

Analysis of air circulation characteristics in a space-approximate cultivation chamber according to CFD-based intake-exhaust arrangement

Hyeon-O Choe*

*Academic Research Professor, Low-Carbon Agriculture-Based Smart Distribution Research Center, Suncheon National University, Suncheon, Korea

[Abstract]

This study comparatively analyzes air-circulation characteristics according to inlet-outlet configurations in a closed cultivation chamber resembling a space-analog environment using CFD. A chamber geometry incorporating a cultivation space and equipment modules was constructed, and three ventilation scenarios were defined. For each scenario, airflow paths and potential stagnation regions were evaluated using velocity fields and streamlines, and quantitative comparisons were performed using domain-averaged velocity, a velocity uniformity metric, and the inlet-outlet pressure difference (Δp). The results indicate that Scenario C exhibits the smallest deviation among velocity components and clearer multi-directional circulation loops, resulting in superior overall air-mixing characteristics. In contrast, Scenarios A and B show relatively larger airflow reachability non-uniformity in certain regions.

▶ **Key words:** Computational Fluid Dynamics, Space-Approximate Cultivation Chamber, Air Circulation, Intake-Exhaust Configuration, Smart Agriculture

[요약]

본 연구는 우주 환경과 유사한 밀폐 재배 챔버에서 흡기-배기 배치에 따른 공기 순환 특성을 CFD 기반으로 비교·분석하였다. 챔버 내부에 재배 공간과 장비 모듈을 포함한 형상을 구성하고, 세 가지 공조 시나리오를 정의하였다. 각 시나리오에 대해 속도와 스트림라인 분석을 통해 공기 순환 경로와 정체 가능 영역을 평가하고, 도메인 평균 속도, 속도 균일성 지표, 흡기-배기 압력차 (Δp)를 이용하여 정량적 비교를 수행하였다. 분석 결과, 시나리오 C는 속도 성분 간 편차가 가장 작고 다방향 순환 루프 형성이 뚜렷하여 전반적인 공기 혼합 특성이 가장 우수한 것으로 나타났다. 반면, 시나리오 A와 B는 특정 영역에서 공기 도달성 편차가 상대적으로 크게 나타났다.

▶ **주제어:** 전산유체역학, 우주 근사 재배 챔버, 공기 순환, 흡기-배기 배치, 스마트농업

-
- First Author: Hyeon-O Choe, Corresponding Author: Hyeon-O Choe
 - Hyeon-O Choe (wishind@scnu.ac.kr), Low-Carbon Agriculture-Based Smart Distribution Research Center, Suncheon National University
 - Received: 2026. 01. 07, Revised: 2026. 01. 21, Accepted: 2026. 02. 04.

I. Introduction

최근 인류의 우주 탐사 활동이 본격화되면서 장기 우주 임무 수행을 위한 식량 자급 기술 개발이 핵심 과제로 부상하고 있다[1]. NASA의 Deep Space Food Challenge에 따르면 심우주 탐사 임무에서 전체 탑재 질량의 약 40% 이상이 식량 및 관련 보급품으로 구성되며, 보급 주기의 한계와 비용 문제를 고려할 때 지구 외 환경에서의 지속 가능한 식량 생산 시스템 구축은 필수적이다[2]. 이러한 배경에서 지구상의 우주 근사 환경을 모사한 폐쇄형 작물 재배 시스템 연구가 활발히 진행되고 있으며, 재배 챔버는 우주농업 기술의 핵심 실증 플랫폼으로 주목받고 있다[3].

우주 근사 재배 챔버는 외부와의 기체 및 에너지 교환이 제한된 밀폐 구조로, 내부 환경은 공조 시스템에 의해 유지된다. 작물 생육 안정성을 확보하기 위해서는 온도, 상대습도, 이산화탄소 농도의 정밀 제어가 요구되며, 예를 들어 상추(*Lactuca sativa*)의 생육 최적 범위는 온도 20-24°C, 상대습도 60-70%, CO₂ 농도 800-1,200 ppm 수준으로 보고되고 있다[4]. 그러나 미세중력 조건과 열전도대류 특성 변화로 인해 우주 근사 환경에서는 공기 유동이 지상 환경과 다르게 형성되며, 공조 불균일성이 지상 대비 30~50% 이상 증가할 수 있다는 연구 결과가 보고된 바 있다[5]. 이러한 공조 불균일성은 챔버 내부의 열적 및 가스 분포 편차를 확대해 작물 생육 속도 및 품질 저하로 이어질 수 있다[6].

한편, 우주 근사 재배 챔버는 구조적 제약으로 인해 공조 장치의 설치 위치가 제한적이며, 내부에는 재배 베드 및 전자장비 모듈과 같은 장애물이 존재한다. 이로 인해 공기 유동 경로가 단순하지 않고, 특정 구역에서 공기 정체 또는 상·하층 간 공기 교환 부족 문제가 발생할 가능성이 높다. 특히 다층 재배 구조를 적용하는 경우, 흡기-배기 배치에 따른 공기 순환 특성은 챔버 전체 유동 관점에서 균일성 및 혼합 특성을 좌우하는 핵심 설계 요소로 작용한다. 따라서 공조 설계 초기 단계에서 흡기-배기 배치에 따른 공기 순환 특성을 사전에 분석하고 비교하는 것이 중요하다.

이에 본 연구에서는 우주 근사 재배 챔버를 대상으로 흡기-배기 배치에 따른 공기 순환 특성을 전산유체역학(CFD) 기반으로 분석한다. 챔버의 공조 구성을 서로 다른 흡기-배기 배치 시나리오로 정의하고, CFD 해석을 통해 공기 유동 경로, 순환 구조 형성 여부, 정체 영역 발생 특성을 비교·분석한다. 본 연구는 흡기-배기 배치에 따른 공기 순환 특성을 CFD 기반으로 정성적으로 제시함으로써,

우주 근사 재배 챔버 공조 설계 시 고려해야 할 구조적 특성과 설계 시사점을 제공하는 것을 목적으로 한다.

II. Preliminaries

1. Related works

1.1 Current domestic research on space-based chamber environmental conditioning

우주 환경에서의 작물 재배는 장기 유인 우주 임무 수행을 위한 핵심 기술로 인식되어 왔으며, 국제우주정거장(ISS)을 중심으로 미세중력 조건에서의 작물 생리 반응과 기체 교환 특성을 분석하는 다양한 실험 연구가 수행되어 왔다[7,8]. 이후 이러한 연구는 지상에서 우주 환경을 모사한 밀폐형 재배 챔버를 활용하는 방향으로 확장되었으며, 밀폐 환경에서의 공기 순환 특성이 작물 생육 안정성에 중요한 영향을 미친다는 점이 공통적으로 보고되고 있다.

특히 우주 근사 환경에서는 중력에 의한 자연 대류가 약화되기 때문에, 공조 시스템에 의한 강제 순환이 챔버 내부 환경 균일성을 좌우하는 핵심 요소로 작용한다. 기존 연구에서는 공조 불균일로 인해 이산화탄소 농도 편차, 국부적인 과열 또는 과습 현상이 발생할 수 있음을 지적하였으며, 이러한 현상이 장기 재배 시 작물 생육 저하로 이어질 수 있음을 보고하였다[9]. 이에 따라 우주 근사 재배 챔버의 공조 설계는 단순한 환경 유지 수단을 넘어, 챔버 내부 공기 유동 구조를 고려한 설계가 요구되는 핵심 설계 요소로 인식되고 있다.

1.2 A study on the application of CFD to air conditioning in closed cultivation chambers and vertical farms.

지상 환경에서의 재배 챔버, 식물공장 및 수직농장과 같은 밀폐 또는 준밀폐 공간을 대상으로 한 공기 순환 분석 연구는 비교적 활발히 수행되어 왔다[10,11]. 초기 연구에서는 공조 장치의 위치, 송풍 방향, 풍량 조건에 따른 내부 온도 및 가스 분포 변화를 실험적으로 분석하였으며, 이후 전산유체역학(CFD)을 활용한 해석적 접근이 공조 설계 검토 수단으로 널리 적용되고 있다.

기존 CFD 기반 연구에서는 흡기 및 배기 위치, 송풍 방향 변화에 따라 공기 유동 경로와 순환 구조가 크게 달라질 수 있음을 제시하였으며, 특히 다층 재배 구조를 갖는 밀폐 공간에서 상·하층 간 공기 교환이 제한될 때 온도 및 이산화탄소 농도 편차가 확대되는 경향이 보고되었다. 이

러한 연구들은 공기 유동 해석을 통해 공조 배치가 재배 환경 균일성에 미치는 영향을 시각적으로 제시하고, 정체 영역의 발생 위치를 확인하는 데 CFD가 효과적인 도구임을 보여준다.

또한 일부 연구에서는 공기 정체 영역(dead zone)의 형성이 작물 생육 불균일의 주요 원인으로 작용함을 지적하고, 흡기-배기 배치 변경 또는 송풍 방향 조정을 통해 정체 영역을 최소화하려는 CFD 기반 분석이 수행되었다 [12]. 다만 이러한 연구들은 주로 특정 시설 규모나 설계 조건을 전제로 수행되는 경우가 많아, 설계 초기 단계에서 다양한 흡기-배기 배치 시나리오를 동일한 조건에서 체계적으로 비교·분석하는 데에는 한계가 존재한다.

1.3 Previous studies on the effect of intake-exhaust arrangement on air circulation

밀폐 공간에서의 공기 순환 특성은 흡기 및 배기 장치의 배치 구조에 크게 의존하고 있다. 특히 자연 대류 효과가 제한된 환경에서는 공조 장치에 의한 강제 대류가 공기 유동 형성의 주된 메커니즘으로 작용하며, 흡기-배기 위치에 따라 공기 유동 경로와 순환 구조가 현저하게 달라질 수 있다[13]. 이러한 특성은 우주 근사 재배 챔버와 같이 밀폐되고 공간 제약이 큰 시스템에서 더욱 두드러진다.

기존 연구에서는 흡기와 배기 위치가 적절히 분리되지 않거나 유동 경로가 충분히 확보되지 않을 경우, 공급된 공기가 챔버 내부로 확산되지 못하고 흡기-배기 사이에서 직접 배출되는 단락 유동(short-circuit flow)이 발생할 수 있음을 보고하였다[14]. 이와 같은 단락 유동은 공기 혼합을 저해하고, 특정 영역에서 공기 정체를 유발하여 재배 환경의 불균일성을 심화시키는 주요 원인으로 지적되고 있다.

또한 흡기-배기 배치에 따라 상·하층 간 공기 교환 특성이 달라지며, 수직 방향 공기 이동이 충분히 형성되지 않을 경우 다층 재배 구조에서 환경 편차가 확대될 수 있음이 보고되었다. 이러한 연구들은 흡기-배기 배치 구조가 공기 순환의 효율성과 균일성을 결정하는 핵심 설계 요소를 시사하며, 공조 설계 초기 단계에서 다양한 흡기-배기 배치 시나리오에 대한 공기 순환 특성을 사전에 분석할 필요성을 제기한다.

III. The Proposed Scheme

1. System configuration and air circulation scenario

1.1 Chamber System Overview

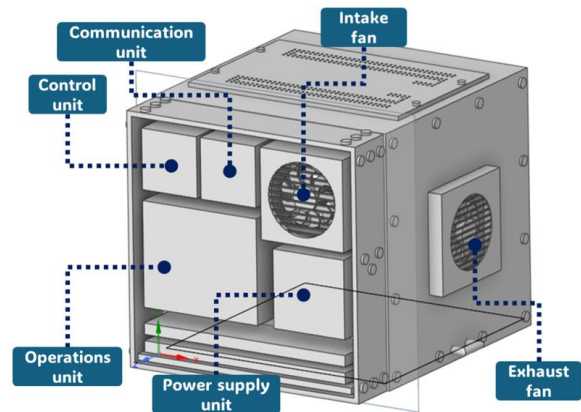


Fig. 1. Space Approximate Cultivation Chamber System Configuration and Main Component Layout

Fig 1은 본 연구에서 고려한 우주 근사 재배 챔버의 개략적인 구조를 나타낸다. 챔버는 직육면체 형태의 밀폐 구조로 설계되었으며, 작물 재배 공간과 시스템 운용을 위한 운영 디바이스 구성 요소가 하나의 챔버 내부에 통합된 구조를 가진다. 본 연구에서는 챔버가 외부 환경과의 기체 교환이 제한된 폐쇄형 구조임을 가정하고, 내부 공기 순환이 공조 장치에 의해 전적으로 제어되는 조건에서 공기 유동 특성을 분석한다.

챔버 내부에는 작물 재배를 위한 재배 영역과 함께 제어부, 통신부, 전원부 및 운영부로 구성된 전장 모듈이 배치되어 있다. CFD 해석을 위해 이들 전장 모듈은 형상 단순화를 통해 직육면체 형태의 비투과성 구조물로 모델링하였다. 공조 시스템은 흡기 팬과 배기 팬으로 구성되며, 흡기-배기 위치 및 조합에 따라 챔버 내부 공기 유동 경로와 순환 구조가 달라질 수 있도록 설정된다.

공기 유동 특성 분석을 위해 챔버 내부에서 공기가 실제로 이동·순환 가능한 영역을 유효 공간으로 정의하고, 재배 영역 및 전장 모듈은 공기 흐름을 제한하는 장애물로 가정하였다. 이러한 모델링을 통해 흡기-배기 배치에 따른 공기 유동 경로 형성, 정체 영역 발생 가능성 및 상·하층 간 공기 교환 특성을 CFD 기반으로 비교·분석한다.

1.2 Defining the air conditioning components

본 연구에서는 우주 근사 재배 챔버의 공기 순환 특성을 분석하기 위해, 공조 시스템을 흡기와 배기로 구성된 강제 순환 구조로 정의한다. 공조 장치는 챔버 내부 공기의 유입과 배출을 담당하며, 흡기-배기 배치에 따라 서로 다른 공기 유동 경로와 순환 구조가 형성되는 것으로 가정한다. 이러한 공조 구성은 흡기-배기 위치 변화에 따른 공기 순환 특성을 비교·분석하기 위한 CFD 해석 모델의 기본 조건으로 설정된다.

흡기 구성 요소는 외부 공기를 챔버 내부로 유입시키는 역할을 수행하며, 챔버 상부 또는 측면에 배치되는 구조를 고려한다. 배기 구성 요소는 챔버 내부 공기를 외부로 배출하는 요소로, 측면 또는 하부에 배치될 수 있도록 설정한다. CFD 해석에서 흡기와 배기는 각각 유입 경계와 유출 경계로 정의되며, 시나리오 간 비교의 공정성을 확보하기 위해 동일한 유입 조건이 적용되는 것으로 가정한다.

본 연구에서는 공조 시스템이 정상 상태에서 연속적으로 운전되는 조건을 가정하고, 시간에 따른 풍량 변화나 간헐 운전과 같은 비정상 운전 조건은 고려하지 않는다. 또한 본 논문의 목적은 흡기-배기 배치에 따른 공기 순환 구조의 차이를 분석하는 데 있으므로, 열 발생, 습도 변화, 이산화탄소 농도 분포 등 열·물질 전달 효과는 해석 범위에서 제외하고 공기 유동 형성에 초점을 둔다.

이와 같은 공조 구성 요소 정의 및 해석 가정을 통해, 이후 절에서는 서로 다른 흡기-배기 배치 시나리오에 대해 CFD 해석을 수행하고, 공기 유동 경로, 순환 구조 형성 여부 및 정체 영역 발생 특성을 비교·분석한다.

본 연구의 공기 유동 해석은 웹 기반 CFD 플랫폼인 SimScale를 활용하여 수행하였다. 해석은 비압축성 유동을 가정한 Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식을 기반으로 하였으며, 난류 효과를 고려하기 위해 $k-\omega$ SST 난류 모델을 적용하였다. 해당 난류 모델은 벽면 인근 유동 예측 정확도와 자유 유동 영역에서의 안정성을 동시에 확보할 수 있어, 밀폐 챔버 내부 공기 순환 해석에 적합한 것으로 알려져 있다.

챔버 내부 공기는 비압축성 유체로 가정하고, 중력에 의한 부력 효과는 고려하지 않아 공조 장치 배치에 따른 강제 대류 특성에 초점을 두었다. 흡기 및 배기 경계 조건은 속도 입구(velocity inlet)와 압력 출구(pressure outlet) 조건으로 설정하였으며, 모든 시나리오에서 동일한 경계 조건 값을 적용하여 공정한 비교가 가능하도록 하였다. 벽

면은 비미끄럼(no-slip) 조건으로 설정하였다.

수치 계산은 정상 상태(steady-state) 해석으로 수행하였으며, 압력-속도 연성 해법으로 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 해석의 수렴 여부는 속도 성분(U_x , U_y , U_z), 압력(p), 난류 변수(k , ω)에 대한 잔차(residual) 감소 경향을 기준으로 판단하였으며, 모든 시나리오에서 주요 변수의 잔차가 10^{-3} 이하로 안정적으로 수렴함을 확인하였다. 이를 바탕으로 본 연구의 CFD 해석 결과는 수치적으로 안정된 상태에서 도출된 것으로 판단하였다.

1.3 Defining a Cooperation Scenario

본 연구에서는 우주 근사 재배 챔버 내부의 공기 순환 특성을 정량적으로 비교·분석하기 위해, 흡기 및 배기 위치의 조합에 따라 서로 다른 세 가지 공조 시나리오를 정의한다. 각 시나리오는 흡기-배기 배치 구조만을 변화시키고, 유입 조건 및 공조 장치의 성능은 동일하게 유지함으로써, 배치 차이에 따른 공기 유동 경로 형성 및 순환 특성의 변화를 CFD 해석을 통해 평가하는 것을 목적으로 한다. 각 시나리오의 개념적 구성은 Fig 2에 제시되어 있다.

가. 시나리오 A: 측면 상단 흡기-하단 배기 구조

시나리오 A는 챔버 측면 상단에 흡기구를 배치하고, 하단부에 단일 배기구를 설치한 공조 구성이다. 상단 측면에서 유입된 공기는 챔버 내부를 따라 하향 흐름을 형성하며, 하단 배기를 통해 외부로 배출되는 유동 경로를 갖는다.

이 구조는 상부 영역으로의 공기 유입이 용이하다는 장점을 가지며, 중력 방향과 무관한 강제 대류 조건에서 상부에서 하부로 이어지는 비교적 단순한 순환 흐름이 형성될 가능성이 있다. 반면, 유입 공기가 하부 배기로 직접 유도될 경우 챔버 내부 전반으로의 공기 확산이 제한될 수 있으며, 내부 구조물 배치에 따라 국부적인 정체 영역이 형성될 가능성이 존재한다.

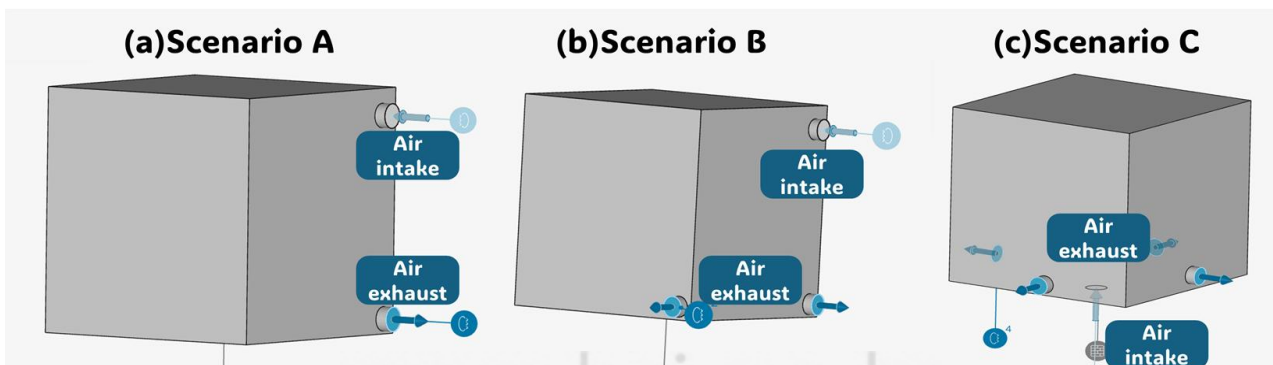


Fig. 2. Conceptual diagram of each scenario for intake-exhaust layout CFD analysis

나. 시나리오 B: 측면 상부 흡기-하단 이중 배기 구조

시나리오 B는 챔버 측면 상부에 흡기 팬을 배치하고, 서로 다른 면의 하단에 두 개의 배기 팬을 설치한 공조 구성이다. 본 시나리오는 상부에서 유입된 공기가 챔버 내부를 따라 하부 방향으로 이동한 뒤, 하단에 분산 배치된 배기를 통해 배출되도록 설계되었다.

이 구조는 상부 흡기를 통해 챔버 상부 영역에 신선 공기를 공급하면서, 하단 이중 배기를 통해 공기 배출을 분산시켜 국부적인 고속 제트 형성과 압력 집중을 완화하는 것을 목표로 한다. 또한 단일 배기 구조에서 발생할 수 있는 단락 유동(short-circuit flow)을 저감하고, 하부 재배 영역 전반으로의 공기 도달성을 향상시키는 데 중점을 둔다.

다만, 흡기 위치가 상부에 집중되어 있는 특성상, 상부에서 하부로의 수직 이동 과정에서 내부 구조물 배치에 따라 유동 경로가 영향을 받을 수 있으며, 상부 영역의 공기 체류 시간이 상대적으로 증가할 가능성도 존재한다.

다. 시나리오 C: 하단 흡기-4측면 배기 구조

시나리오 C는 챔버 하단부에 흡기구를 배치하고, 네 개의 측면에 배기구를 분산 배치한 공조 구성이다. 하부에서 유입된 공기는 챔버 내부를 상향 및 측방향으로 확산되며, 다수의 배기구를 통해 외부로 배출되는 복합적인 순환 흐름을 형성한다.

이 구조는 공기 유출 경로를 다방향으로 분산함으로써 내부 순환 루프 형성을 촉진하고, 챔버 전반으로의 공기 도달성과 혼합 특성을 개선하는 데 유리한 배치로 예상된다. 특히 하부 재배 영역에서 상부로의 공기 이동이 유도될 수 있어, 상·하층 간 공기 교환 측면에서 상대적으로 안정적인 순환 구조를 형성할 가능성이 있다. 다만, 다수의 배기구 적용으로 인해 공조 시스템 구성의 복잡도가 증가하며, 실제 시스템 적용 시 배기 유량 균형에 대한 추가적인 검토가 필요하다.

본 연구에서는 상기 세 가지 공조 시나리오를 대상으로 CFD 해석을 수행하고, 공기 유동 경로, 내부 순환 구조 형성, 정체 영역 발생 특성 및 상·하층 공기 도달성 측면에서 시나리오별 공기 순환 특성을 비교·분석한다.

IV. Results and Analysis

1. Analysis of air circulation characteristics by scenario

본 연구에서 수행한 CFD 해석은 비압축성 방정식 기반

해석으로부터 도출된 속도장, 압력장 및 난류 관련 변수를 이용하여 평가하였다. U_x , U_y , U_z 는 각각 x, y, z 방향의 속도 성분을 의미하며, p는 챔버 내부의 정압(static pressure) 분포를 나타낸다. 난류 효과는 k- ω SST 난류 모델을 적용하여 고려하였으며, 여기서 k는 난류 운동에너지, ω 는 비소산율을 의미한다. 각 변수에 대한 잔차는 반복 계산 과정에서의 수치적 오차 감소 경향을 나타내며, 본 연구에서는 잔차 수렴 특성을 통해 각 시뮬레이션 결과의 수치적 안정성과 해석 수렴 여부를 판단하였다.

1.1 Scenario A: Side top intake - bottom exhaust structure

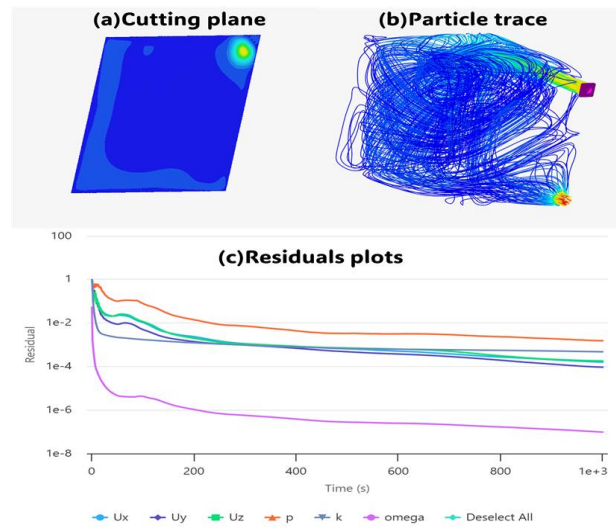


Fig. 3. Scenario A: Side top intake - bottom exhaust structure analysis

시나리오 A에서는 측면 상단에 위치한 흡기를 통해 유입된 공기가 챔버 내부를 따라 하부 배기 방향으로 이동하며 전반적인 수직 순환 구조를 형성하였다. 도메인 평균 속도 성분 분석 결과, 수직 방향 속도 성분이 상대적으로 크게 나타나 상·하부 간 공기 교환이 유도되는 경향을 보였다. 흡기 경계면에서의 평균 속도는 설정된 조건과 유사하게 유지되었으며, 배기 경계면에서도 이에 상응하는 유동 응답이 관찰되어 유입된 공기가 챔버 내부를 거쳐 배출되는 정상적인 순환 구조가 형성됨을 확인하였다.

압력 분포 분석 결과, 흡기와 배기 사이에 명확한 압력 구배가 형성되었으며, 이는 공기 순환을 유도하는 구동력으로 작용하였다. 다만, 일부 영역에서는 유속이 상대적으로 낮은 구간이 존재하여, 재배 공간 내 공기 도달성의 공간적 편차 가능성이 시사되었다. 이러한 특성은 구조적으로 상부 유입에 의존하는 공조 배치의 한계로 해석될 수 있다.

1.2 Scenario B: Side upper intake - bottom dual exhaust structure

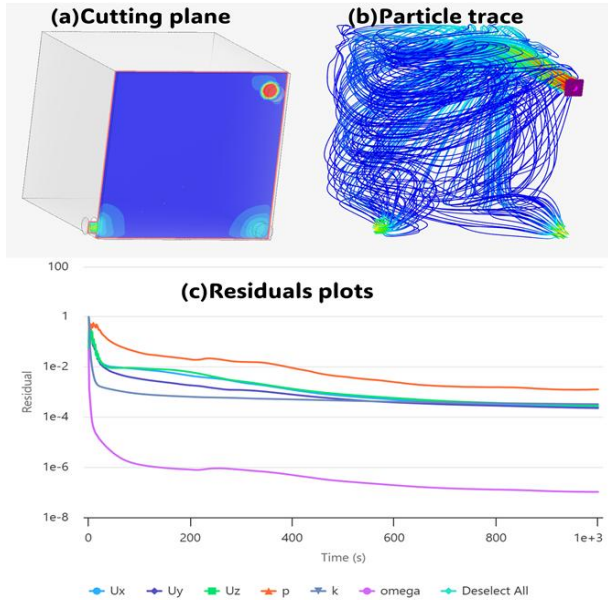


Fig. 4. Scenario B: Analysis of the side upper intake-lower dual exhaust structure

시나리오 B는 측면 하부 흡기를 통해 공기를 유입하고, 서로 다른 면에 배치된 두 개의 하단 배기를 통해 공기를 배출하는 구조이다. 이 구성에서는 유입된 공기가 챔버 하부 영역을 중심으로 확산된 후 분산 배기되는 유동 패턴이 형성되었다. 도메인 평균 속도 성분 분석 결과, 수평 방향 성분의 비중이 시나리오 A에 비해 증가하는 경향을 보였으며, 이는 챔버 하부 재배 영역을 중심으로 한 횡방향 공기 확산이 강화되었음을 의미한다.

두 개의 배기를 통한 분산 배출 구조로 인해, 배기 인근에서의 국부적인 고속 제트 현상은 완화되었으며, 전체적으로 비교적 안정적인 유동 분포가 유지되었다. 그러나 흡기와 배기가 동일한 하부 영역에 집중됨에 따라, 상부 영역으로의 공기 전달은 상대적으로 제한되는 특성이 관찰되었다. 이는 공조 효율이 공간적으로 균일하지 않을 수 있음을 시사한다.

1.3 Scenario C: Bottom intake - four-sided exhaust structure

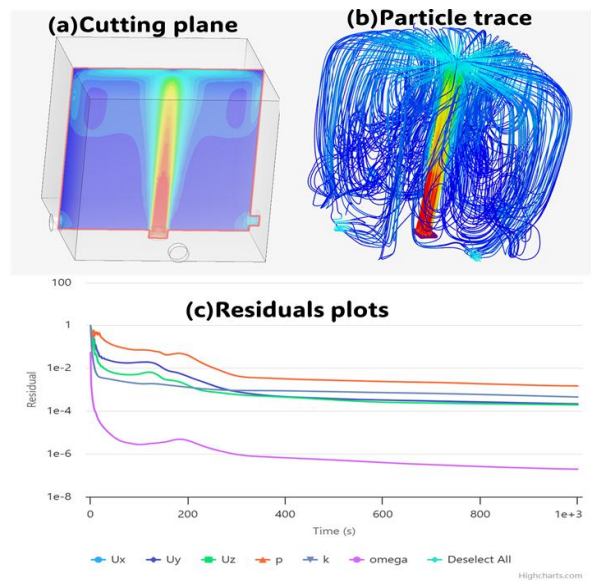


Fig. 5. Scenario C: Bottom Intake - Four-Sided Exhaust Structure Analysis

Table 1. Qualitative comparison of air circulation characteristics by air conditioning scenario

Category	Scenario A	Scenario B	Scenario C
Air intake-exhaust configuration	Single intake - Single exhaust	Single intake - Distributed exhausts	Single intake - Multiple exhausts
Dominant flow direction	Vertically dominated	Horizontal diffusion with lower-region concentration	Multi-directional diffusion
Vertical air exchange (upper-lower)	Relatively clear	Lower region dominant, upper region limited	Excellent throughout the chamber
Air mixing characteristics	Moderate	Moderate to good	Excellent
Potential stagnation zones	Moderate (lower region and corners)	Low (lower region, partial upper areas)	Low
Flow uniformity	Moderate	Moderate to good	Excellent
Short-circuit flow risk	Low	Low	Very low
Pressure distribution characteristics	Localized pressure gradients	Pressure relaxation via distributed exhausts	Strong pressure diffusion effect
Ventilation system complexity	Low	Moderate	High
Overall design evaluation	Simple and straightforward configuration	Favorable for lower cultivation zones	Most suitable for achieving environmental uniformity

시나리오 C에서는 하단에서 공기를 유입하고, 챔버 사면에 배치된 다수의 배기를 통해 공기를 배출하는 구조를 적용하였다. 이로 인해 유입된 공기가 챔버 전체로 확산된 후 다방향으로 배출되는 순환 패턴이 형성되었다. 도메인 평균 속도 성분은 특정 방향에 과도하게 집중되지 않고 비교적 균형 있게 분포하였으며, 이는 공기 혼합이 효과적으로 이루어졌음을 의미한다.

압력 분포 측면에서는 다수의 배기로 인해 배기 경로가 분산되면서, 단일 배기 구조 대비 국부 압력 집중 현상이 완화되었다. 반면, 배기 수 증가에 따른 전체 공조 시스템 구성 복잡도 및 잠재적인 압력 손실 증가는 향후 실제 시스템 적용 시 고려가 필요한 요소로 판단된다. 그럼에도 불구하고, 시나리오 C는 재배 영역 전반에 대한 공기 도달성 및 유동 관점에서 혼합 특성 확보 측면에서 가장 안정적인 공기 순환 구조를 보였다.

2. Streamline and cross-section-based flow structure analysis

각 시나리오에 대해 스트림라인 및 속도 단면 분포를 분석한 결과, 공조 배치 구조에 따른 유동 경로 차이가 명확히 나타났다. 시나리오 A에서는 상부 흡기에서 형성된 제트가 하부 배기 방향으로 이동하며 단일 순환 루프를 형성하였으나, 일부 영역에서는 스트림라인 밀도가 낮아 정체 가능 영역이 관찰되었다. 시나리오 B에서는 하부 영역을 중심으로 다수의 스트림라인이 분산되어 형성되었으며, 단면도에서도 하부 재배 영역을 따라 비교적 균일한 유속 분포가 확인되었다. 반면 상부 영역에서는 유속이 감소하는 경향이 나타났다. 시나리오 C에서는 스트림라인이 챔버 전체를 가로지르며 다방향 순환 루프를 형성하였고, 단면도에서도 고·저속 영역의 대비가 완화되어 전반적인 공기 혼합이 향상된 유동 구조가 확인되었다.

이러한 시각적 분석 결과는 도메인 평균 속도 및 압력

분석에서 도출된 정량적 경향과 일관된 특성을 보이며, 공조 배치 구조가 공기 순환 패턴을 결정하는 핵심 요소임을 뒷받침한다.

Table 1은 세 가지 공조 시나리오에 대해 공기 순환 특성을 정성적으로 비교한 결과를 요약한 것이다. 시나리오 A는 구조가 단순하고 상·하부 공기 교환이 비교적 명확하다는 장점이 있으나, 국부 정체 영역 발생 가능성이 존재한다. 시나리오 B는 하부 재배 영역 중심의 공기 확산에는 유리하나, 상부 영역 공기 도달성이 제한될 수 있다. 반면 시나리오 C는 챔버 전반에 걸쳐 가장 균일한 공기 분포를 형성하였으나, 공조 시스템 구성 복잡도가 상대적으로 증가하는 특성을 가진다.

Table 2에 나타난 바와 같이, 시나리오 A는 수직 속도 성분(U_z)이 가장 크게 나타나 상·하부 공기 교환이 우세한 반면, 수평 확산은 제한적인 경향을 보였다. 시나리오 B는 수평 성분(U_x)이 상대적으로 증가하여 하부 영역 중심의 공기 확산에 유리하였으나, 전체 속도 크기 및 수직 교환 측면에서는 제한이 관찰되었다. 반면, 시나리오 C는 속도 성분 간 편차가 가장 작고 평균 속도 크기가 가장 크게 나타나, 챔버 전반에 걸친 공기 혼합과 균일성 확보 측면에서 가장 안정적인 공조 특성을 보였다. 다만, 시나리오 C는 상대적으로 높은 압력차를 보이며, 이는 공조 시스템 설계 시 에너지 소비 측면에서의 추가적인 고려가 필요함을 시사한다.

3. Discussion and Limitations

본 연구에서는 흡기-배기 배치 구조에 따른 공기 순환 특성을 CFD 기반으로 비교·분석하였다. 시나리오 A는 수직 방향 속도 성분이 우세하여 상·하부 공기 교환을 유도하는 데 효과적이었으나, 일부 영역에서 공기 도달성 편차와 정체 가능성이 관찰되었다. 시나리오 B는 하단 이중 배기를 통해 하부 영역의 유동 분산이 개선되었으나, 상부에

Table 2. Quantitative comparison of air circulation characteristics by air conditioning scenario

Category	Scenario A	Scenario B	Scenario C
U_x (m/s)	0.39	0.47	0.44
U_y (m/s)	0.50	0.42	0.46
U_z (m/s)	0.55	0.31	0.41
U (m/s)	0.70	0.67	0.72
Mean intake velocity (m/s)	0.65	0.62	0.61
Mean exhaust velocity (m/s)	0.73	0.69	0.75
Mean intake pressure, P_{in} (Pa)	0.31	0.28	0.34
Mean exhaust pressure, P_{out} (Pa)	0.00	0.00	0.00
Pressure difference Δp (Pa)	0.31	0.28	0.34
Velocity component variance	Medium	High	Low
Final velocity residual	$< 1 \times 10^{-3}$	$< 1 \times 10^{-3}$	$< 1 \times 10^{-3}$

서 하부로의 공기 확산 과정에서 횡방향 혼합은 제한적인 경향을 보였다. 반면, 시나리오 C는 속도 성분 간 편차가 가장 작고 스트림라인 분석에서도 다방향 순환 루프가 형성되어, 챔버 전반에 걸친 공기 혼합과 유동 균일성이 가장 우수한 것으로 나타났다.

정량 지표 비교 결과에서도 이러한 경향은 일관되게 확인되었다. 시나리오 C는 도메인 평균 속도 크기와 유동 균일성 측면에서 가장 안정적인 특성을 보였으며, 이는 자연 대류가 제한된 우주 근사 환경에서 재배 공간 전체의 유동 관점에서 균일성 잠재력 및 혼합 특성 확보에 가장 유리한 공조 배치임을 시사한다. 다만, 상·하부 다중 흡기와 다수의 배기 경로를 포함하는 구조로 인해, 팬 구성 요소 수 증가와 제어 변수 확대에 이어질 가능성이 있으며, 이에 따라 공조 시스템 설계 및 운용 관점에서 구조적·제어적 복잡도가 증가할 수 있음을 함께 고려할 필요가 있다. 본 연구에서 언급한 시나리오 C의 복잡도 증가는 경제적 비용 분석을 의미하기보다는, 공조 시스템 구성 및 운전 조건 설정 측면에서의 시스템 설계 부담 증가를 의미한다.

본 연구는 비압축성 단상 유동을 가정한 정상 상태 해석을 기반으로 수행되었으며, 열 전달, 습도 및 기체 농도 변화와 같은 다물리 효과는 고려하지 않았다. 또한 챔버 내부 구조물을 단순화하여 모델링하였기 때문에 실제 시스템에서의 세부 유동 특성은 일부 차이를 가질 수 있다. 그런데도, 본 연구는 공조 설계 초기 단계에서 흡기-배기 배치 구조에 따른 공기 순환 특성을 정량적 지표와 시각적 분석을 통해 비교할 수 있는 실질적인 기준을 제시하였다는 점에서 의의가 있다. 향후 연구에서는 열·가스 전달을 포함한 확장 해석과 실증 실험을 통해 본 결과를 보완할 필요가 있다.

IV. Conclusions

본 연구에서는 우주 근사 재배 챔버를 대상으로 흡기-배기 배치 구조에 따른 공기 순환 특성을 CFD 기반으로 비교·분석하였다. 동일한 유량 조건하에서 세 가지 공조 시나리오를 설정하고, 도메인 평균 속도 성분, 압력 분포, 스트림라인 및 단면 유동 구조를 종합적으로 분석함으로써 공조 배치에 따른 유동 특성 차이를 정량적·정성적으로 평가하였다. 그 결과, 시나리오 A는 상·하부 공기 교환이 명확한 구조를 보였으나 일부 영역에서 공기 도달성 편차가 관찰되었으며, 시나리오 B는 하부 재배 영역 중심의 유동 분산에 유리한 특성을 나타냈다. 반면, 시나리오 C는

속도 성분 분포가 가장 균일하고 다방향 순환 구조가 형성되어, 우주 근사 환경에서 재배 공간 전반의 유동 관점에서 혼합 특성 확보 측면에서 가장 안정적인 공조 특성을 보였다.

본 논문의 우수성은 상세한 열·물질 전달 해석이나 실증 실험 이전 단계에서, 공조 배치 구조만을 변화시켜 공기 순환 특성을 체계적으로 비교·분석하였다는 데 있다. 특히 도메인 평균 유동 지표와 압력차, 시각적 유동 구조 분석을 결합함으로써 공조 설계 초기 단계에서 설계 대안을 선별할 수 있는 실질적인 근거를 제시하였다. 향후 연구에서는 본 연구에서 도출한 공조 시나리오별 특성을 바탕으로 열 전달, 습도 및 이산화탄소 농도를 포함한 다물리 해석을 수행하고, 축소형 실험 챔버를 통한 실증 검증을 통해 CFD 결과의 타당성을 확장할 예정이다. 나아가 공기 유동 특성과 작물 생육 반응을 연계한 통합 환경 제어 전략으로 연구를 발전시킴으로써, 우주 근사 재배 시스템의 설계 및 운용 최적화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This paper was supported by Suncheon National University Global University Project Fund in 2025

REFERENCES

- [1] Carillo, Petronia, Biagio Morrone, Giovanna Marta Fusco, Stefania De Pascale, and Youssef Roupheal, "Challenges for a Sustainable Food Production System on Board of the International Space Station: A Technical Review", *Agronomy*, 10, no. 5: 687, 2020.
- [2] Monsi Roman, Angela Herblet, James Broyan, Grace L. Douglas, Dawn Turner, "NASA Centennial Challenges Deep Space Food Challenge Competition to Incentivize Innovation in Food Systems for Long-Duration Space Exploration Missions", *50th International Conference on Environmental Systems*, 12(15), 2021.
- [3] Ragany, A., Haggag, M., El-Dakhkhni, W., & Zhao, B., "Closed-loop agriculture systems meta-research using text mining", *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 2023.
- [4] Zhang L, Huang T, Zhang Q, Wei S, Escalona Contreras VH, et al., "Plant factory technology as a powerful tool for improving vegetable quality: lettuce as an application example", *Vegetable Research*, 4, e017, 2024.
- [5] Aouinet, H., Dhahri, M., Yüksel, A. et al., "Numerical Investigation

of Airflow Dynamics and Thermal Comfort in Space Station Habitats Under Microgravity Conditions”, Aerotec, Missili Spaz, 2025.

- [6] Ben Othman, F., Delattainant, S., Alexandre, A. L., Roque, M., and Roque, C., “Development and evaluation of a climatic chamber with the potential to enhance plant resilience and optimize agricultural productivity”. *Thermal Science and Engineering Progress*, 62, 2025.
- [7] Nie, H., Zhou, W., Zheng, Z., Deng, Y., Zhang, W., Zhang, M., Jiang, Z., Zheng, H., Yuan, L., Yang, J., Wang, H., “Exploring plant responses to altered gravity for advancing space agriculture”, *Plant Communications*, 6, 6, 2025.06.
- [8] Maffei, M.E., Balestrini, R., Costantino, P. et al., “The physiology of plants in the context of space exploration”, *Commun Biol*, 7, 1311, 2024.
- [9] Ryu Kyung Jin, Jaehwan Son, H and Kyu-Dong Nah. "A study on the design of air conditioning system in the mushroom cultivation greenhouse" *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society* vol 18, no.2, 2017.
- [10] Jeong-Min Lee, Inchan Choi, Donghyeok Im, Taehyun Kim, Jeong-Hyun Baek, Jeongho Lee, Lee, Seungchul and Jeong-Wook Heo. "Development of Container-Type Vertical Farm for Year-Round Production of Long Stem Plants and Study on Flow Distribution" *The Journal of the Korea Contents Association* 24, no.12, 2024.
- [11] Hae Seong Hwang, Sung Ho Lee and HAN SEUNG HO. "Estimation of Ventilation Efficiency to Improve Growing Conditions in Container Smart Farms" *Transactions of the KSME, A* 44, no.11, 873-879, 2020
- [12] Lee Jeong Min. “Airflow Analysis and Temperature-Humidity Maintenance Technology to Mitigate Strawberry Tipburn in Vertical Farms”, *Seoul National University Graduate School Master's thesis*, 2025
- [13] Hwang Ji-hyun. "A Study on the Characteristics of Ventilation Systems for Improving Energy Efficiency." *Doctoral Dissertation*, University of Ulsan Graduate School, 2014. Ulsan.
- [14] Kang Tae-uk. "An Experimental Analysis of Ventilation Effectiveness using Tracer Gas" *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology* 30, no.2, 260-266, 2006
- [15] Lee Dong-hwan, “A Study on the Prevention of Condensation in Metal Products Inside Containers,” *Master's thesis*, Korea Maritime and Ocean University, 2023.

Authors



Hyeon-O Choe received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees in information and communication engineering from Suncheon National University, Republic of Korea, in 2017, 2019 and 2025, respectively.

Dr. Choe joined currently a Research Professor at the Low-Carbon Agriculture-Based Smart Distribution Research Center. His research interests include smart agriculture systems, digital twin-based environmental modeling, AI-based prognostics and health management (PHM) for agricultural equipment, sensor data analytics, and energy-efficient control algorithms for smart farms and vertical farming systems.