

## C1-가스 생물전환 공정의 물질전달 효율 향상을 위한 최근 연구 동향

강응수\*\*\* · 최유성\*†

\*충남대학교 응용화학공학과  
34134 대전광역시 유성구 대학로 99  
\*\*한국에너지기술연구원 바이오자원순환연구실  
34129 대전광역시 유성구 가정로 152

(2025년 2월 13일 접수, 2025년 5월 14일 수정본 접수, 2025년 6월 10일 채택)

### Recent Advances on Enhancing Mass Transfer Efficiency in C1-Gas Bioconversion Processes

Eungsu Kang\*\*\* and Yoo Seong Choi\*†

\*Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea  
\*\*Bioenergy and Resources Upcycling Research Laboratory, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 34129, Korea  
(Received 13 February 2025; Received in revised from 14 May 2025; Accepted 10 June 2025)

#### 요 약

메탄(CH<sub>4</sub>)과 일산화탄소(CO)와 같은 C1-가스를 활용한 미생물 생물전환 공정은 지속 가능한 탄소자원 활용 기술로 주목받고 있으나, 낮은 기체 용해도와 물질전달 효율 저하가 주요 제한 요인으로 작용한다. 이를 극복하기 위해 생물 반응기 구조 최적화, 기체 확산 촉진 첨가제, 그리고 나노유체 적용을 통한 물질전달 성능 향상 전략이 연구되고 있다. 본 총설에서는 산업적 활용도가 높은 CH<sub>4</sub> 및 CO를 중심으로, 생물전환 공정에서 낮은 용해도와 세포독성 등의 물질전달의 주요 장애요소를 지닌 이들 가스의 물질전달 향상을 위한 최신 연구 동향을 고찰하였다. 다양한 반응기 설계를 통해 기체 공급을 극대화하고, 계면활성제 및 전해질을 활용하여 기포 안정성을 조절하는 방안을 논의하였다. 또한, 나노입자가 안정적으로 분산된 나노유체가 기체-액체 계면적을 증가시키고, 브라운 운동 및 대류 확산을 촉진하여 기체 용해도를 향상시키는 데 기여할 수 있음을 정리하였다. 특히, 생체친화적인 나노소재로 구성된 나노유체는 미생물과의 직접적인 상호작용을 통해 물질전달 저항을 줄이고, CH<sub>4</sub> 및 CO의 생물전환 효율을 개선하는 기능을 수행할 것으로 전망된다. 향후, C1-가스 물질전달 효율 향상 기술은 반응기 설계와 결합하여 물질전달 성능을 극대화하는 방향으로 발전할 것이며, 산업적 규모에서의 적용을 통해 보다 효율적인 C1-가스 전환 공정이 구현될 것으로 기대된다. 이를 통해, 저탄소-친환경 바이오프로세스로의 전환이 가속화될 것이며, 생물전환 기술의 상업적 활용 범위도 확대될 것이다.

**Abstract** – Microbial bioconversion of C1-gases, such as methane and carbon monoxide, is a promising approach for sustainable carbon utilization but faces challenges due to poor gas solubility and mass-transfer limitations. To address these issues, recent studies have explored enhancing mass transfer efficiency through modifications in bioreactor configuration and design, gas diffusion-enhancing additives, and biocompatible nanofluids. This review provides an overview of various bioreactor configurations and the role of surfactants and electrolytes in improving gas solubility and enhancing the mass transfer coefficient ( $k_L a$ ). Additionally, nanofluids with stably suspended nanoparticles can increase gas-liquid interfacial area, promote Brownian motion and convective diffusion, and enhance gas solubility. Biocompatible nanofluids composed of functional bio-nanomaterials may further mitigate mass transfer limitations through direct interactions with microorganisms, improving C1-gas bioconversion efficiency. Future developments will integrate these strategies with advanced bioreactor configurations, enabling scalable and eco-friendly C1-gas microbial bioconversion.

Key words: C1-gas bioconversion, Mass transfer, Bioreactor, Additive, Nanofluid

#### 1. 서 론

메탄(CH<sub>4</sub>)과 일산화탄소(CO)와 같은 C1-가스는 지구 온난화의 주요 원인이지만, 고부가가치 화학물질과 연료를 생산하는 유용한 원료로 활용될 수 있다. 최근 지속 가능한 탄소중립 공정에 대한

† To whom correspondence should be addressed.

E-mail: biochoi@cnu.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/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

산업적 관심이 높아지면서, CH<sub>4</sub>와 CO를 이용한 생물전환 공정이 주목받고 있다. 이 공정은 상온·상압의 온화한 조건에서 CH<sub>4</sub>와 CO를 고부가가치 화합물로 전환할 수 있다는 장점을 가진다(Fig. 1) [1-4]. 특히, CH<sub>4</sub> 및 CO를 활용하는 미생물은 다양한 고부가가치 화합물을 선택적으로 생산할 수 있어 효과적인 세포 공장으로 활용될 수 있다[4-6]. 그러나 생물전환 공정에서 미생물이 이러한 C1-가스를 효율적으로 활용하는 데는 여러 어려움이 따른다. 이는 주로 수용액에서 기체의 용해도가 낮고, 기체-액체 및 액체-고체 계면에서 물질 전달 효율이 떨어지기 때문이다[7-9]. 또한, CO의 경우 세포가 빠르게 소비하지 못하고 배지에 축적되면, CO의 독성으로 인해 세포 내 효소 활성이 저해되고 세포막이 손상될 수 있다. 이로 인해 생물전환 공정의 환경이 변화하며, 미생물 세포를 장기간 안정적으로 활용하는 데 어려움이 발생할 수 있다[10,11]. 따라서, C1-가스를 생물전환공정에 효율적으로 활용하기 위해서는 C1-가스의 세포로의

낮은 물질전달 효율을 극복하는 것은 매우 중요하다.

생물전환 공정에서는 세포 농도가 증가함에 따라 기질 공급 속도가 생산성을 제한하는 주요 요인이 된다. 액체 기질을 사용하는 경우, 생물반응기 내에서 기질의 공급과 배출 속도를 정밀하게 조절함으로써 적절한 기질 농도를 유지할 수 있다. 그러나 CH<sub>4</sub>와 CO와 같은 기체를 탄소원으로 활용할 때는 기체의 낮은 용해도와 제한적인 물질전달 특성으로 인해 원하는 기질 농도를 확보하는 것이 매우 어렵다(Fig. 2)[12]. 일반적으로 C1-가스를 활용한 생물전환 공정에서 물질전달은 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있으며, 이를 바탕으로 물질전달 효율을 향상시키기 위한 전략으로는 (1) 물질전달 계수(k<sub>L</sub>a) 및 C1-가스 용해도(C\*<sub>C1</sub>)를 향상시키거나, (2) 세포의 C1-가스 흡수효율(q<sub>m</sub>)을 강화하는 방향이 제시된다.

$$\frac{dC_{C1}}{dt} = k_L a (C_{C1}^* - C_{C1}) - q_m X$$

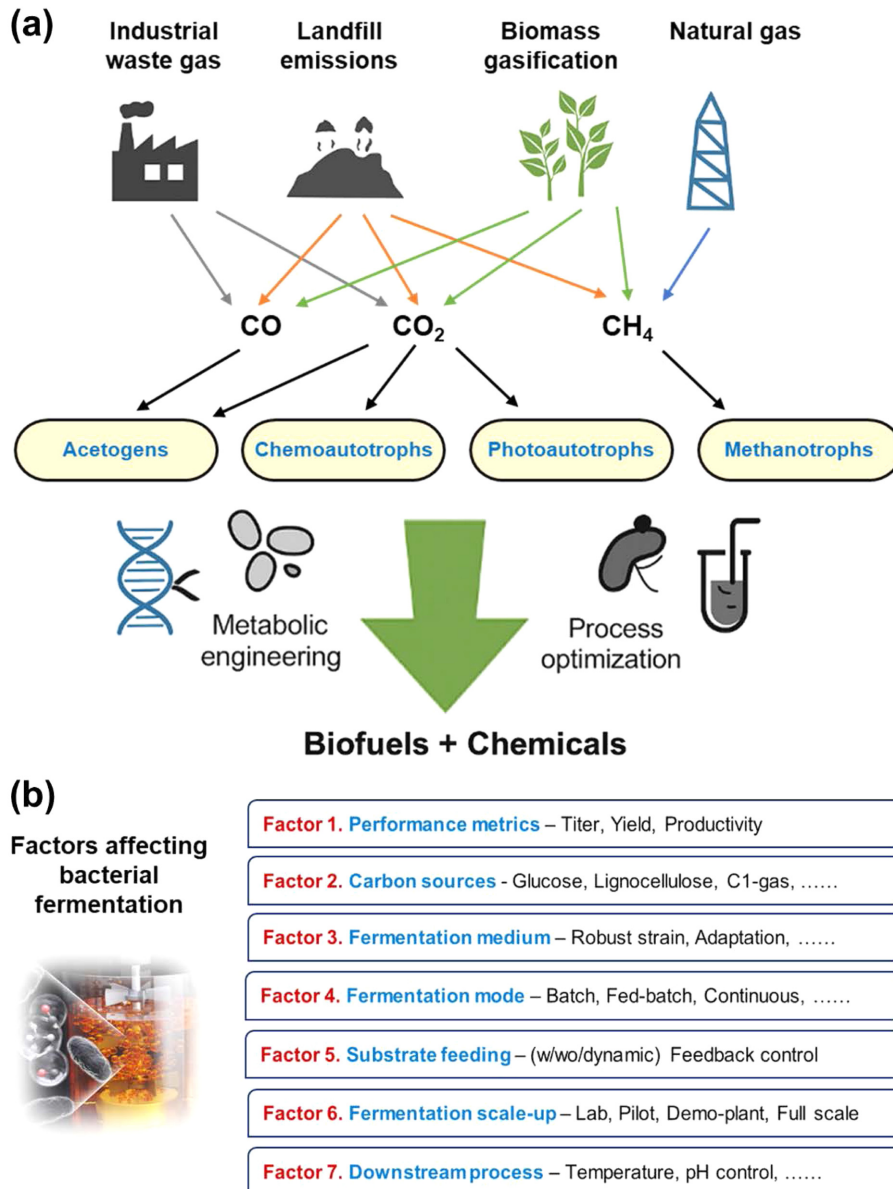


Fig. 1. (a) Microbial C1-gas bioconversion for chemical production by integrating waste gas utilization with industrial processes. Redrawn and modified from [3]. (b) Enhanced microbial fermentation strategies to improve conversion efficiency for commercial applications. Redrawn and modified from [4].

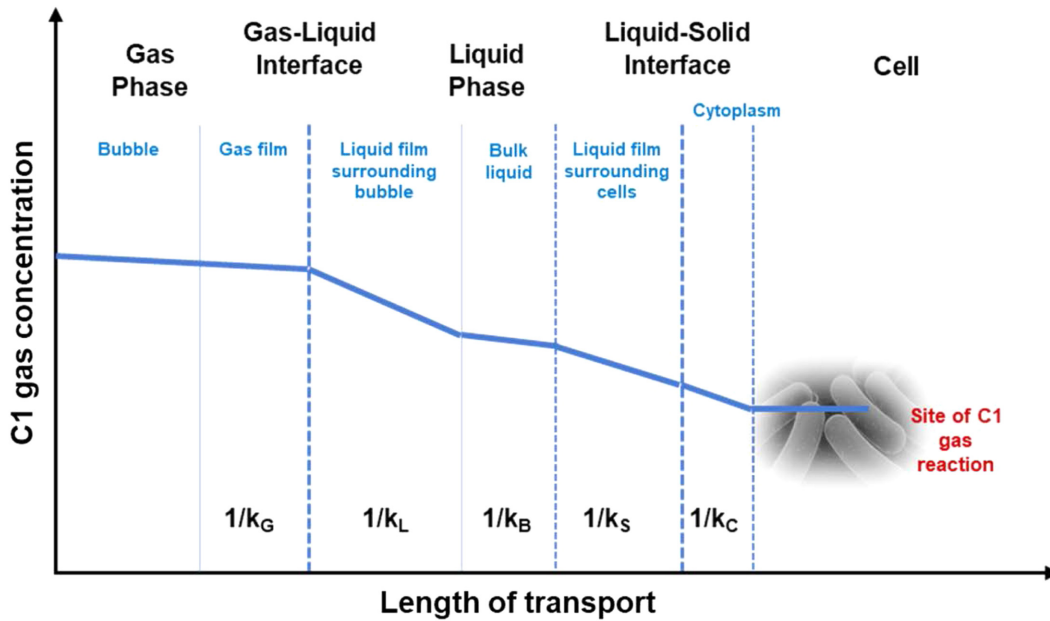


Fig. 2. Steps and resistances for oxygen transfer from gas bubble to cell. Redrawn and modified from [12].

- $C_{C1}$  : the concentration of dissolved C1-gas
- $k_L$  : the liquid-side mass transfer coefficient
- $a$  : the specific interfacial area between gas and liquid
- $k_L a$  : the overall volumetric mass transfer coefficient
- $C_{C1}^*$  : the saturation concentration of C1-gas under the same temperature and pressure
- $q_m$  : the specific uptake rate of C1-gas per unit biomass
- $X$  : the biomass concentration in the reactor

구체적으로 기체-액체 간 물질전달을 향상시키기 위해, 기체 및 액체의 유속을 증가시키거나, 기체 용해도를 높일 수 있는 용매를 첨가하거나, 고압 조건에서 생물전환 반응을 진행하는 방식이 활용되고 있다. 또한,  $k_L a$ 를 향상시켜 물질전달 속도를 증가시키는 연구도 활발히 진행되고 있다. 많은 연구가 교반조 반응기(stirred-tank reactor)에서 수행되었으며, 대부분 교반 속도와  $k_L a$  간의 관계를 분석하는 방식으로 진행되었다[13,14]. 그러나 교반조 반응기는 스케일업 과정에서 과도한 동력 소비로 인해 운영 비용이 증가하는 한계를 가진다. 이에 따라, 최근에는 보다 경제적인 운영이 가능한 컬럼형 생물반응기에 대한 관심이 높아지고 있다. 또한, 나노기공을 갖는 고분자 분리막이나 나노기포를 생성하는 스파저를 활용하여 기포를 미세하게 형성함으로써 물질전달 효율을 향상시키는 연구가 활발히 진행되고 있다[15,16]. 이와 유사하게, 계면활성제, 고분자 알코올, 생체고분자를 활용하여 배양액의 표면장력을 감소시키거나 기포 응집을 방지함으로써 기체-액체 계면적을 넓히는 방식으로  $k_L a$ 를 개선하는 연구도 진행되었다[17]. 이러한 접근법은 기포의 안정성을 높이고, 보다 균일한 기체 확산을 유도하여 물질전달 효율을 향상시키는 데 기여한다[18,19]. 나아가, 최근 연구에서는 생체친화적인 나노입자가 안정적으로 분산된 나노유체를 활용하여 기체 용해도를 증가시키거나,  $k_L a$ 를 향상시켜 기체-액체 간 물질전달 효율을 효과적으로 개선하는 방안이 제시되고 있다[20]. 이러한 나노유체는 기포의 응집을 억제하고 기체의 확산을 촉진하며, 미생물과의 상호

작용을 통해 보다 안정적인 기체 공급 환경을 조성하는 역할을 한다[9,21]. 뿐만 아니라, 나노유체를 구성하는 나노입자를 기능화함으로써 CO 가스가 나노입자에 효과적으로 흡착될 수 있도록 설계할 수 있다[11,21]. 이를 통해, CO가 배양액 내에서 하나의 완충제로 작용하여 미생물에 미치는 독성을 완화하고, 생물전환 공정에서 CO의 기질 저해 효과를 줄이는 역할을 한다. 이러한 접근법은 CO를 활용한 미생물 전환 공정의 안정성을 높이고, 보다 효율적인 기체 활용을 가능하게 한다. 이처럼 C1-가스를 이용한 생물전환 공정에서 낮은 물질전달 효율을 개선하기 위한 다양한 접근법이 연구되어 왔다. 물론, 연구 환경에서 검증된 고효율 물질전달 시스템이 실제 산업 환경에서도 동일한 성능을 유지하며 경제적으로 적용될 수 있는지는 여전히 검토가 필요하다. 그러나 이러한 한계를 극복하기 위한 방안으로 생물반응기 설계의 최적화, 물질전달을 촉진하는 첨가제 개발, 그리고 나노소재 기반 나노유체의 활용이 중요한 연구 방향으로 제시되고 있다. 이러한 관점에서, 본 총설에서는 C1-가스, 특히  $CH_4$  및 CO를 이용한 생물전환 공정의 효율성을 극대화하기 위한 물질전달 향상 전략을 중점적으로 다루고자 한다. 이를 위해, 첫째, 물질전달 성능을 개선하기 위한 생물반응기 설계, 둘째, 물질전달 성능을 향상시키는 첨가제 개발, 셋째, 생체친화적인 나노입자가 안정적으로 분산된 나노유체를 활용한 물질전달 효율 향상에 대한 최신 연구를 정리하고 논의할 것이다. 이를 통해, C1-가스를 활용한 생물전환 기술의 현재 연구 동향을 살펴보고, 물질전달 개선을 위한 다양한 접근법을 종합적으로 고찰하고자 한다.

## 2. 물질전달 성능 향상을 위한 생물반응기 구성의 설계

생물반응기 내 헤드스페이스의 가스 압력을 증가시키면 기체 발효 공정에서 물질전달 성능을 크게 향상시킬 수 있다. 그러나, 고압 조건에서 반응을 진행할 경우 최종 생성물의 화학적 특성이 변할 수 있으므로, 공정 조건을 신중하게 최적화하는 것이 중요하다[22]. 이에, 낮은 물질전달 한계를 극복하기 위해 생물반응기의 구성을 설

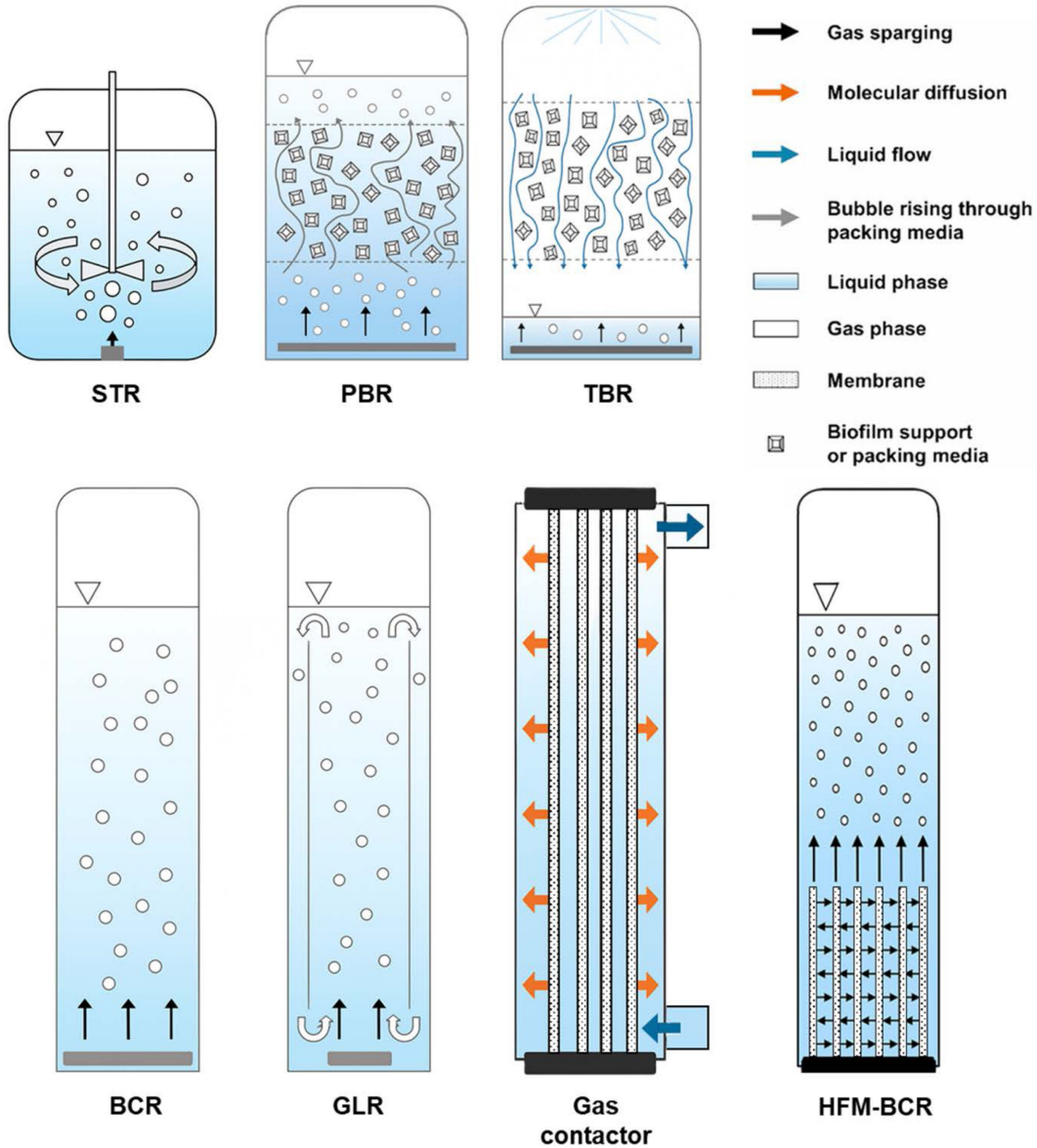


Fig. 3. Schematic illustrations of bioreactors and gas delivery systems for gas fermentation. Redrawn and modified from [13]. STR (Stirred Tank Reactor), PBR (Packed-Bed Reactor), TBR (Trickle-Bed Reactor), BCR (Bubble Column Reactor), GLR (Gas-Lift Reactor), HFM-BCR (Hollow Fiber Membrane Module-Bubble Column Reactor).

계하고 변경하는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 반응기의 구조적 변화는 기체-액체 간 물질전달 효율에 결정적인 영향을 미친다. 이에 따라, 다양한 반응기 설계를 적용하여 기체 공급 및 물질전달 성능을 최적화하는 전략이 연구되고 있다. 이 장에서는 물질전달 성능을 향상시키기 위한 생물반응기 설계 및 구성 변경의 주요 전략을 정리하였다. 이런 맥락에서, Fig. 3은 미생물 발효에 사용되는 다양한 유형의 생물반응기를 시각적으로 나타내어 각 반응기의 특징과 물질전달 효율에 미치는 영향을 개괄적으로 제시하였다.

### 2-1. 교반조 반응기

교반조 반응기(STR)는 구조적으로 단순하여 대부분의 미생물 전환 공정에서 널리 활용되며,  $k_La$ 의 향상은 주로 기계적 교반 속도에 의해 결정된다[23]. STR에서는 임펠러(impeller)와 배플(baffle)의 설계가 중요한 요소로 작용하며, 이를 통해 원하는 용존 가스 농도를

유지하고, 기체가 배양액 내에서 균일하게 분포할 수 있도록 하여 보다 높은  $k_La$ 를 확보할 수 있다[14,24]. 특히, 배플은 액체의 난류 흐름을 조정하여 계면적을 증가시키는 역할을 하며, 교반기는 기체를 효과적으로 분산시켜 미세기포를 형성하거나 기포 응집을 방지함으로써  $k_La$ 를 향상시킨다[7,23]. 예를 들어, 임펠러의 형상과 개수는 기체 보유율(gas hold-up)과  $k_La$ 에 중요한 영향을 미친다. 연구에 따르면, 평판형 패들 임펠러(flat blade paddle, FBT), 경사형 블레이드 터빈(pitched blade turbine, PBT), 그리고 경사형 블레이드 패들(pitched blade paddle, PBP)을 비교한 결과, 3개의 PBT를 적용했을 때 가장 높은  $k_La$ 가 나타났다[25]. 유사한 연구에서 여섯 종류의 임펠러를 이용하여 실험한 결과, 포물선형 블레이드 디스크 터빈(parabolic-blade disk turbine, PDT)과 넓은 블레이드를 갖는 하이드로포일 임펠러(four-wide-blade hydrofoil impeller, WH)가 높은 표면 가스 유속 조건에서 다른 임펠러보다 높은  $k_La$ 를 보였다[26].

그러나, 가스 공급 속도가 낮은 조건에서는 임펠러 유형에 따른  $k_L a$  차이가 크지 않았다. 또한, 기체 보유율, 기포 직경 및 동력 소비에 따른  $k_L a$  변화를 비교한 연구에서는, 러스톤 임펠러(Rushton impeller)와 여섯 가지 다른 임펠러 블레이드 형상을 실험한 결과, 러스톤 임펠러와 접힌 임펠러(folded impeller)의 조합이 기체 보유율을 증가시키고, 균일한 기포 분포를 유도하여  $k_L a$ 를 극대화하는 것으로 확인되었다[27]. 이를 종합하면, STR의  $k_L a$  향상은 임펠러와 배플의 설계, 교반 속도, 기체 보유율 등의 요소에 의해 결정되며, 이러한 요인들을 최적화함으로써 보다 효율적인 기체-액체 물질전달을 달성할 수 있다.

## 2-2. 버블 컬럼 반응기

합성가스를 이용한 생물전환 공정에서 버블 컬럼 반응기(BCR)는 다른 유형의 생물반응기에 비해 우수한 물질전달 성능을 제공하면서도 에너지 소비를 최소화할 수 있는 장점이 있다[28]. BCR은 일반적으로 수직(vertical) 또는 원통형 구조를 가지며, 기체는 반응기 하단에서 주입되어 상향 흐름을 형성하는 방식으로 운영된다[29]. BCR에서는 기포 분배기(bubble distributor)와 스파저(sparger)가 반응기의 핵심 요소로 작용하며, 이들은 계면적을 증가시켜 물질전달을 촉진한다. 기체-액체 계면적은 기포 직경, 기포 형성 빈도, 그리고 최종 기포 속도에 의해 결정된다[30]. 구체적으로, BCR의 물질전달 성능을 향상시키기 위해 다양한 연구가 수행되었다. 연구에 따르면, 표면 가스 유속(superficial gas velocity), 특정 계면적(specific interfacial area, a), 그리고  $k_L$  값 간의 상관관계를 분석한 결과, 천공된(perforate) 기포 분배기는 크로스 스파저보다 더 작은 기포를 형성하면서도, 액체상의  $k_L$  값의 변화 없이 가장 높은  $k_L a$ 를 나타내는 것으로 확인되었다[31]. 또한, 운전 압력이 증가할수록  $k_L a$  값이 상승하는 경향을 보였으나, 압력이 0.1 MPa에서 0.4 MPa로 증가하면 기포 상승 속도가 느려지면서 기체 보유율(gas hold-up)이 감소하여 결국  $k_L$  값이 낮아지는 현상이 관찰되었다. 한편, BCR의 물질전달 성능을 더욱 향상시키기 위해 중공 섬유 멤브레인 모듈(hollow fiber membrane modules, HFMMs)을 활용한 연구도 진행되었다[28]. 소수성 폴리비닐리덴 플루오라이드(polyvinylidene fluoride, PVDF) 멤브레인 섬유를 이용하여 HFMMs를 제작하고, 이를 버블 스파저로 적용한 결과, 일반적인 알루미늄 버블러(alumina bubbler)보다 메탄( $CH_4$ )의  $k_L a$  값이 약 3.6배 증가하는 것으로 나타났다. 이는 염석 효과(salting-out effects) 없이 기체 분출구(orifice)에서 발생하는 높은 가스 구동력(gas driving force)에 의해 기체 확산이 촉진된 결과로 분석되었다. 또한, HFMMs는 *Methylosinus trichosporium* OB3b의 세포 성장률(cell growth rate)을 향상시키는 효과도 확인되었다. 이와 유사하게, 합성가스 발효를 위한 기체 확산 시스템으로 중공 섬유 멤브레인 반응기(hollow fiber membrane bioreactor, HFMBR)를 활용한 연구에서도 내부 압력이 CO의  $k_L a$ 에 미치는 영향을 분석하였다[32]. 연구 결과, 침지형(submerged type) HFMBR은 부분 압력(partial pressure) 조건에서 기포 크기가 작을수록  $k_L a$  값이 증가하는 경향을 보였으며, 기존의 다른 멤브레인 스파저 유형보다 가장 높은  $k_L a$  값을 나타내는 것으로 확인되었다. 이처럼, BCR은 기체 확산 방식을 조정하여 마이크로버블(microbubble) 형성을 유도함으로써 물질전달 성능을 효과적으로 향상시킬 수 있다. 그러나 좁은 단면을 통한 가스 흐름으로 인해 과도한 거품이 발생할 가능성이 있으며, 이를 지속적으로

운영하기 위해서는 적절한 거품 제어 기술(foam control technology)이 필수적으로 요구된다.

## 2-3. 세포 고정화 생물반응기

세포 고정화 생물반응기(CBR)는 기체 용해도가 낮은 환경에서 기체 발효(gas fermentation)의 효율성을 높이기 위해 자주 활용되며, 다른 생물반응기와 차별되는 특징으로 비드(beads)와 멤브레인(membranes)을 구성 요소로 포함하여 미생물이 재료 표면에 부착될 수 있도록 설계된다[28,33]. CBR에서 미세다공성 소수성 멤브레인(microporous hydrophobic membranes)은 높은 기체 투과성(gas permeability)을 유지하면서도 액체가 멤브레인을 통과하지 못하도록 차단하는 역할을 수행한다[34]. 또한, 멤브레인은 미세다공성, 고밀도, 혹은 복합 소재로 제작될 수 있으며, 이에 따라 선택성, 기계적 강도, 그리고 투과 특성을 조절할 수 있다. 이와 유사하게, 비드(beads)는 미생물이 부착될 수 있는 넓은 부피당 표면적(volumetric surface area)을 제공하는 충전재로 활용되며, 기체-액체 및 세포 간의 상호작용을 증가시켜 특정 계면적(specific interfacial area)을 확장함으로써  $k_L a$ 를 향상시키는 역할을 한다[35,36]. 그러나, CBR은 멤브레인 습윤(membrane wetting)과 생물막 오염(biofouling)으로 인해  $k_L a$ 가 저하될 수 있으며, 지지체(supporting components)의 비용과 내구성 문제를 해결하는 것이 중요한 과제로 남아 있다. 이에 따라, 대부분의 세포 고정화 반응기는 미생물 부착 및 생화학적 반응을 촉진할 수 있도록 지지용 멤브레인 및 비드(supporting membranes and beads)를 핵심 요소로 포함하는 형태로 설계되고 있다[16]. 예를 들어, CBR의 물질전달 성능을 개선하기 위한 연구들 가운데, 단일체 바이오필름 반응기(monolithic biofilm reactor, MnBR)를 이용한 연구에서는 다양한 운전 조건(operational conditions)에서 CO의  $k_L a$ 를 수력학적 분석(hydrodynamics analysis)을 통해 평가한 결과, MnBR이 기존의 버블 컬럼 반응기(BCR)보다 높은  $k_L a$  값을 나타내는 것으로 확인되었다[37]. 또한, MnBR 시스템을 활용한 합성가스 발효 실험에서 합성가스 이용 효율, 에탄올 농도, 및 생산성이 개선되는 결과를 보였다. 이와 유사하게, 트리클 베드 반응기(trickle-bed reactor, TBR)를 이용한 연구에서는 트리클 유동(trickle-flow) 방식을 적용하여 난류 액체 흐름(turbulent liquid flow)을 촉진하고, 기체-액체 계면에서의 정체(stagnation)를 줄임으로써 물질전달 성능을 향상시키는 전략이 제시되었다[38]. 연구 결과, 기공률(void fraction)이 0.38인 유리 비드(glass beads)를 사용하였을 때, 다른 비드에 비해 상대적으로 낮은 기공률을 보여 기체-액체 간 자유 공간(free space of gas-to-liquid)이 감소하였으며, 이를 통해 *Clostridium ragsdalei*의 대사 산물(metabolite) 생산이 향상되는 효과가 확인되었다. 이처럼, CBR은 세포 고정화 기술을 활용하여 기체-액체 간의 물질전달을 개선하고, 미생물의 대사활동을 촉진할 수 있는 반응기 설계로 주목받고 있다. 하지만 장기 운전 시 발생할 수 있는 멤브레인 습윤과 생물막 오염을 최소화하고, 경제적 운영이 가능한 시스템을 개발하는 것이 여전히 중요한 연구 과제로 남아 있다.

## 3. 물질전달 성능 향상을 위한 첨가제 개발

소량의 첨가제(additives)만으로도 기체 보유율, 분자 플럭스(molecular flux), 및 기포 상승 속도(bubble-rising velocity)의 변화를 유도하여  $k_L a$ 를 크게 향상시킬 수 있다. 또한, 일부 지지 재료

(supporting materials)는 셔틀 효과(shuttle effect) 또는 포식 효과(grazing effect)를 통해 부피당  $k_L a$ 를 증가시키는 역할을 한다. 이러한 효과는 기체가 기체-액체 계면에서 흡착과 탈착을 반복하며 벌크 액체(bulk liquid)로 전달되는 메커니즘을 기반으로 한다. 이와 같은 첨가제는 액체 분자나 기포 표면을 덮는 특성을 가지며, 이를 통해 유체의 수력학(fluid hydrodynamics) 및 기포 역학(bubble dynamics)을 변화시킬 수 있다[39,40]. 특히, 액체의 표면장력을 감소시키면 액체 분자가 보다 미세한 액체 마이크로분자(fine liquid micromolecules)로 변환되기 쉬워지며, 이는 기체-액체 계면적을 증가시키는 데 기여한다. 따라서, 물질전달 성능 향상을 위한 첨가제 개발은 반응기 내 물질전달 저항을 줄이고, 보다 효과적인 기체 확산을 유도하는 중요한 전략으로 활용될 수 있다. 향후 연구에서는 다양한 첨가제의 조합 및 최적 농도에 대한 평가를 통해, 생물전환 공정에서의 적용 가능성을 더욱 높이는 방향으로 진행될 필요가 있다.

### 3-1. 계면활성제

계면활성제는 액체의 물리적 성질을 변화시켜 정체된 액상 막(stagnant film)을 줄이고, 이를 통해 기포 상승 속도(bubble rising velocity), 기포 이동, 및 크기에 영향을 미칠 수 있다[39,40]. 연구에 따르면, 기본 유체(base fluid)에 계면활성제를 첨가하면 기포 직경과 기포 형성 빈도가 변화하여 특정 계면적(specific interfacial area,  $a$ )이 증가하는 경향을 보인다. 그러나, 계면활성제 첨가는 기포 상승 속도를 증가시키는 동시에 액체상의  $k_L$  값을 감소시키는 것으로 확인되었다. 이와 관련하여, 고속 이미징 시스템을 활용한 연구에서는 계면활성제가 기포 상승 속도에 미치는 영향을  $k_L a$  값과 연계하여 분석하였다[39,41]. 연구 결과, 첨가제의 종류와 농도는 마랑고니 효과(Marangoni effect) 및 전단력 유도 부양력(shear-induced lift force)의 변화를 유발하여, 결국  $k_L$  감소로 이어졌다. 또한, 계면활성제가 기체-액체 간 물질전달에 미치는 영향을 분석한 연구에서는, 계면활성제 첨가가 표면 장력을 감소시키고 기체-액체 간 정체막(stagnant film)을 줄이는 효과를 보였다. 연구자들은 계면활성제와 액체 사이의 미세 액적 간의 상호작용이 예상보다 큰 물질전달 향상 효과를 유발할 가능성이 있다고 설명하였다. 이러한 연구 결과는 표면 기능화 재료(surface-functionalized materials)를 활용하여 최적의 표면 에너지와 확장된 표면적을 제공함으로써  $k_L a$ 를 향상시킬 수 있는 가능성을 시사한다. 그러나, 일부 계면활성제는 미생물의 생존력(cell viability)에 영향을 미칠 수 있으므로, 미생물 배양 배지에서 사용할 경우 세포 독성을 최소화할 수 있도록 적절한 농도를 설정하는 것이 중요하다.

### 3-2. 전해질

$\text{CuSO}_4$ ,  $\text{CoSO}_4$ ,  $\text{MnSO}_4$ ,  $\text{NiSO}_4$ ,  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{MnCl}_2$ ,  $\text{NiCl}_2$  등의 전해질은 기본 용액(base liquid)에서 기포 역학(bubble dynamics)에 상당한 영향을 미친다. 이는 작은 이온성 분자가 기체-액체 계면(gas-to-liquid interface)에서 기포와 상호작용하거나, 용액의 점도 및 표면장력을 변화시켜 기포와 액체 간 접촉 면적을 증가시키기 때문이다[42]. 일반적으로, 이온성 화합물은 기체의 확산을 촉진하여 액막이 파괴(thin film rupture)되면서도 용액 내에서 기체 분자의 이동을 증가시킨다. 이 과정에서 기체의 용해도를 감소시키는 염석 효과(salting-out effect)가 발생할 수 있음에도 불구하고, 액체상의  $k_L$  및  $k_L a$ 를 증가시키는 결과를 초래한다[13,43]. 그러나, 전해질을

활용할 경우 미생물의 생물전환반응 과정에서 생리학적 변화(physiological changes)를 유발할 가능성이 있으므로, 미생물 성장에 미치는 영향을 고려하여 최적의 농도를 결정하는 것이 필수적이다. 따라서, 각 미생물 균주에 적합한 전해질 유형 및 농도를 설정하는 연구가 필요하다. 예로, 전해질의 물질전달 성능 향상 효과를 평가한 연구에서는  $\text{NaCl}$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ 와 같은 무기 전해질이 버블 컬럼 반응기(BCR) 내에서 산소 전달에 미치는 영향을 분석하였다[44]. 연구 결과, 계면적(interfacial area,  $a$ )이 증가하면서  $k_L a$ 가 전반적으로 증가하였으나, 전해질 농도가 증가할수록  $k_L$  값은 감소하는 경향을 보였다. 이는 전해질이 물의 표면장력을 변화시키면서 기체 확산 및 기포 응집(coalescence)에 영향을 미친 결과로 해석되었다. 또한, 다양한 전해질( $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ )이 중공 섬유 멤브레인 반응기(hollow fiber membrane bioreactor, HFMBR)에서  $k_L a$ 에 미치는 영향을 연구한 결과, 전해질 농도가 증가할수록 CO의 포화 농도는 감소하는 것으로 나타났다[45]. 이는 염석 효과에 의해 기체 용해도가 낮아진 결과로 분석되었다. 특히, 중공 섬유 멤브레인에서 생성된 작은 기포는 멤브레인 표면과 벌크 액체에서 빠르게 응집되는 경향을 보였으며, 전해질 농도가 높아질수록 기포의 안정성이 낮아지는 현상이 관찰되었다. 현재까지 이온성 분자가 수력학적 변수(hydrodynamic parameters)에 미치는 영향에 대한 완전한 이해는 이루어지지 않았으나, 소량의 이온성 분자도  $k_L a$ 에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 이러한 효과는 기체 보유율, 분자 플럭스, 기포 상승 속도 등 다양한 유체역학적 변수와 연관되어 있다. 따라서, 전해질을 활용한 물질전달 개선 전략은 미생물 생리학적 영향과의 균형을 고려해야 하며, 최적의 전해질 조성과 적용 방법을 규명하는 추가 연구가 필요할 것이다.

## 4. 생체친화적인 나노입자가 안정적으로 분산된 나노유체를 활용한 물질전달 효율 향상

최근 나노입자가 안정적으로 분산된 나노유체를 이용하여 기체-액체 시스템에서  $k_L a$  및 고티용 용해도를 향상시키려는 연구가 진행되고 있다. 나노유체는 나노미터 크기의 입자를 포함하는 유체로, 일반적으로 직경이 100 nm 이하인 나노입자들이 유체 내에 균일하게 분산된 상태를 의미한다. 나노유체에 대한 연구는 1995년 처음 보고된 이후, 주로 열전달 효율 향상과 관련된 이론적 해석 및 안정적인 입자 제조를 중심으로 진행되어 왔다. 그러나 최근에는 나노유체가 물질전달 확산계수(diffusivity)를 증가시키는 효과도 기대할 수 있음이 보고되면서, 이를 활용한 물질전달 효율 향상 연구가 주목받고 있다. 현재까지 나노유체를 이용한 물질전달 개선 연구는 주로 무기물 기반의 나노입자를 활용하여 산소( $\text{O}_2$ ), 암모니아( $\text{NH}_3$ ), 이산화탄소( $\text{CO}_2$ ) 등의 물질전달 효율을 향상시키는 데 집중되어 왔다[20,39]. 특히, 산화물, 질화물, 카바이드 세라믹스, 금속 및 금속산화물, 그리고 카본 나노튜브(carbon nanotube, CNT) 기반 나노입자가 널리 활용되었다. 하지만, 100 nm 미만의 나노입자는 미생물 세포 내부로 유입될 가능성이 높으며, 금속산화물 등의 무기물 나노입자가 세포 내로 침투할 경우 세포독성을 유발할 수 있다는 점이 한계로 작용하고 있다[46,47]. 이러한 독성은 나노입자로부터 생성되는 활성산소종(reactive oxygen species, ROS)에 의해 세포 내 기질이 영향을 받거나, 미생물 성장을 억제하는 형태로 나타날 수 있다. 그러나, 생체친화적인 나노입자를 활용하여 나노유체를

설계할 경우, 이러한 한계를 극복하면서도 생물전환 공정의 효율을 향상시킬 수 있다. 나노유체를 적용하면 더 작고 안정적인 미세기포(microbubbles)가 형성되어 기체-액체 간 물질전달 성능을 개선할 수 있다[48,49]. 또한, 수용액 상에서 상대적으로 소수성을 띠는 나노입자를 활용하면 C1-가스와의 친화도를 높여, 기체가 액체 및 고체 계면에 더욱 효율적으로 접촉하도록 유도할 수 있다. 이로 인해, 기체-액체 계면적이 증가하면서 C1-가스의 겹보기 용해도가 향상되는 효과를 기대할 수 있다. 뿐만 아니라, 나노입자의 브라운 운동과 대류 확산에 의해 C1-가스의 흡수 및 생축매로의 전달 효율이 증가할 수 있다. 이를 통해, 나노유체는 기존 생물전환 공정의 물질전달 한계를 극복할 수 있는 혁신적인 기술로 자리 잡을 가능성이 크며, 향후 연구에서는 생체친화적 나노입자의 설계 및 최적화, 다양한 미생물 균주에 대한 적용성 평가, 장기적 안정성 및 경제적 생산 가능성 등의 요소를 종합적으로 검토하는 것이 필요하다.

4.1. 나노입자에 의한 물질전달 향상

계면적과 기체 보유율은  $k_L a$ 를 결정하는 핵심 변수이며, 안정적으로 분산된 나노입자는 액체의 물리·화학적 특성을 변화시켜 이 두 요소에 영향을 미친다. 또한, 작은 분자는 기체 및 액체 분자의 플럭스를 증가시키며, 이는 브라운 운동과 대류적 움직임(convective motion), 그리고 작은 기포 형성 증가와 연관되어 있다[50-52]. 일반적으로, 용액 내에 균일하게 분산된 나노입자는 기체-

기포 확산(gas-bubble diffusion)을 증가시키며, 이는 셔틀 효과(shuttling effect), 포식 효과(grazing effect), 경계 혼합 효과(boundary mixing effect), 그리고 기포 응집 억제(bubble coalescence inhibition) 등의 메커니즘을 통해 이루어진다(Fig. 4). 이러한 효과는 나노입자의 고유한 브라운 운동이 액체 내부로 전달됨으로써 발생한다. 따라서, 나노입자는 다양한 수력학적 변수(hydrodynamic factors)와 기포 역학(gas bubble dynamics)을 변화시켜 기체-액체 부피당  $k_L a$  및 포화 기체 농도(saturated gas concentration,  $C^*$ )를 크게 향상시킬 수 있다. 예를 들어, 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT) 입자가  $CO_2$  흡수( $CO_2$  absorption)에 미치는 영향을 연구한 결과, CNT와 미세 활성탄(micro-activated carbon, AC) 모두  $CO_2$  흡수율을 증가시키는 것으로 나타났다[50]. 하지만, 교반 속도에 따라 흡수율 증가 패턴이 다르게 나타났으며, 교반 속도가 증가할수록 AC 현탁액에서는 향상 계수(enhancement factor)가 감소한 반면, CNT 현탁액에서는 오히려 증가하는 경향을 보였다. 연구진은 이 차이를 포식 효과(grazing effect)뿐만 아니라, 물질전달 경계층 내에서 나노입자의 브라운 운동이 유도하는 미세 대류(micro-convection) 현상이 중요한 역할을 했기 때문이라고 분석했다. 또 다른 연구에서는 실리카와 그래핀 나노유체가 버블 컬럼 반응기에서 황화수소( $H_2S$ ) 흡수에 미치는 영향을 조사했다[53]. 연구 결과, 실리카 나노입자가 존재할 경우 황화수소 흡수율이 오히려 감소한 반면, 그래핀 나노유체의 경우 질량 분율이 0.02%일 때 흡수율이 40% 증가하는 것

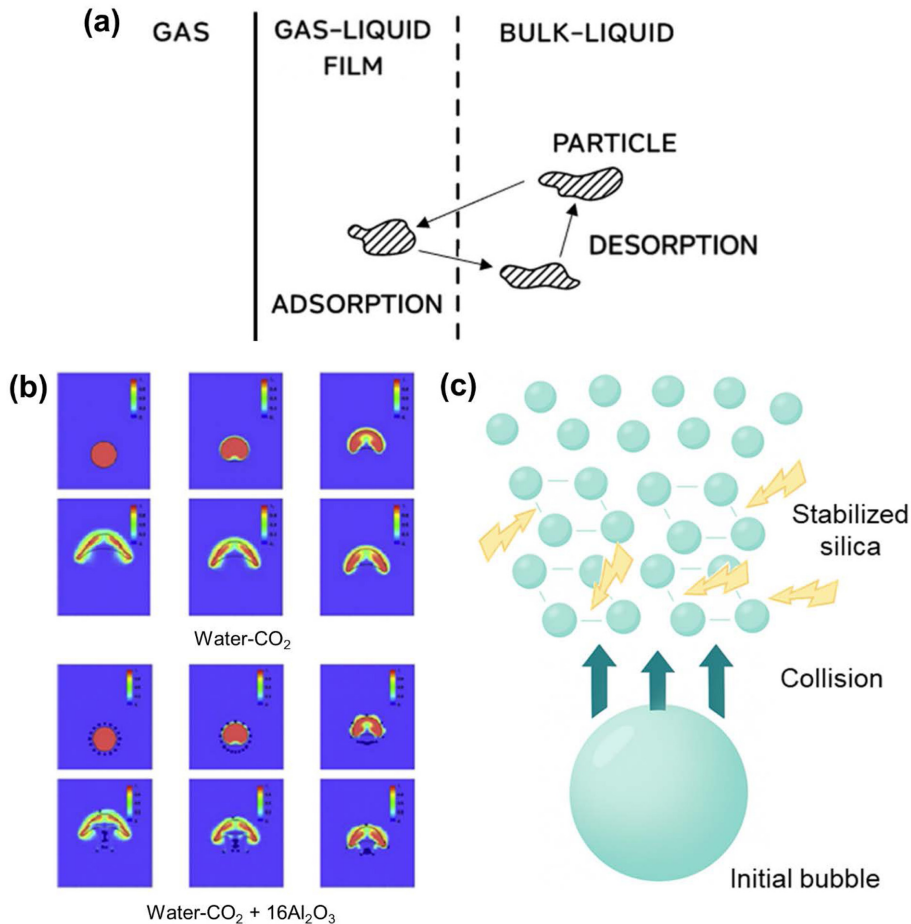


Fig. 4. Schematic diagrams of several possible mechanisms in mass transfer. Redrawn and modified from [39]. (a) Grazing (or Shuttle) effect. (b) Gas-liquid interface shape in hydrodynamic effect. (c) Mass transfer interface increase by bubble breaking effect.

으로 확인되었다. 하지만, 질량 분율이 0.02%를 초과하면 흡수율이 다시 감소하는 경향을 보였다. 연구진은 이러한 흡수율 변화의 원인으로 포식 효과를 꼽았다. 이처럼, 나노입자를 활용한 물질전달 개선 전략은 상당한 효과를 기대할 수 있으며, 특히 CNT와 그래핀 기반 나노소재의 활용 가능성을 보여준다. 하지만, 나노입자의 종류, 농도, 교반 조건 등에 따라 물질전달 효과가 달라질 수 있기 때문에 최적의 조건을 찾기 위한 추가 연구가 필요하다. 또한, 나노입자를 생물전환공정에 적용하려 할 경우, 미생물에 미치는 영향을

고려하여 생체 적합성(biocompatibility) 평가도 함께 이루어져야 하며, 실제로 무기산화물 기반의 많은 나노입자들은 세포독성으로 인해 생물전환공정에 활용하기 어렵다. 이를 바탕으로 차세대 생물 반응기 및 미생물 전환 공정에 적합한 나노소재 개발이 필요하다.

4-2. 생체친화적 나노유체의 개발 및 적용

최근 생체적합성이 뛰어난 나노입자를 바탕으로한 생체친화적 나노유체의 활용 가능성을 검토하기 위한 여러 연구가 이루어졌다.

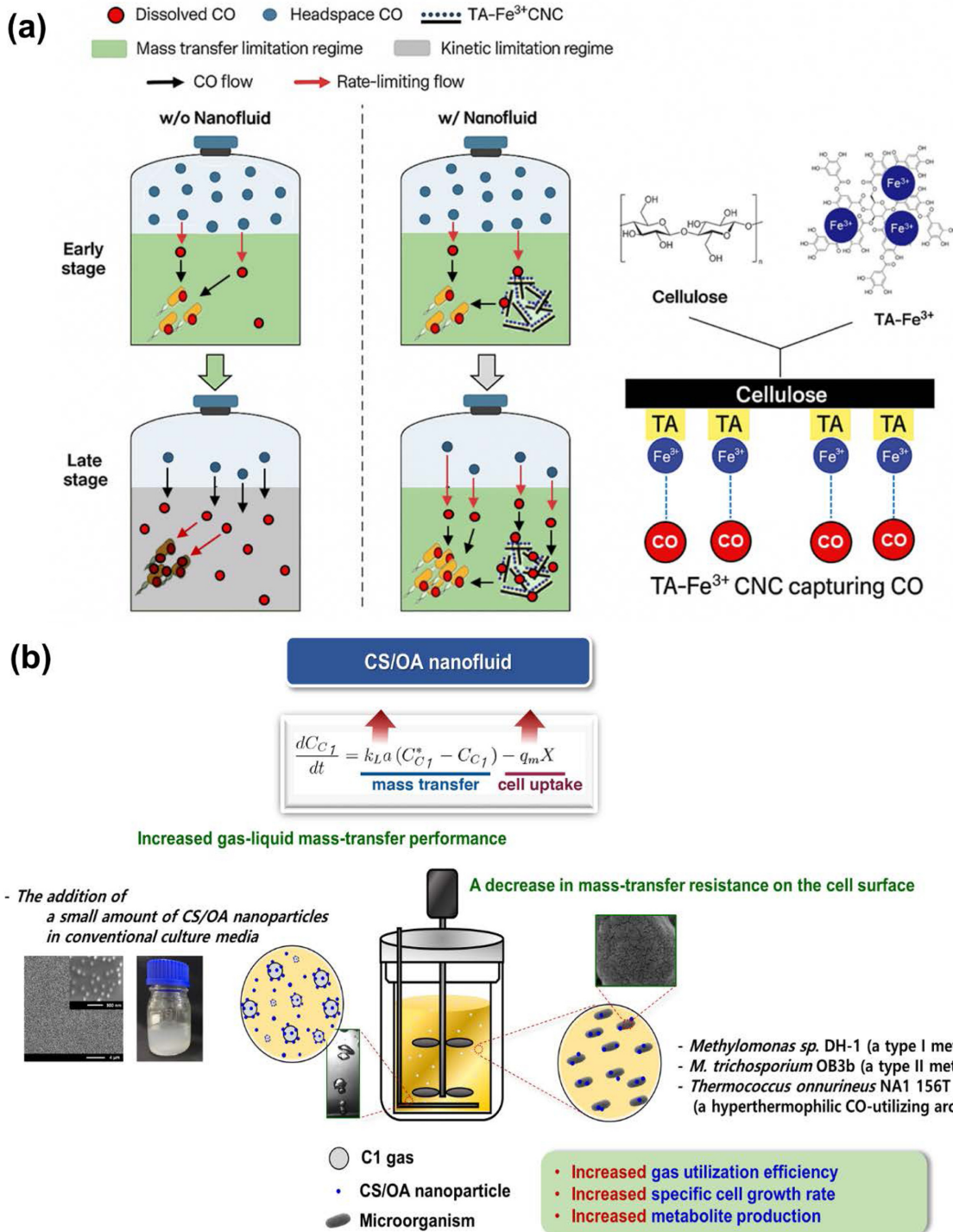


Fig. 5. (a) Mechanism of TA-Fe<sup>3+</sup>CNC promoting tolerization against CO toxicity. Redrawn and modified from [12]. (b) Schematic summary of the CA/OA nanofluid for enhancing gas utilization efficiency in C1-gas microbial biotransformation. Adapted from [9] with modifications.

구체적인 예로 탄닌산-Fe<sup>3+</sup> 복합체가 코팅된 셀룰로오스 나노결정을 개발하여 나노유체로 활용한 연구에서는, CH<sub>4</sub> 미생물 전환 공정의 효율을 평가한 결과 개발된 나노유체가 기포 응집을 방지하고 기체-액체 접촉 면적을 확대해 CH<sub>4</sub> 용해도를 20% 이상 증가시키는 것으로 나타났다[21]. 또한, *Methylomonas* sp. DH-1 균주의 세포 성장률과 대사 산물 생산성이 유의미하게 증가했으며, 메탄올, 피루브산, 숙신산 등의 생산량도 함께 증가했다. 연구진은 이러한 나노유체가 단순한 물리적 효과뿐만 아니라 미생물 세포 표면과의 화학적 상호작용을 통해 물질전달 저항을 줄이는 데 기여한다고 분석했다. 이는 CH<sub>4</sub> 전환 공정에서 나노유체가 단순한 보조제가 아니라 미생물의 기체 활용 효율을 높이는 핵심 요소가 될 수 있음을 보여준다. 또 다른 연구에서는 탄닌산-Fe<sup>3+</sup> 복합체 코팅 셀룰로오스 나노유체를 이용해 *Eubacterium limosum* 미생물의 CO 가스 생물전환 공정을 개선하고자 하였다(Fig. 5(a))[12]. 연구 결과, 나노유체 적용 후 가용할 수 있는 CO의 농도가 감소했으며, 동시에 CO 독성이 완화된 미생물의 생육과 대사활동이 촉진되었다. 실험에서는 탄닌산-Fe<sup>3+</sup> 복합체 코팅 나노유체가 적용된 배양 시스템에서 미생물의 CO 소비율이 증가했고, CO 독성이 감소하는 효과가 확인되었다. 연구진은 나노유체가 단순히 CO의 물리적 가용성을 조절하는 것뿐만 아니라, CO와 미생물 효소 간의 직접적인 상호작용을 차단하는 보호 효과도 제공할 수 있다고 설명했다. 이를 통해 CO 기반 미생물 전환 공정에서 나노유체가 촉진제 역할뿐만 아니라, 미생물을 보호하면서 전환 효율을 높이는 기능을 수행할 수 있음을 시사한다. 또한, 연구진은 다양한 CO 전환 미생물 균주에 대한 추가 연구를 통해 나노유체의 적용 가능 범위를 확장할 필요성을 강조했다. 한편, 키토산과 올레아미드를 기반으로 한 나노유체를 개발하여 C1-가스 미생물 전환 공정에서 물질전달 성능을 향

상시키려는 연구도 진행되었다(Fig. 5(b))[9]. 연구에서 개발된 나노유체는 pH 7.5 이하에서 안정적인 분산성을 유지하며, 미생물 배지 내에서 세포 표면과의 상호작용을 통해 기체 용해도를 증가시키는 것으로 나타났다. 이 연구에서는 *Methylomonas* sp. DH-1, *Methylosinus trichosporium* OB3b, *Thermococcus onnurineus* NA1 균주를 대상으로 나노유체 적용 후 C1-가스 소비량 및 대사 산물 생산성을 평가한 결과, 모두 증가하는 경향을 보였다. 특히, 키토산/올레아미드 기반 나노유체는 세포 표면에서 친수성/소수성 상호작용을 조절하여 기체 분자의 용해도를 높이는 메커니즘을 확인했다. 이는 미생물 생육과 물질전달을 동시에 향상시킬 수 있는 효과적인 방법임을 보여주며, 산업적 활용 가능성에 대한 논의를 확장했다. 이처럼, 생체친화적 나노유체는 CO 및 CH<sub>4</sub>의 미생물 전환 공정에서 물질전달을 촉진하고, 미생물 성장과 대사활동을 개선하는 데 기여할 수 있다. 특히, 탄닌산-Fe<sup>3+</sup> 복합체 및 키토산/올레아미드 기반 나노유체는 각각 CO 및 CH<sub>4</sub> 전환 공정에서 우수한 성능을 보이며, 향후 생물공정 및 산업적 적용 가능성이 높다. 다만, 이러한 나노유체의 장기적 안정성, 경제적 생산 가능성, 그리고 다양한 미생물 균주에 대한 적용성을 평가하는 추가 연구가 필요하다. 이를 통해 나노유체가 다양한 미생물 전환 공정에서 더욱 효과적으로 활용될 수 있는 기반을 마련할 수 있을 것이다. 이러한 측면에서, 아래의 Table 1은 물질전달 효율향상을 위해 앞에서 논의한 생물반응기 구성의 최적화, 첨가제 활용, 나노유체 적용 등의 전략을 요약하여 비교하였고, Table 2는 보고된 주요 k<sub>L</sub>a 값 및 물질전달 향상 사례를 정리하였다. 이러한 물질전달 향상 전략에 대한 종합적인 고찰은 향후 실용적 생물공정 설계 및 전략 선택에 중요한 참고자료가 될 수 있을 것이다.

**Table 1. Comparison of mass transfer enhancement strategies in C1-gas bioconversion processes**

Approach	Key modifications	Remarks
Bioreactor configuration/design	Stirred Tank Reactors · Adjust impeller shape and number · Install baffles · Optimize stirring/agitation speed	· Optimized impeller configuration yielded higher k <sub>L</sub> a. · Higher agitation speed improved bubble dispersion and increased gas hold-up. · Drawback: excessive power consumption
	Bubble column reactors · Modify sparger/distributor design · Employ hollow-fiber membrane spargers · Optimize operating pressure	· Optimized superficial gas velocity led to higher k <sub>L</sub> a. · Hollow-fiber membrane spargers increased k <sub>L</sub> a. · Possible issue: excessive foam formation
	Cell-immobilized bioreactors · Use cell-immobilized supports · Optimize pore structure	· Suitable support and flow conditions increased k <sub>L</sub> a. · Remaining challenges: membrane wetting and biofouling
Additives	Surfactants · Reduce surface tension · Inhibit bubble coalescence	· Decreased bubble diameter and increased interfacial area yielded higher k <sub>L</sub> a. · Some studies observed a decrease in k <sub>L</sub> a. · Possible issue: cell toxicity
	Electrolytes · Induce salting-out effect · Improve bubble hydrodynamics and dispersion	· Higher salt concentration may reduce gas solubility. · Even a small addition raised k <sub>L</sub> a. · However, bubble stability decreased at high concentrations.
	Polymeric alcohols and biopolymers · Reduce surface tension · Inhibit bubble coalescence	· Decreased bubble diameter and increased gas hold-up led to higher k <sub>L</sub> a.
Nanofluids (Nanoparticles)	Inorganic nanoparticle-based nanofluids · Shuttle effect · Hydrodynamic effect · Bubble breaking and coalescence inhibition	· Stably well-suspended nanoparticles increased k <sub>L</sub> a. · Higher gas absorption enhanced apparent gas solubility. · Nanoparticle cytotoxicity limits direct use in bioprocesses.
	Biocompatible nanoparticle-based nanofluids · Stably well-suspended biocompatible nanoparticles	· Biocompatible nanoparticles overcome cytotoxicity issue. · C1-gas uptake through cell membranes may be improved by functionalized nanoparticles.

**Table 2. Representative  $k_L a$  values and gas-liquid mass transfer enhancements achieved via various approaches.**

Approach	Technique (method)	$k_L a$ ( $h^{-1}$ )	Enhancement (ratio)	Ref.
Bioreactor configuration/design	Stirred tanks	10-500		
	Stirred tank - 200 rpm	14.2-90.6		
	Stirred tank - 300 rpm	28.1-104		
	Stirred tank - 450 rpm	101		
	Packed bubble columns	2.1-430		
	Packed columns - cocurrent	1.5-3670		
	Packed column - trickle flow	36-360		[25, 29, 32]
	Bubble columns	18-860		
	Microbubble sparged	200-1800		
	Hollow fiber membrane			
Additives	Hydrophobic polypropylene	385-1096.2		
	MHF0504MBFT	946		
	PVDF	150.1		
	Electrolytes in bubble column reactor	279.4-568.8	1.6-4.7	
	Electrolytes in stirred bubble column reactor		2.26-6.9	
	Surfactants			
	HTAP	49	3.5	[45]
	HDTAB	69	4.93	
	Alcohols			
	Methanol	263	2.65	
Nanofluids (Nanoparticles)	Ethanol	434	5.03	
	CNT		1.9	
	MCM41		1.94	
	SiO <sub>2</sub>		1.29	
	SBA15	104.8	1.56	[9, 21, 39, 45]
	MSBA-15	126.4	1.88	
	TA-Fe <sup>3+</sup> CNC		1.15	
CS/OA		1.96		

## 5. 결 론

C1-가스를 활용한 미생물 생물전환 공정은 기체 용해도가 낮고 물질전달 효율이 제한적이라는 문제를 가지고 있어, 이를 개선하기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔다. 본 총설에서는 물질전달 성능을 향상시키기 위한 생물반응기 구조 설계, 기체 확산을 촉진하는 첨가제 활용, 그리고 나노유체 기술을 중심으로 논의하였다. 생물반응기 구조의 설계를 최적화하여 기체 보유율을 높이고, 계면활성제 및 전해질을 활용하여 기포의 안정성을 조절하는 전략이 제시되었다. 또한, 생체친화적인 나노입자가 포함된 나노유체는 기체 용해도를 증가시키고 물질전달 저항을 줄여 미생물의 생물전환 효율을 향상시키는 효과를 보였다. 그러나, 현재까지의 연구는 주로 실험실 규모에서의 성능 검증에 초점이 맞춰져 있어, 실제 산업 환경으로 확장하여 적용하기 위해서는 여전히 해결해야 할 기술적 과제들이 남아 있다. 특히 다양한 미생물 균주의 고유한 특성을 고려하여 스케일업 과정에서 발생할 수 있는 기체 전달 성능의 저하 및 균일성 유지 문제, 장기 운전 중에서도 나타날 수 있는 소재의 안정성 문제, 나노유체를 구성하는 나노입자의 재사용 가능성과 경제성 등은 추가적인 연구가 필요하다. 따라서 향후 연구에서는 이러한 기술들이 산업적 규모에서도 안정적으로 적용될 수 있도록 반응기 설계 및 구조의 고도화, 미생물과의 상호작용 최적화, 첨가제 및 나노유체의 생물학적·물리화학적 장기 안정성 평가, 그리고 경제성 및 환경적 지속가능성 분석 등이 종합적으로 이루어져야 할 것이다.

이러한 다각적 접근을 통해 C1-가스 기반 생물전환 공정은 보다 효율적이고 환경친화적이며 경제적으로도 지속 가능한 기술로 발전할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감 사

이 연구는 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음.

## References

- Durre, P. and Eikmanns, B. J., "C1-Carbon Sources for Chemical and Fuel Production by Microbial Gas Fermentation," *Curr. Opin. Biotechnol.*, **35**, 63-72(2015).
- Comesaña-Gándara, B., García-Depraect, O., Santos-Beneit, F., Bordel, S., Lebrero, R. and Muñoz, R., "Recent Trends and Advances in Biogas Upgrading and Methanotrophs-Based Valorization," *Chem. Eng. J. Adv.*, **11**, 100325(2022).
- Humphreys, C. M. and Minton, N. P., "Advances in Metabolic Engineering in the Microbial Production of Fuels and Chemicals from C1 Gas," *Curr. Opin. Biotechnol.*, **50**, 174-181(2018).
- Lee, J. A., Kim, H. U., Na, J. G., Ko, Y. S., Cho, J. S. and Lee, S. Y., "Factors Affecting the Competitiveness of Bacterial Fermentation," *Trends Biotechnol.*, **41**, 798-816(2023).
- Yoon, J. and Oh, M. K., "Strategies for Biosynthesis of C1 Gas-Derived Polyhydroxyalkanoates: A Review," *Bioresour. Technol.*,

- 344, 126307(2022).
6. Gavala, H. N., Grimalt-Alemany, A., Asimakopoulos, K. and Skiadas, I. V., "Gas Biological Conversions: The Potential of Syngas and Carbon Dioxide as Production Platforms," *Waste and Biomass Valorization*, **12**, 5303-5328(2021).
  7. Kraakman, N. J., Rocha-Rios, J. and van Loosdrecht, M. C., "Review of Mass Transfer Aspects for Biological Gas Treatment," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **91**, 873-886(2011).
  8. Cantera, S., Muñoz, R., Lebrero, R., López, J. C., Rodríguez, Y. and García-Encina, P. A., "Technologies for the Bioconversion of Methane into More Valuable Products," *Curr. Opin. Biotechnol.*, **50**, 128-135(2018).
  9. Kang, E., Moon, E., Song, W., Kim, L. H., Hyung, J. S., Jo, J. H., Park, J. H., Kim, M. S., Na, J. G. and Choi, Y. S., "Chitosan/Oleamide Nanofluid as a Significant Medium for Enhancing Gas Utilization Efficiency in C1-Gas Microbial Biotransformation," *Chem. Eng. J.*, **433**(2022).
  10. Akyol, S., Erdogan, S., Idiz, N., Celik, S., Kaya, M., Ucar, F., Dane, S. and Akyol, O., "The Role of Reactive Oxygen Species and Oxidative Stress in Carbon Monoxide Toxicity: An In-Depth Analysis," *Redox Rep.*, **19**, 180-189(2014).
  11. Garcia-Ochoa, F. and Gomez, E., "Bioreactor Scale-Up and Oxygen Transfer Rate in Microbial Processes: An Overview," *Biotechnol. Adv.*, **27**, 153-176(2009).
  12. Kim, D., Kang, E., Je, H. H., Kim, D. H., Whang, K., Cha, S. H., Ye, D. Y., Baek, W., Kang, T., Hwang, D. S., Choi, Y. S. and Jung, G. Y., "Molecular Regime Shift from Kinetic Limitation Condition to Mass-Transfer Limitation Condition for Stabilizing CO Metabolism by Microorganisms," *Chem. Eng. J.*, **504**, 158801 (2025).
  13. Yasin, M., Jang, N., Lee, M., Kang, H., Aslam, M., Bazmi, A. A. and Chang, I. S., "Bioreactors, Gas Delivery Systems and Supporting Technologies for Microbial Synthesis Gas Conversion Process," *Bioresour. Technol. Rep.*, **7**, 100207(2019).
  14. Nienow, A. W., "Stirring and Stirred-Tank Reactors," *Chem-Ing-Tech*, **86**, 2063-2074(2014).
  15. Zhang, K., Yap, F. L., Li, K., Ng, C. T., Li, L. J. and Loh, K. P., "Large Scale Graphene/Hexagonal Boron Nitride Heterostructure for Tunable Plasmonics," *Adv. Funct. Mater.*, **24**, 731-738 (2014).
  16. Yasin, M., Park, S., Jeong, Y., Lee, E. Y., Lee, J. and Chang, I. S., "Effect of Internal Pressure and Gas/Liquid Interface Area on the CO Mass Transfer Coefficient Using Hollow Fibre Membranes as a High Mass Transfer Gas Diffusing System for Microbial Syngas Fermentation," *Bioresour. Technol.*, **169**, 637-643(2014).
  17. Tanaka, S., Kastens, S., Fujioka, S., Schlüter, M. and Terasaka, K., "Mass Transfer from Freely Rising Microbubbles in Aqueous Solutions of Surfactant or Salt," *Chem. Eng. J.*, **387**(2020).
  18. Craig, V. S. J., "Do Hydration Forces Play a Role in Thin Film Drainage and Rupture Observed in Electrolyte Solutions?," *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, **16**, 597-600(2011).
  19. Nekoeian, S., Aghajani, M., Alavi, S. M. and Sotoudeh, F., "Effect of Surfactants on Mass Transfer Coefficients in Bubble Column Contactors: An Interpretative Critical Review Study," *Rev. Chem. Eng.*, **37**, 585-617(2021).
  20. Zhang, H., Wang, B., Xiong, M., Gao, C., Ren, H. and Ma, L., "Process Intensification in Gas-Liquid Mass Transfer by Nanofluids: Mechanism and Current Status," *J. Mol. Liq.*, **346**, 118268 (2022).
  21. Kang, E., Je, H. H., Moon, E., Na, J. G., Kim, M. S., Hwang, D. S. and Choi, Y. S., "Cellulose Nanocrystals Coated with a Tannic Acid-Fe Complex as a Significant Medium for Efficient CH<sub>4</sub> Microbial Biotransformation," *Carbohydr. Polym.*, **258**, 117733 (2021).
  22. Van Hecke, W., Bockrath, R. and De Wever, H., "Effects of Moderately Elevated Pressure on Gas Fermentation Processes," *Bioresour. Technol.*, **293**, 122129(2019).
  23. Liu, L. Y., Xie, G. J., Xing, D. F., Liu, B. F., Ding, J. and Ren, N. Q., "Biological Conversion of Methane to Polyhydroxyalkanoates: Current Advances, Challenges, and Perspectives," *Environ. Sci.: Ecotechnology*, **2**, 100029(2020).
  24. Jaszczur, M. and Mlynarczykowska, A., "A General Review of the Current Development of Mechanically Agitated Vessels," *Processes*, **8**, 982(2020).
  25. Bredwell, M. D., Srivastava, P. and Worden, R. M., "Reactor Design Issues for Synthesis-Gas Fermentations," *Biotechnol. Prog.*, **15**, 834-844(1999).
  26. Puthli, M. S., Rathod, V. K. and Pandit, A. B., "Gas-Liquid Mass Transfer Studies with Triple Impeller System on a Laboratory Scale Bioreactor," *Biochem. Eng. J.*, **23**, 25-30(2005).
  27. Zhang, J. J., Gao, Z. M., Cai, Y. T., Cai, Z. Q., Yang, J. and Bao, Y. Y., "Mass Transfer in Gas-Liquid Stirred Reactor with Various Triple-Impeller Combinations," *Chin. J. Chem. Eng.*, **24**, 703-710 (2016).
  28. Ayol, A., Peixoto, L., Keskin, T. and Abubackar, H. N., "Reactor Designs and Configurations for Biological and Bioelectrochemical C1 Gas Conversion: A Review," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **18**, 11683(2021).
  29. Asimakopoulos, K., Gavala, H. N. and Skiadas, I. V., "Reactor Systems for Syngas Fermentation Processes: A Review," *Chem. Eng. J.*, **348**, 732-744(2018).
  30. Chen, J., Gomez, J. A., Hoffner, K., Barton, P. I. and Henson, M. A., "Metabolic Modeling of Synthesis Gas Fermentation in Bubble Column Reactors," *Biotechnol. Biofuels*, **8**, 89(2015).
  31. Bello, R. A., Robinson, C. W. and Moo-Young, M., "Gas Holdup and Overall Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in Airlift Contactors," *Biotechnol. Bioeng.*, **27**, 369-381(1985).
  32. Lee, J., Jang, N., Yasin, M., Lee, E. Y., Chang, I. S. and Kim, C., "Enhanced Mass Transfer Rate of Methane via Hollow Fiber Membrane Modules for *Methylosinus trichosporium* OB3b Fermentation," *J. Ind. Eng. Chem.*, **39**, 149-152(2016).
  33. Yasin, M., Park, S., Jeong, Y., Lee, E. Y., Lee, J. and Chang, I. S., "Effect of Internal Pressure and Gas/Liquid Interface Area on the CO Mass Transfer Coefficient Using Hollow Fibre Membranes as a High Mass Transfer Gas Diffusing System for Microbial Syngas Fermentation," *Bioresour. Technol.*, **169**, 637-643(2014).
  34. Orgill, J. J., Atiyeh, H. K., Devarapalli, M., Phillips, J. R., Lewis, R. S. and Huhnke, R. L., "A Comparison of Mass Transfer Coefficients Between Trickle-Bed, Hollow Fiber Membrane and Stirred Tank Reactors," *Bioresour. Technol.*, **133**, 340-346(2013).
  35. Kumar, A., Dewulf, J. and Van Langenhove, H., "Membrane-Based Biological Waste Gas Treatment," *Chem. Eng. J.*, **136**, 82-91(2008).
  36. Pichardo-Romero, D., Garcia-Arce, Z. P., Zavala-Ramírez, A. and Castro-Muñoz, R., "Current Advances in Biofouling Mitigation

- in Membranes for Water Treatment: An Overview?’ *Processes*, **8**, 182(2020).
37. di Biase, A., Kowalski, M. S., Devlin, T. R. and Oleszkiewicz, J. A., “Moving Bed Biofilm Reactor Technology in Municipal Wastewater Treatment: A Review;” *J. Environ. Manag.*, **247**, 849-866(2019).
  38. Shen, Y. W., Brown, R. and Wen, Z. Y., “Enhancing Mass Transfer and Ethanol Production in Syngas Fermentation of *Clostridium carboxidivorans* P7 Through a Monolithic Biofilm Reactor;” *Appl. Energy*, **136**, 68-76(2014).
  39. Pang, C., Lee, J. W. and Kang, Y. T., “Review on Combined Heat and Mass Transfer Characteristics in Nanofluids;” *Int. J. Therm. Sci.*, **87**, 49-67(2015).
  40. Takagi, S. and Matsumoto, Y., “Surfactant Effects on Bubble Motion and Bubbly Flows;” *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **43**, 615-636 (2011).
  41. Shen, Y. W., Brown, R. C. and Wen, Z. Y., “Syngas Fermentation by *Clostridium carboxidivorans* P7 in a Horizontal Rotating Packed Bed Biofilm Reactor with Enhanced Ethanol Production;” *Appl. Energy*, **187**, 585-594(2017).
  42. Gómez-Díaz, D., Navaza, J. and Sanjurjo, B., “Mass-Transfer Enhancement or Reduction by Surfactant Presence at a Gas-Liquid Interface;” *Ind. Eng. Chem. Res.*, **48**, 2671-2677(2009).
  43. Hebrard, G., Zeng, J. and Loubiere, K., “Effect of Surfactants on Liquid Side Mass Transfer Coefficients: A New Insight;” *Chem. Eng. J.*, **148**, 132-138(2009).
  44. Kluytmans, J. H. J., van Wachem, B. G. M., Kuster, B. F. M. and Schouten, J. C., “Mass Transfer in Sparged and Stirred Reactors: Influence of Carbon Particles and Electrolyte;” *Chem. Eng. Sci.*, **58**, 4719-4728(2003).
  45. Ho, D., Kim, K., Earmme, T. and Kim, C., “Enhancing Gas-Liquid Volumetric Mass Transfer Coefficient;” *J. Ind. Eng. Chem.*, **87**, 1-17(2020).
  46. Hajipour, M. J., Fromm, K. M., Ashkarran, A. A., de Aberasturi, D. J., de Larramendi, I. R., Rojo, T., Serpooshan, V., Parak, W. J. and Mahmoudi, M., “Antibacterial Properties of Nanoparticles;” *Trends Biotechnol.*, **30**, 499-511(2012).
  47. Müller, R. H., Gohla, S. and Keck, C. M., “State of the Art of Nanocrystals – Special Features, Production, Nanotoxicology Aspects and Intracellular Delivery;” *Eur. J. Pharm. Biopharm.*, **78**, 1-9(2011).
  48. Kim, W. G., Kang, H. U., Jung, K. M. and Kim, S. H., “Synthesis of Silica Nanofluid and Application to CO Absorption;” *Sep. Sci. Technol.*, **43**, 3036-3055(2008).
  49. Kim, J. H., Jung, C. W. and Kang, Y. T., “Mass Transfer Enhancement During CO Absorption Process in Methanol/Al O Nanofluids;” *Int. J. Heat Mass Transf.*, **76**, 484-491(2014).
  50. Olle, B., Bucak, S., Holmes, T. C., Bromberg, L., Hatton, T. A. and Wang, D. I. C., “Enhancement of Oxygen Mass Transfer Using Functionalized Magnetic Nanoparticles;” *Ind. Eng. Chem. Res.*, **45**, 4355-4363(2006).
  51. Modena, M. M., Ruhle, B., Burg, T. P. and Wuttke, S., “Nanoparticle Characterization: What to Measure?;” *Adv. Mater.*, **31**, e1901556 (2019).
  52. Jiang, J.-Z., Zhang, S., Fu, X.-L., Liu, L. and Sun, B.-M., “Review of Gas-Liquid Mass Transfer Enhancement by Nanoparticles from Macro to Microscopic;” *Heat Mass Transf.*, **55**, 2061-2072(2019).
  53. Devendiran, D. K. and Amirtham, V. A., “A Review on Preparation, Characterization, Properties and Applications of Nanofluids;” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **60**, 21-40(2016).

#### Authors

**Eungsu Kang:** Postdoctoral associate, Bioenergy and Resources Upcycling Research Laboratory, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 34129, Republic of Korea; es5328@kier.re.kr

**Yoo Seong Choi:** Professor, Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea; biochoi@cnu.ac.kr