이 있다.

3.1.2 산기식 기포발생장치

하폐수 처리시설의 반응조나 하천 및 양식장 등에서 용존 산소를 공급하는데 가장 널리 사용되고 있으며, 멤브레인이나 노즐 등을 통해 공기를 불어넣어 기포를 형성하는 방법으로 직경 1 ~ 3 mm 크기의 기포를 생성시킨다.

3.1.3 계면활성제 기포발생장치

계면활성제를 넣어서 큰 압력변화 없이 기포를 생성하는 원리로 생성된 기포의 크기가 가압식보다 작고, 양은 많다는 보고가 있다. 지속적으로 기포를 생성하기 어렵고, 용존공기 부상조의 부하율을 높이기 위해서 사용되고 있다.

3.1.4 가압식(용존공기) 미세기포 발생장치

펌프와 가압장치 및 포화기로 구성되고, 순환수를 고압으로 과포화시킨 후 반응조에서 대기압으로 압력 감소되면 직경 50 μ m 크기 이하의 기포가 생성된다. 이 장치는 상수처리장이나 해수담수시설의 전처리에서 많이 사용되고 있다.

3.1.5 Splitter식 미세기포 발생장치

최근 개발된 미세기포 발생장치로 일반펌프와 혼합챔버로 구성되어 있고, 펌프의 흡입관에는 공기흡입관과 밸브가 설치되어 유입공기량을 조절할 수 있다. 공기는 펌프의 회전으로 저기압이 형성될 때 물과 함께 흡입되며 흡입된 공기와

물은 펌프 내부의 임펠러에 의해 섞이면서 큰 공기덩어리가 잘게 쪼개지고, 혼합챔버에서는 물과 공기가 다시 혼합되고 가압되며 오리피스에 의해 쪼개지는데, 가압된 물은 유출구를 통해 대기압상태로 배출될 때 압력 감소로 기포는 직경 5 ~ 30 μ m 크기가 된다. 비교적 장치가 간단하고, 운전이 용이하다.

3.1.6 초음파를 이용한 의료용 미세기포 발생 장치

현재 유럽을 중심으로 개발되어 활용중인 의료용 미세기포를 발생시키는 장치로 치료 및 진단 목적으로 크기 1 μ m 내외의 소량 기포를 생성하는 장치로서 기포 표면에 치료 및 진단 약제를 코팅하여 활용하게 된다.

가압식 미세기포 장치와 Splitter식 미세기포 장치는 제조사 별로 같은 원리를 이용하지만 내부구조를 변형하여 크기가 훨씬 작은 나노크기의 초미세기포 발생장치로 응용하고 있으며 많이 쓰이는 초미세기포의 크기는 100~300 nm 내외이다.

3.2 미세기포의 식물재배활용 사례 및 효과

3.2.1 종자 발아 효과

미세기포는 종자의 발아를 자극하는 능력이 있음이 입증되었다(Purwanto et al., 2019a). 종자 발아의 미세기포의 발아율 향상은 미세기포가 파열될 때 만들어지는 하이드록실 라디칼(*OH, 수산화이온(OH⁻)의 중성 형태)를 생성하는 능력에 기인한다(Liu et al., 2016)(Figure 2). 생성된 하이드록실 라디칼은 스트레스 관련 메커니즘을 통해 종자 발아 활성화와 연결된다(Miransari et al., 2014a).

미세기포에 의한 종자 발아 자극은 칼륨(K⁺), 나트륨(Na⁺) 및 염화물(Cl⁻)과의 시너지 효과와도 연관되어 있다. Kim et al.(2023)은 이러한 시너지 효과가 중요하며 이러한 시너지 효과에서 미세 기포의 역할은 높은 제타 전위로 인해 이온

수송을 할 수 있음을 관찰했다. 이는 K^+ 를 포함한 이온을 씨앗으로 수송하는 데 도움을 주며 효소 활성화를 촉진하여 더 나은 발아 성공을 보장한다. 대량 가스 전달과 그에 따른 종자 발아 향상에서 미세기포의 역할도 입증되었다.

여기에서의 논의는 미세기포가 종자 발아를 향상시켜 종자 생산, 운송 및 열 전처리와 관련된 환경 영향을 줄이는 것 외에도 장기 종자 저장을 위한 솔루션을 제공한다는 것을 보여준다. 그러나, 이에 대한 확신을 위해서는 더 많은 연구가 필요하다(Chirwa et al., 2024).

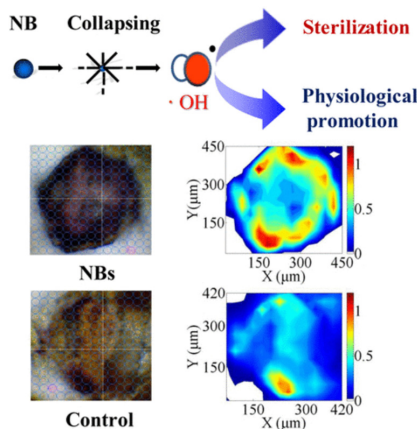


Fig. 2. Sterilization and physiological promotion of Nanobubbles (Liu et al., 2016).

Lee et al.(2023)은 미세기포가 염생식물의 하나인 해홍나물 (*Suaeda maritima*) 종자의 발아율에 미치는 영향을 조사하기 위해 기온을 각각 6, 12, 18, 24, 30°C 유지하도록 하면서, 증류수와 미세기포수를 각각 적용하여 온도 조건 및 미세기포 사용-미사용 조건에서 18일간의 종자발아율을 조사한 바 있다(Figure 3). 이에 따르면, 24°C 조건에서 미세기포수를 사용한 경우가 증류수를 사용한 경우에 비해 발아율이 약 2배 정도 증가하여 미세기포를 적용한 경우에 발아율이 향상된다는 결과를 보여주었다.

3.2.2 식물의 생리적 발달 효과

미세기포는 총 엽록소량, 영양소 상향 조절 유전자, 식물 항산화 능력, 활성 뿌리 흡수 면적, 특정 잎 면적(SPAD), 순 광합성 속도 및 과산화효소 활성 등과 같은 식물의 생리적 발달 향상에도 기여한다. 이러한 개선은 주로 미세기포가 파열될 때 만들어지는 하이드록실 라디칼이 식물 생리를 향상시키는 영양 흡수 유전자와 효소를 상향 조절하는 데 상당한 영향을 주기 때문이다(Chirwa et al., 2024).

Wang et al.(2021)은 쌀 묘목에 대한 미세기포의 영향을 분석한 결과, 미세기포를 투여할 경우 식물의 높이와 뿌리의 길이가 각각 25%, 52% 이상 크게 증가하는 것으로 확인하였다(Figure 4). 그리고 미세기포를 투여한 경우의 쌀 수확량이 약 8% 정도 더 높게 나타났음을 제시하였다.

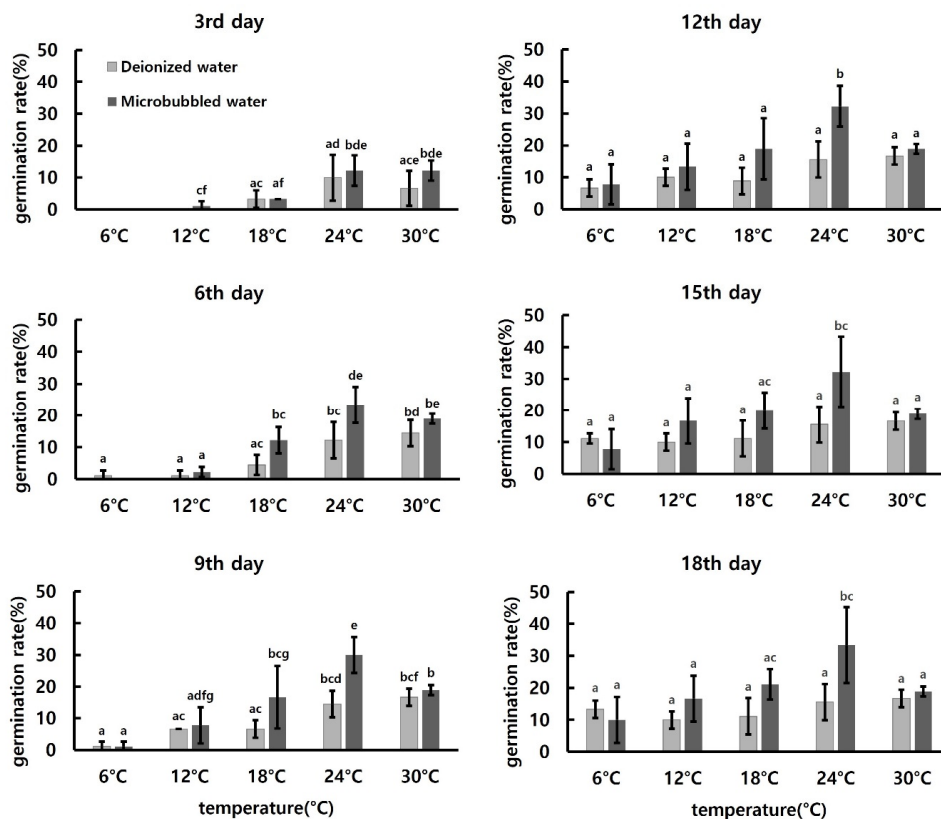


Fig. 3. Germination rates of *Suaeda maritima* seeds in deionized water or MBs water at different temperatures at day 3, 6, 9, 12, 15 and 18(Lee et al., 2023).

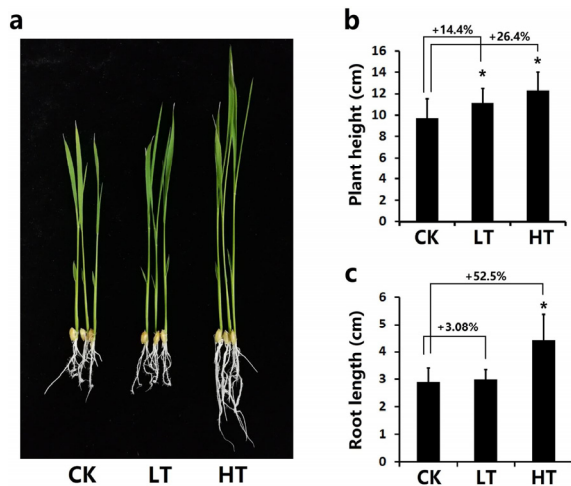


Fig. 4. Image of representative growth phenotype of three-leaf-stage rice seedlings selected from the three groups: non-treatment control (CK), low-frequency treatment (LT) and high-frequency treatment (HT). (b) and (c) Growth trait analysis of rice seedlings in the three groups, showing plant height (b) and root length (c). Student's t-test: *, $p < 0.05$. Data are means $\pm$ SD ($n = 48$ plants)(Wang et al., 2021).

미세기포를 사용한 식물 생산성은 토양에서 양전하를 띤 영양소의 균일한 분포를 지원하는 흡착 및 브라운 운동을 가능하게 하는 높은 제타 전위를 통해 더욱 향상된다(Azevedo et al., 2016). 높은 제타 전위는 또한 극성 물질인 물과의 음의 소수성 상호 작용을 통해 물의 표면장력을 감소시켜 뿌리가 영양분을 더 쉽게 흡수할 수 있도록 한다(Wang et al., 2021).

또한, 미세기포는 물속의 용존산소(DO) 농도를 증가시키는 것으로 알려져 있고, 이는 상추와 물고기로 구성된 수경재배에 미세기포를 도입한 Marcelino et al.(2023)에 의해 아쿠아포닉스에서 입증되었다(Figure 5). 이 연구는 미세기포를 이용한 폭기가 기존 폭기의 6.32mg/L에 비해 DO 농도를 9.31mg/L로 높였다는 것을 보여주었다. 미세기포로 인한 높은 DO 수치는 질화 박테리아의 향상된 작용으로 인해 질산염 농도를 증가시키고, 그 결과 상추의 전체 수확량이 35% 증가했다. 수경재배 어항에 남아 있는 물고기의 배설물과 사료는 미생물 분해 후 식물에 영양분으로 공급하고, 식물은 미생물이 작용한 후 오염물질을 흡수하여 물고기의 물을 정화하는 데 도움을 주었다. 아쿠아포닉스에서 상추 배양 탱크의 물은 어항으로 다시 펌핑하기 전에 병원균을 제어하기

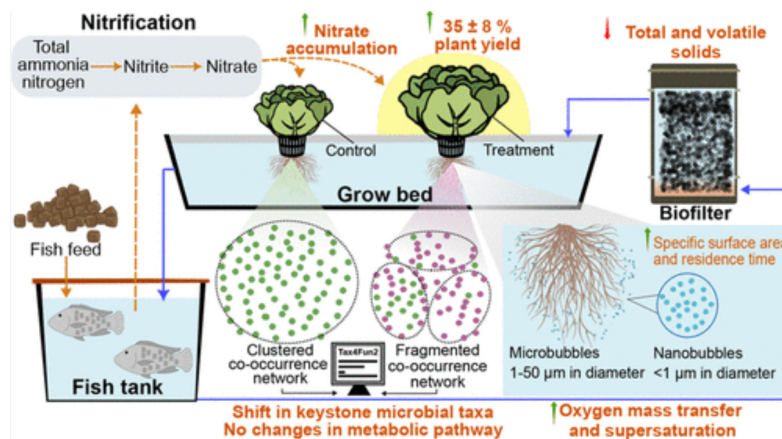


Fig. 5. Micro - nano bubble aeration enhances plant yield and nitrification in aquaponic systems (Marcelino et al., 2023)

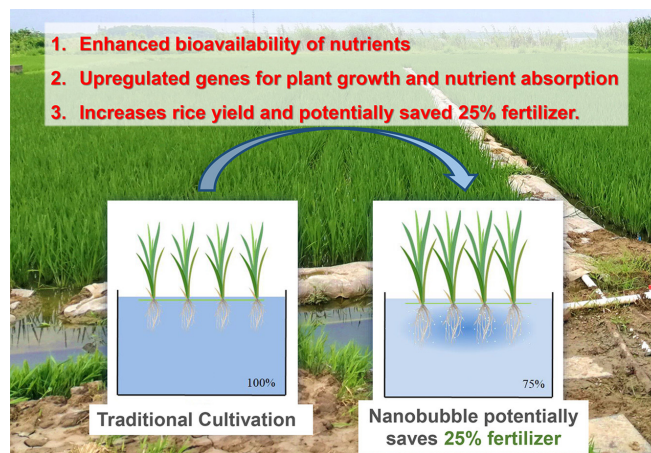


Fig. 6. Nanobubbles promote nutrient utilization and plant growth in rice by upregulating nutrient uptake genes and stimulating growth hormone production(Wang et al., 2021)

위해 오존 미세기포로 소독할 수 있다(Marcelino et al., 2023).

Wang et al.(2021)은 미세기포와 함께 비료를 25% 적게 사용하는 것을 성공적으로 시연했으며 전통적으로 재배된 쌀과 유사한 수확량을 얻을 수 있었다(Figure 6). 영양소 흡수 유전자에 대한 하이드록실 라디칼 강화는 제한된 영양소를 활용하고 더 나은 수확량을 생산하는 쌀의 능력을 향상시켰다. 마찬가지로 He et al.(2022)는 기존의 재배 방식에 비해 미세기포 사용(Figure 7)을 통해 물과 비료를 20% 적게 사용하면서 수박(봄 44.9%, 가을 45.6%)과 멜론(봄 31.46%, 가을 11.37%)의 수확량이 개선되었음을 보여주었다.

Iijima et al.(2020)은 8년 동안 인공 조명 하에 통제된 환경실에서 저영양 및 고영양 수준으로 수경재배된 대두 묘목의 성장에 물(UFB ; Ultrafine bubbles 첨가), 저산소증(통기), 유체 이동(교반)의 세 가지 실험 요소가 미치는 영향을 분석했다(Figure 8). 연구결과, UFB 물은 테스트된

스트레스 환경에서 식물 성장을 효과적이고 크게 향상시켰다. 전반적으로 UFB 물은 영양 결핍 스트레스 하에서 새싹과 뿌리 성장을 모두 극대화했다. 대조적으로, 유리한 영양분 공급(즉, 식물 성장에 이상적인 환경)에 서는 UFB 물에 의한 새싹 성장 향상이 뚜렷하지 않았으며 이 경우 뿌리 바이오매스가 실제로 감소했다. UFB 수에 의해 식물 성장과 생산성 향상에 영향을 미치는 환경 요인을 완전히 이해하기 위해서는 빛의 강도, 온도, 습도 등 다른 요인을 분석하기 위한 추가 연구가 필요함을 주장했다.

식물은 뿌리 주변에서 물과 영양분을 흡수하며, 식물의 성장에 적합한 온도, 습도, 광량과 이산화탄소 농도로 재배하더라도 뿌리가 건강하게 자라지 않으면 식물의 성장이 크게 방해받는다(Hata et al., 2019). 산소요구량이 높은 곳에서는 뿌리끝 부근의 세포들이 활발하게 분열하여 성장하는데, 영양액의 용존산소량이 감소함에 따라 실제로

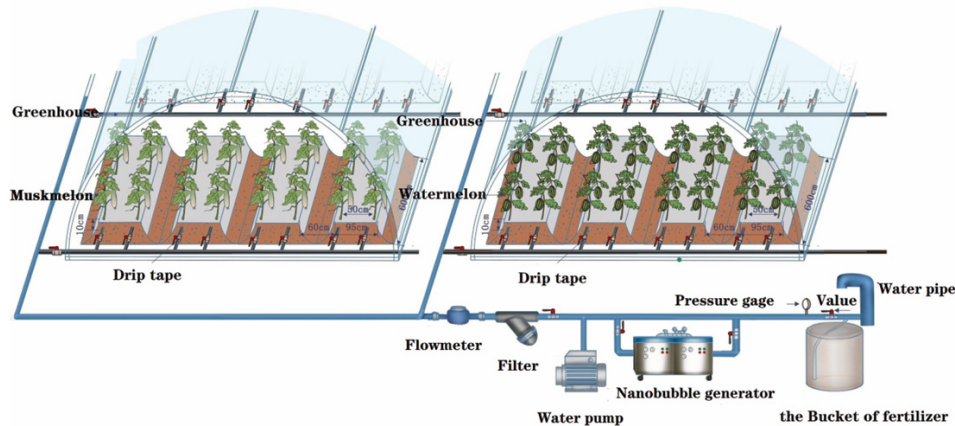


Fig. 7. Diagram of the test system layout and planting patterns(He et al., 2022)

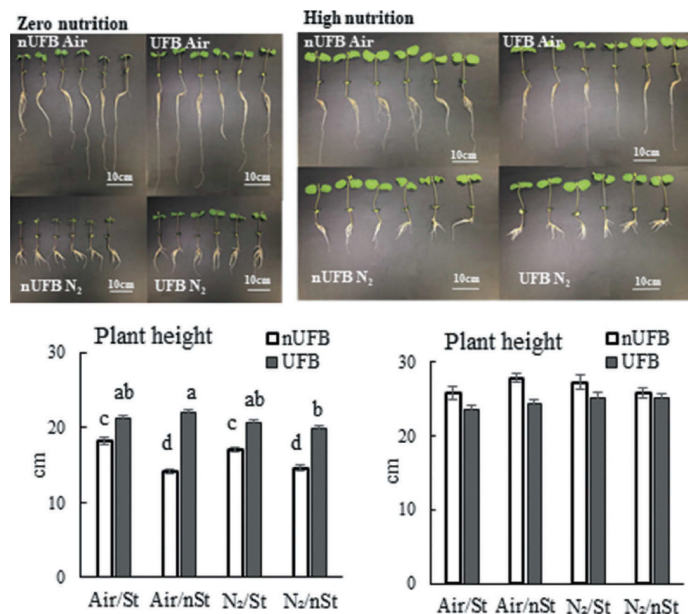


Fig. 8. Plant height, tap-root length, and shoot/root ratio of soybean seedlings under different nutrition, water, gas flow, and fluid movement conditions. UFB, UFB water; nUFB, deionized water; Air, airflow; N₂, N₂ gas flow; St, stirring; nSt, non-stirring(Iijima et al., 2020)

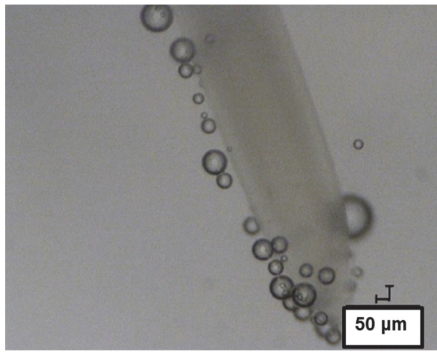


Fig. 9. Fine bubbles absorbed to the roots(Hata et al., 2019)

뿌리의 호흡률도 저하되는 것으로 알려져 있다. 또한, 영양액의 용존산소량이 감소하여 뿌리에 산소공급이 부족할 경우 호흡률에 따라 양분의 흡수도 감소한다.

관수를 위한 미세기포의 활용에 있어서 용존산소 이외에 관수에 첨가되는 영양액의 국부적인 영양농도에 대해서는 효과가 있을 것으로 기대되며, 이는 중성 범위에 있을 때 음전하를 띠는 미세기포와 미세기포 주위에 양이온 영양분의 농도가 발생한다는 것을 의미한다. 실제로 이러한 상태는 영양재배에서 뿌리에 다량의 미세기포가 부착되는 것이 관찰된다(Figure 9). 이러한 요인으로 인해 영양재배 시 뿌리 주변에 영양분의 농도가 높아질 것으로 예상되고, 시금치를 1/10로 희석한 영양액 조건에서 영양액 재배를 하였고, 용존산소량이 일정한 미세한 기포부와 디퓨저관을 갖춘 통기부로 구성하였다. 그 결과, 미세기포 구간은 Figure 10의 오른쪽과 같이 대조구(희석하지 않은 영양액에 대해 통기 처리를 실시함)와 동일한 수준의 성장상태를 나타내었다(Hata et al., 2019).

3.2.3 이산화탄소 저감 효과

이상과 같이 미세기포 이용한 식물 재배는 식물의 생체량 증가를 통해 탄소 저감에 기여할 수 있다(IPCC, 2003). 미세기포는 물속 용존산소 농도를 높여 뿌리 호흡 및 영양분 흡수를 촉진하고, 광합성 효율을 향상시켜 식물의 성장 속도를 가속화한다. 예를 들어, Marcelino et al.(2023)의 연구에서는 아쿠아포닉스 시스템에서 미세기포 처리 후 용존산소 농도가 9.31 mg/L로 증가하였으며, 이로 인해 상추의 생체량이 35%

증가하였다. 이는 탄소흡수량 계산식(IPCC, 2003)에서 탄소흡수량이 식물의 순생장량과 비례관계에 있음을 감안하면, 미세기포 사용으로 인해 약 35%의 이산화탄소가 저감된 것을 예상할 수 있다.

$$\text{탄소순흡수량}(\text{tCO}_2) = \Delta V \times D \times \text{BEF} \times (1+R) \times \text{CF} \times 44/12$$

여기서, ΔV = 임목 순생장량 (m^3), D = 목재기본밀도, BEF = 바이오매스 확장계수, R = 뿌리함량비, CF = 탄소전환계수(IPCC 기본값=0.5), $44/12$ = 이산화탄소 전환계수이다.

미세기포 처리 작물의 수확량 증가에 따라 탄소 흡수량이 유의미하게 증가하는 것으로 추정된다. 벼, 상추, 토마토, 수박 등 다양한 작물에서 미세기포 처리를 통한 탄소 저감 효과가 확인되었으며, 이는 지속 가능한 농업 및 기후 변화 대응에 중요한 기여를 할 수 있다.

4. 고 찰

미세기포가 식물재배에 활용될 경우 상당한 효과가 있는 것으로 나타났다. 미세기포 사용을 통해 식물재배활용 효과를 분석하기 위해 검토된 논문에 따르면, 미세기포를 사용할 경우, 벼, 상추, 토마토, 방울토마토, 수박 및 멜론의 수확량은 각각 최대 14.3%, 35%, 50%, 9.1%, 44.9% 및 31.5%가 증대된 것으로 나타났다.

미세기포 사용에 따른 성장률 및 수확량 증가 효과는 1) 기포 파열시 발생하는 하이드록실 라디칼($\cdot\text{OH}$, 수산화이온(OH^-)의 중성 형태)이 식물 생리를 향상시키는 영양 흡수 유전자와 효소를 상향 조절하는 데 상당히 긍정적인 영향을 주는 작용과 함께 2) 식물재배를 위한 영양액을 사용할 경우 기포 표면에 형성되는 음전하를 띠는 제타 전위에 의해 미세기포와 미세기포 주위에 양이온 영양분의 효과적 농도가 발생하여 영양 재배 시 뿌리 주변에 영양분의 농도가 높아지고, 3) 발생된 높은 제타전위는 극성 물질인 물과의 음의 소수성 상호 작용을 통해 물의 표면장력을 감소시켜 뿌리가 영양분을 더 쉽게 흡수할 수 있도록 하는 통합적인 요인에 기인하는 것으로 분석된다. (Chirwa et al., 2024; Hata et al., 2019; Wang et al., 2020).

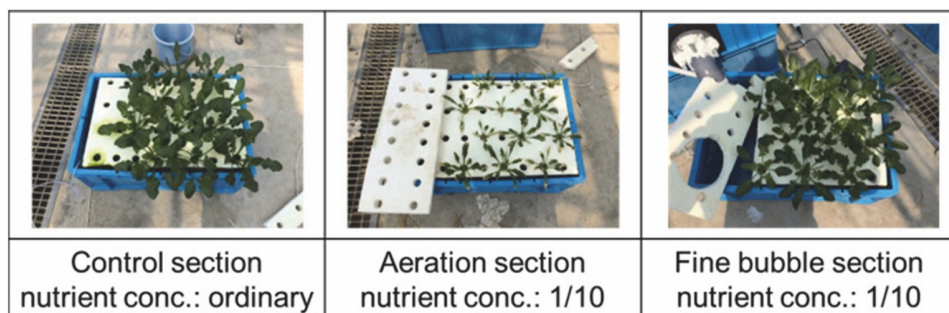


Fig. 10. Fine bubble's effect on spinach nutriculture(Hata et al., 2019)

결론적으로 현재까지의 활용추세를 살펴보면 식물배양에서 가장 큰 효과를 나타내는 분야는 미세기포의 물질전달 기능을 활용하는 분야로서 비료 또는 양액의 유효성분을 식물조직에 효과적으로 작용하게 하는 역할이라 할 수 있다. 미세기포의 사용은 화학 비료 사용을 줄이고, 식물의 수확량을 증가시키며, 종자 발아의 효율을 향상시킬 수 있어, 기후 변화 환경에서 인류에게 더 깨끗하고 탄력적인 식량 생산 시스템을 달성하는 방안이 될 수 있다. 또한, 미세기포를 이용한 식물 재배 시 지구온난화 예방을 위한 이산화탄소 저감에도 기여할 수 있는 유용한 기술이다.

미세기포 사용에 따른 이러한 효과들은 종자 발아의 경우와 식물 성장의 경우에 각각 그 효과성의 정도가 다르고 종에 따라서도 차이가 발생하므로 미세기포에 의해 종별 식물 성장과 생산성 향상에 영향을 미치는 환경 요인을 완전히 이해하기 위해서는 빛의 강도, 온도, 습도 등 적정 배양조건 등을 탐색하는 추가연구가 필요한 것으로 사료된다. 또한 향후에는 미세기포의 살균 기능과 기체 용존도 향상 기능을 이용하여 이산화탄소 등의 기능성 기체를 활용하는 활용 방법들에 대한 연구도 필요하다. 따라서 향후 연구 과제들로는 미세기포를 이용하는 여러가지 상업적 식물의 발아 및 성장 연구는 물론 서식처 복원 및 서식처 건강성 회복에 필요한 염생식물, 해초류 및 해조류 배양조건 탐색에 대한 연구들에 집중될 것으로 사료된다.

Acknowledgement

본 연구를 위해 귀한 조언을 해주신 서울대학교 박현주 교수님, 김충일 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 본연구는 한국환경산업기술원의 습지생태계 가치평가 및 탄소흡수 가치증진 기술개발사업의 지원을 받아 이루어졌습니다 (2022003630003).

References

- 환경부, 한국환경산업기술원. 2021. 이동형 조류제거선을 위한 막힘없는 맞춤형 기포발생장치 개발 최종보고서. p220.
- Abu-Shahba, M.S., Mansour, M.M., Mohamed, H.I. et al. 2021. Comparative Cultivation and Biochemical Analysis of Iceberg Lettuce Grown in Sand Soil and Hydroponics With or Without Microbubbles and Macrobubbles. *J Soil Sci Plant Nutr* 21, 389–403
- Adilaksono, I.C., Nakashima H. Miyasaka J. and Ohdoi K., 2022. Effect of different ultrafine bubble content in nutrient solution on lettuce (*Lactuca sativa* L. Cv. Frillice): growth, superoxide radical accumulation, and total antioxidant capacity. *Environ. Control Biol.* 60 (4), 195–204.
- Azevedo, A., et al., 2016. Aqueous dispersions of nanobubbles: generation, properties and features. *Miner. Eng.* 94, 29–37
- Balsalobre-Lorente, D., et al., 2018. How economic growth, renewable electricity and natural resources contribute to CO2 emissions? *Energy Pol.* 113, 356–367.
- Chirwa W., Li P., Zhan H., Zhang Y., Liu Y., 2024. Application of fine bubble technology toward sustainable agriculture and fisheries, *Journal of Cleaner Production*, 449, 141629, ISSN 0959-6526.
- Ebina, K., et al., 2013. Oxygen and air nanobubble water solution promote the growth of plants, fishes, and mice. *PLoS One* 8 (6), e65339
- Falcon, W.P., Naylor, R.L., Shankar, N.D., 2022. Rethinking Global Food Demand for 2050. *Population and Development Review* 48 (4), 921–957
- FAO, 2002. *World Agriculture: towards 2015/2030*. Rome.
- Hata, T., Nishiuchi, Y. & Minagawa, H. 2019. Development of new agriculture and aquaculture technology using fine bubbles. *International Journal of Plasma Environmental Science and Technology*, 12, 39–43
- He, J., Liu Y., Wang T., Chen W., Liu B. Zhou Y., Li Y. 2022. Effects of nanobubble in subsurface drip irrigation on the yield, quality, irrigation water use efficiency and nitrogen partial productivity of watermelon and muskmelon. *Int. Agrophys.* 36 (3), 163–171
- Iijima, M., Yamashita, K., Hirooka, Y., Ueda, Y., Yamane, K., & Kamimura, C. 2020. Ultrafine bubbles effectively enhance soybean seedling growth under nutrient deficit stress. *Plant Production Science*, 23(3), 366–373.
- IPCC, 2003. *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*.
- Kim, M., Shoji A., Kobayashi T., Shirai Y., Sugawa S., Takahashi M. 2023. Accelerated germination of aged recalcitrant seeds by K⁺-rich bulk oxygen nanobubbles. *Sci. Rep.* 13 (1), 3301
- Lee, Na & Xing, Qikun & Park, Ji-Sook & Park, Young & Yarish, Charles & Kim, Jang. (2023). Effects of microbubbles and temperature on the germination of the saltmarsh plant, *Suaeda maritima* (L.) Dumort. 10.21203/rs.3.rs-3181537/v1.
- Liu, S. Oshita S., Makino Y., Wang Q., Kawagoe Y., Uchida T. 2016. Oxidative capacity of nanobubbles and its effect on seed germination. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 4 (3), 1347–1353
- Li L., Wang J., Jiang K., Kuang Y., Zeng Y., Cheng X., Liu Y., Wang S., Shen W. 2022. Preharvest application of hydrogen nanobubble water enhances strawberry flavor and consumer preferences, *Food Chemistry*, Volume 377, 131953

- Li, M.; Zhu, G.; Liu, Z.; Li, L.; Wang, S.; Liu, Y.; Lu, W.; Zeng, Y.; Cheng, X.; Shen, W. 2024. Hydrogen Fertilization with Hydrogen Nanobubble Water Improves Yield and Quality of Cherry Tomatoes Compared to the Conventional Fertilizers. *Plants* 2024, 13, 443
- Miransari, M., Smith, D.L., 2014a. Plant hormones and seed germination. *Environ. Exp. Bot.* 99, 110–121
- Marcelino, K.R., Wongkiew S., Shitanaka T., Surendra K. C., Song B., and Khanal S.K. 2023. Micronanobubble aeration enhances plant yield and nitrification in aquaponic systems. *ACS ES&T Engin.* 3 (11), 2081–2096
- Rajmohan, K., Chandrasekaran, R., Varjani, S., 2020. A review on occurrence of pesticides in environment and current technologies for their remediation and management. *Indian J. Microbiol.* 60, 125–138.
- Purwanto, Y.A., et al., 2019a. Effect of ultrafine bubbles water on seed germination. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 355, 12073
- Qian, Y.; Guan, X.; Shao, C.; Qiu, C.; Chen, X.; Chen, J.; Peng, C. 2022. Effects of Different Concentrations of Micro–Nano Bubbles on Grain Yield and Nitrogen Absorption and Utilization of Double Cropping Rice in South China. *Agronomy*, 12, 2196.
- Tanaka, S., Kastens, S., Fujioka, S., Schlüter, M., Terasaka, K., 2020. Mass transfer from freely rising microbubbles in aqueous solutions of surfactant or salt. *Chemical Engineering Journal*. Volume 387. 121246
- Temesgen, T., et al., 2017. Micro and nanobubble technologies as a new horizon for water–treatment techniques: a review. *Adv. Colloid Interface Sci.* 246, 40–51.
- Uchida, T.; Nishikawa, H.; Sakurai, N.; Asano, M.; Noda, N. 2018. Ultra–Fine Bubble Distributions in a Plant Factory Observed by Transmission Electron Microscope with a Freeze–Fracture Replica Technique. *Nanomaterials*, 8, 152.
- Wang Y, Wang S, Sun J, Dai H, Zhang B, Xiang W, Hu Z, Li P, Yang J, Zhang W. 2021. Nanobubbles promote nutrient utilization and plant growth in rice by upregulating nutrient uptake genes and stimulating growth hormone production. *Sci. Total Environ.* 800, 149627
- Xue S., Gao J., Liu C., Marhaba T., Zhang W. 2023. Unveiling the potential of nanobubbles in water: Impacts on tomato's early growth and soil properties, *Science of The Total Environment*, Volume 903, 166499.
- Yang, Z., Cheng, J., Lin, R., Zhou, J., Cen, K. 2016. Improving microalgal growth with reduced diameters of aeration bubbles and enhanced mass transfer of solution in an oscillating flow field. *Bioresource Technology*. Volume 211. 429–434.