

# CFD 해석 기반 마이크로버블 부상조의 유동균일성과 에너지 소비를 고려한 설계 연구

손성원<sup>1†</sup> · 김일호<sup>1</sup> · 이재엽<sup>1</sup> · 임동범<sup>2</sup> · 후미타케 니시무라<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원, <sup>2</sup>교토대학교

## CFD-Based Design of a Microbubble Flotation Tank Considering Flow Uniformity and Energy Consumption

SUNGWAN SON<sup>1†</sup>, ILHO KIM<sup>1</sup>, JAIYEOP LEE<sup>1</sup>, DONGBEOM IM<sup>2</sup>, FUMITAKE NISIMURA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 289 Goyangdeae-Ro, Ilsandeo-Gu, Goyang-si, Gyeonggi-Do, 10223, Korea

<sup>2</sup>Kyoto University, 1-2 Yumihama, Otsu-shi, Shiga-ken, 520-0811, Japan

<sup>†</sup>Corresponding author :  
sswan@kict.re.kr

Received 11 December, 2025  
Revised 14 January, 2026  
Accepted 14 January, 2026

**Abstract >>** Bubble floating tank for wastewater sample sampling is designed using computational fluid dynamics (CFD) analysis. A porous plate is installed so that the wastewater flowing from the lower part of the floating tank has a uniform flow distribution, and an appropriate opening rate of the porous plate is derived. In addition, considering the uniformity of the rising speed of the wastewater filled in the floating tank, the height of the floating tank required for efficient bubble floating is derived. A porous plate hole diameter of 10 to 18 mm is considered in the design of the porous plate, and a hole diameter of 12 mm is determined to be the most appropriate when considering both pressure drop, velocity Root Mean Square (RMS) values, and power consumption. When considering the velocity RMS value for each floating tank height, it was found that a floating tank height of 0.5 m or more was required.

**Key words :** Waste water based surveillance(폐수 기반 감시), Micro-bubble(미세 버블), Suspended solid(부유입자), Computation fluid dynamics(전산유체역학), Flotation tank(부상조)

## 1. 서론

2019년 발생한 SARS-CoV-2 팬데믹 기간 동안 가장 어려운 문제 중 하나는 발병 상태를 실시간으로 모니터링하는 것이었다<sup>1,2)</sup>. 특히 SARS-CoV-2가 처

음 등장했을 때 전체 감염자 수를 샘플링(sampling)할 수 있는 진단 테스트가 충분하지 않아 감염의 추이를 예측하기가 어려웠다. 데이터 풀(data pool) 및 검사 키트 제조가 크게 증가하면서 일시적으로 감염자 수를 모니터링이 가능해 보였지만 개인의 검사에

대한 저항으로 인해 상황은 더욱 악화되었다. 또한 가정 내 검사의 발전으로 개인의 편의성이 높아졌지만 사례 수를 모니터링하는 것은 훨씬 더 어려워졌다. 한편, 우려 변종(Variants of Concern, VOC)의 출현으로 인해 팬데믹과 싸우기 위해 미접종 집단과 접종자 집단 모두에서 발생과 확산을 추적하는 감시 노력이 중요해졌다. 따라서 증가하는 사례를 감지하고 우려 변종(VOC)을 식별하기 위한 조기 경고 시스템이 절실히 필요해졌다. 이로 인해 인구적인 차원(population level)에서 수준에서 SARS-CoV-2 모니터링을 위한 확립된 폐수 기반 감시(Wastewater Based Surveillance, WBS)의 사용이 확대되었다<sup>3-6)</sup>. 폐수 기반 감시(WBS)는 유역 범위 내의 전체 인구에 대한 편향되지 않은 감염 추이를 저비용, 실시간으로 모니터링 할 수 있음이 보고되었다<sup>7,8)</sup>. 이는 여러 국가에서 발생하는 코로나19 팬데믹 기간 동안 SARS-CoV-2의 유통 추세를 결정하는 데 효과적인 것으로 나타났으며 임상 진단 능력의 가용성, 휴일 동안 관찰되는 보고 지연 또는 인구의 협조와도 무관하다<sup>9-11)</sup>. 폐수 샘플은 희석도가 높기 때문에 임상 샘플보다 SARS-CoV-2 농도가 현저히 낮다. 따라서 분석은 매우 민감할 필요가 있다<sup>12)</sup>. 일부 1단계 농축 방법이 사용되지만 대부분의 바이러스 농축 방법은 몇~수백 리터의 물을 1차 농축 방법으로 소량으로 농축한 후 2차 농축 방법으로 몇 밀리리터까지 농축하는 두 단계로 구성됩니다. 이러한 방법은 대부분의 번거로운 화학반응을 수반하여, 시료에 존재하는 바이러스 입자는 높은 비율로 손실된다.

버블부상 방법은 폐수의 정화에 자주 활용되는 기술으로써 수중의 부유물질(Suspended Solid, SS)을 효과적으로 분리하여 수면에 농축시킬 수 있다. 버블부상 장치에서는 기계적 또는 전기적으로 발생시킨 버블에 부유물질이 흡착하여 버블과 함께 수면방향으로 상승한다. 버블부상에는 화학반응이 필수적이지 않기 때문에 화학반응에 소요되는 시간이 필요하지 않으며 화학반응으로 인한 바이러스 입자의 손실이 발생하지 않는다. 따라서 저자들은 버블부상 방식을 사용하여 폐수 기반 감시를 위한 시료를 농축시키는

장치를 개발하려고 한다. 폐수 중 부유물질은 그 크기와 밀도가 다양하며 수중에 무질서하게 분포한다. 부유물질을 효과적으로 흡착하여 부상시키기 위해서는 적절한 부상조의 설계가 중요하다. 버블 부상조는 샘플링 폐수의 용량 및 발생 버블의 크기에 적합한 깊이가 필요하다. 또한 버블 부상에 사용되는 미세버블은 낮은 밀도로 인하여 폐수의 유동에 따라서 부상조 내에서 불균일하게 분포할 수 있기 때문에 균일한 유동을 갖는 부상조의 구조가 중요하다.

본 연구에서는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 해석을 사용하여 폐수 시료 샘플링을 위한 버블 부상조를 설계한다. 부상조의 하부에서 유입되는 폐수가 균일한 유동분포를 갖도록 다공판을 설치하며 적절한 다공판의 개구율을 도출한다. 또한 부상조에 채워지는 폐수의 상승속도 균일도를 고려하여 효율적인 버블부상에 필요한 부상조의 높이를 도출한다.

## 2. 폐수 버블부상 시스템

폐수에 포함된 병원균 또는 병원성 바이러스의 검출을 위해서는 입자상 물질을 농축하는 전처리 과정이 필요하다. 폐수 내의 병원균 및 바이러스는 일반적으로 고형물 입자(SS)와 함께 존재하기 때문에 고형물의 농도 농축을 통해서 검출 효율을 높일 수 있다. 본 연구에서는 전처리 과정에서 병원균 및 바이

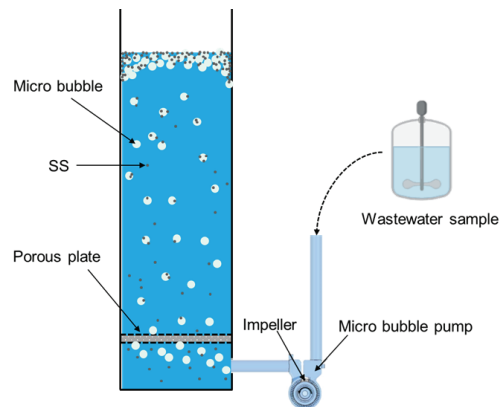


Fig. 1. Micro-bubble flotation system

러스의 손상을 줄일 수 있는 버블부상 방식의 전처리 시스템을 고려하고 있다. Fig. 1은 마이크로버블 펌프를 사용한 버블부상 시스템을 보여주고 있다. 폐수로부터 수집된 시료는 교반장치가 있는 탱크에서 마이크로버블펌프를 통하여 부상조로 공급된다. 마이크로버블 펌프는 특수하게 고안된 임펠러에 의하여 스스로 흡입한 공기를 미세한 버블로 만들어서 펌프를 통과하는 물과 함께 공급한다. 마이크로버블과 함께 부상조에 공급된 폐수는 다공판(porous plate)을 통과하며 부상조에 채워진다. 이때 다공판은 공급된 폐수의 흐름이 부상조 내에서 채워질 때 수직방향 속도 성분이 어느 한쪽으로 치우치지 않고 고르게 분포하도록 만든다. 다공판의 개구율 및 홀(hole) 형상에 따라서 다공판 전후의 압력감소 및 속도 균일도가 달라진다. 따라서 압력강하량이 과도하게 증가하지 않는 범위에서 수직 방향 속도성분 분포가 균일한 다공판의 설계가 중요하다. 또한 마이크로버블 및 고형물 입자의 Volume fraction 및 밀도가 매우 낮기 때문에 부상 분리된 마이크로버블-고형물 입자 층의 두께도 얇게 형성된다. 따라서 분리된 고형물입자의 회수를 용이하게 만들기 위해서 넓은 형태보다 깊은 형태의 부상조로 설계한다. 버블 부상조의 깊이를 선정하기 위해서, 마이크로버블 펌프로부터 공급되는 폐수의 복잡한 유동형태가 사라지고 안정화되는 최소 깊이를 CFD 해석결과로부터 결정하였다.

### 3. 신속배수용 배수펌프 시스템

본 연구의 수행을 위해서 Ansys CFX 프로그램을 사용하여 부상조 내부의 유동을 해석하였다. 부상조 내부유동 해석을 위해 고려한 해석 영역 및 다공판 형상은 Fig. 2와 같다. 폐수는 부상조 아래쪽 입구(inlet)에서 유입되며, 그 높이는 바닥으로부터 0.02 m이다. 폐수 입구의 직경은 0.015 m이며 체적유량 1 m<sup>3</sup>/hour의 유량으로 폐수가 공급된다. 해당 유량으로는 20초에 약 5.5 리터의 폐수를 처리할 수 있다. 폐수가 고르게 부상조를 차오르게 하기 위해서 바닥

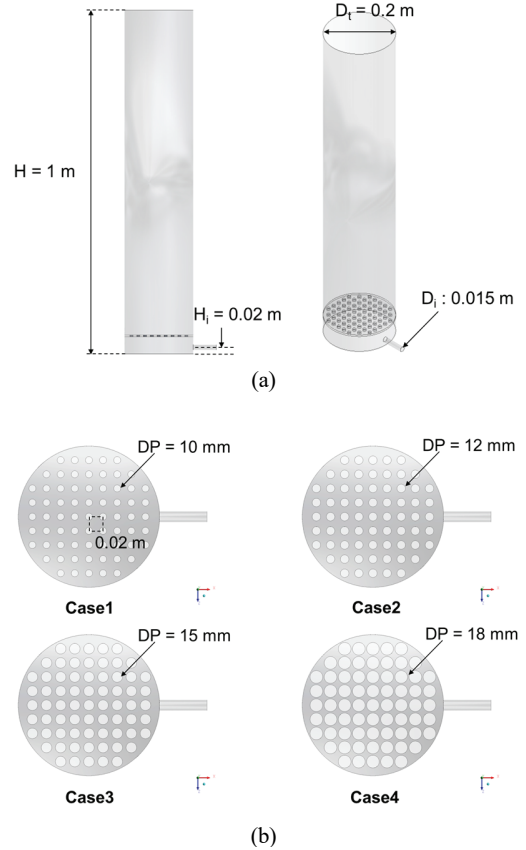


Fig. 2. Computational domain and shape of porous plate

으로부터 0.05 m 높이에 다공판이 설치되어 있다. 다공판에는 폐수가 통과할 수 있는 69개의 홀(Hole)이 고르게 분포되어 있으며 본 연구에서는 각각 직경이 다른 4가지 경우(case)의 다공판을 고려하였다. 다공판 홀의 크기는 각각 10 mm, 12 mm, 15 mm, 및 18 mm이며, 이때의 개구율은 각각 17.25%, 24.84%, 38.18%, 및 55.89%이다.

Fig. 3은 부상조 유동해석을 위한 격자(grid)를 보여주고 있다. 해석 영역 중에서 유속이 빠르고 유동이 복잡한 하부 영역에 더 많은 격자수를 집중시켜서 조밀한 격자를 생성하였다. 전체적으로 테트라(tetra) 형태의 격자를 생성하였으며, 벽면 및 코너 근처의 자세한 유동 모사를 위하여 격자층(prism layer)을 형성하여 격자를 집중시켰다. 본 연구에서 사용한 격자의 접점(node) 수는 1,139,500개이며, 요소(element)

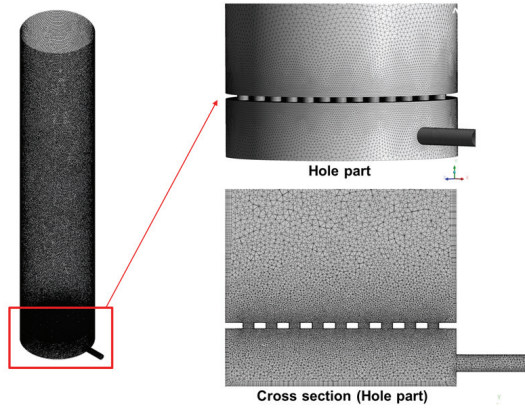


Fig. 3. Computational Grid for Flotation Tank Simulation

수는 5,045,442개이다.

본 연구에서 수행한 CFD 해석은 단상 유동(single-phase flow)을 기반으로 하였으며, 이는 마이크로버블의 체적 분율이 작고 주된 거동이 물의 유동 구조에 의해 지배된다는 점을 고려한 것이다.

## 4. 해석결과

### 4.1 다공판 설계

설계된 폐수 내 고형물 부상 장치에서 폐수는 부상조 하부에서 공급되어 부상조를 채운다. 배관에서 공급될 때의 폐수의 주요 속도 성분( $V_x$ )과 폐수가 채워지면서 상승할 때의 주요 속도 성분( $V_z$ )은 서로 수직방향이다. 폐수가 공급될 때 빠른 속도의 유동이 부상조 벽면과 부딪힌 이후에 부상조 벽면을 따라 흐르면서 복잡한 유동 패턴을 생성한다. 이에 따라 상승하는 유동이 고르지 않고 한쪽으로 치우치게 된다. 본 연구에서는 치우치며 상승하는 유동을 고르게 만들기 위해서 부상조 하부에 다공판을 설치하였다. 다공판의 홀은 총 69개로 서로 0.02 m의 간격을 가지며 고르게 분포한다. 다공판 홀의 크기가 달라지면 다공판을 통과하여 폐수가 흐를 수 있는 개구율이 달라지면서 다공판 전후의 압력이 급격히 변한다. Fig. 4는 폐수가 공급되는 입구 높이 단면( $H = 0.02$  m)에서 속도 분포 및 압력 분포를 보여주고 있다.

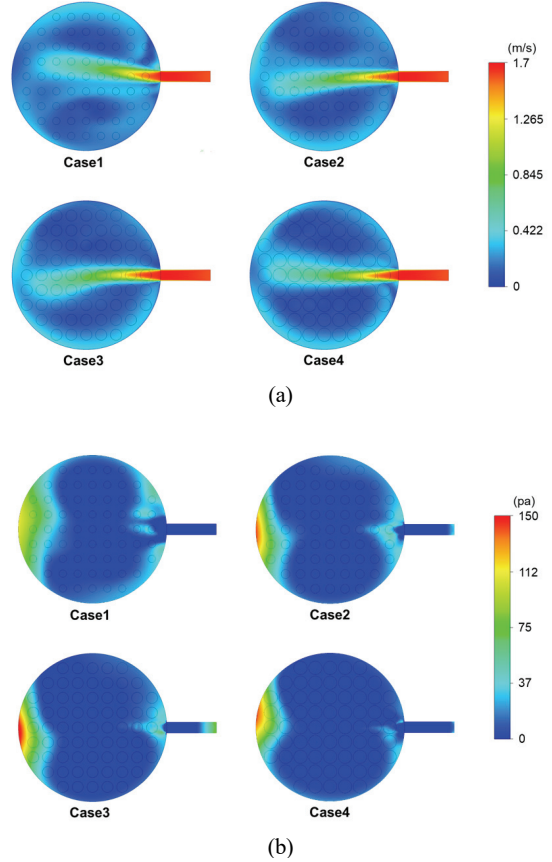


Fig. 4. Flow Contour at  $H=0.02$  m (a) velocity, (b) static pressure

Fig. 4(a)에서 보이는 것과 같이 폐수가 공급되는 입구 배관에서 가장 빠른 속도가 나타난다. 원형의 부상조에 유입된 폐수는 넓어진 공간의 영향으로 급격하게 속도가 감소한다. 속도 분포는 4개의 경우 모두 서로 유사하게 부상조의 중심에서 빠른 속도를 보이며 원형의 부상조 벽면에서도 높은 속도 분포를 보인다. 입구 배관 높이 단면에서 압력 분포는 네 가지 경우 모두 입구 반대쪽 벽면에서 유입된 폐수가 부딪히면서 가장 높은 압력이 나타난다. 부상조의 중심부 압력은 개구율이 낮을수록 압력이 높아져서 Case1이 가장 높은 압력을 보이고 Case4가 가장 낮은 압력을 보인다. 따라서 다공판이 존재하지 않으면 폐수는 입구배관 반대측 벽면을 따라 치우쳐서 상승할 것으로 예측된다.

공급된 폐수가 한쪽으로 치우쳐서 빠르게 이동하

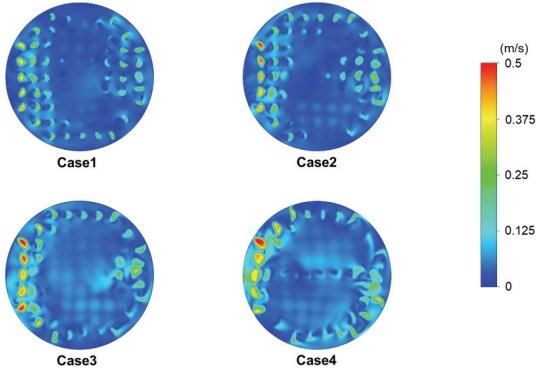
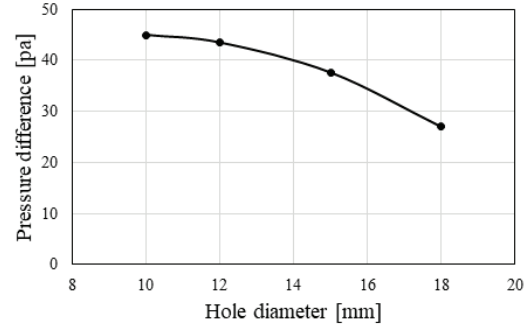


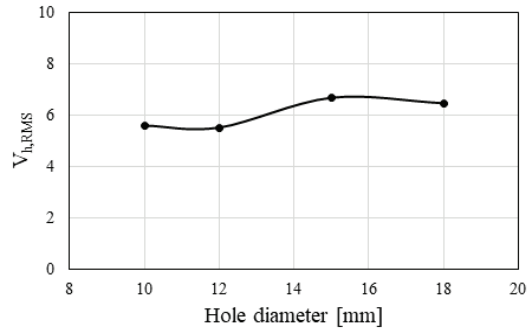
Fig. 5. Vertical velocity component contour at H=0.055 m

면 마이크로 버블도 주 유동을 따라서 공간의 일부분에 집중되어 분포하며 빠르게 상승하게 된다. 이는 고형물 입자가 부상조의 모든 공간에서 마이크로 버블과 고르게 충돌하고 협착하는 것을 어렵게 만든다. 이때 다공판은 치우친 폐수입자가 고르게 상승할 수 있게 도와주며, 다공판 홀의 크기에 따라 상승하는 유동의 분포가 달라진다. 다공판 홀의 크기가 너무 크면 치우친 유동이 그대로 다공판을 통과하게 되어 유동을 균일하게 만들어주는 효과를 기대할 수 없다. 반면에 다공판 홀의 크기가 너무 작으면 다공판을 통과하는 유동에 압력손실이 과도하게 증가하여 에너지 손실이 증가한다. Fig. 5는 다공판을 통과한 후의 폐수의 상승속도를 보여주고 있다. Case1에서 Case4로 갈수록 다공판 홀의 크기가 커진다. Case 3 및 Case4는 좌측에서 높은 속도의 분포가 나타난다. 이것을 폐수가 공급되어 벽면에 부딪히며 상승할 때 치우침이 발생하는 곳과 같은 위치로 다공판에 의한 유동균일화 효과가 충분하지 않음을 의미한다. Case3 및 Case4와 비교하여 Case1 및 Case2는 좌측의 속도 성분이 감소하였으며 부상조 벽면에서 높게 나타나는 속도분포도 감소한다. 따라서 Case1 및 Case2는 다공판에 의한 속도 균일화 효과가 나타나는 경우로 판단할 수 있다.

유동의 균일도는 속도의 평균제곱근(root mean square, RMS) 값으로 더 직관적으로 알 수 있다. 속도의 RMS값은 식 (1)과 같이 정의하였다.



(a)



(b)

Fig. 6. Pressure difference and vertical velocity RMS according to hole diameter when H=0.055 m

$$RMS(V) = \frac{1}{V} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}{n}} \quad (1)$$

이때, n 및 v<sub>i</sub>은 각각 해당 단면의 총 점점 수 (total number of nodes) 및 점점의 속도 데이터를 의미한다.

Fig. 6은 H=0.055 m 단면에서 홀 크기 변화에 따른 압력강하 및 속도 평균제곱근을 보여주고 있다. 압력강하는 홀의 직경이 커짐에 따라서 감소한다. Case1 및 Case2의 압력강하 차이는 크지 않으며 Case3 및 Case4로 갈수록 압력강하 변동이 커진다. Fig. 6의 (b)에서 보이는 것과 같이 홀 크기가 10 mm 및 12 mm로 비교적 작은 Case1 및 Case2에서 낮은 값이 나타나며 서로 차이가 거의 없다. 홀 크기가 15 mm로 증가하면 RMS값은 갑자기 증가한다.

Fig. 7은 다공판 홀 직경 변화에 따른 마이크로 버블 부상조 내부의 압력강하를 고려할 때 펌프 에

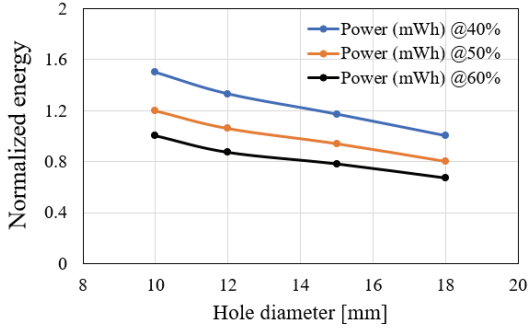


Fig. 7. Variation of normalized energy consumption according to hole diameter

너지 소비량을 비교한 것이다. Normalized Energy Consumption ( $E^*$ )은 홀 직경 10 mm 및 펌프 효율 60% 조건에서의 소비 전력을 기준 전력( $E_{ref}$ )으로 정의하고, 각 설계 조건에서의 소비 전력( $E_i$ )를 이에 대해 정규화한 무차원 지표로 정의하였다. 정의는 다음과 같다.

$$E^* = \frac{E_i}{E_{ref}} \quad (2)$$

이때 소비 전력( $E_i$ )는 유량과 압력강하, 펌프 효율을 반영한 다음 수식에 의해 계산되었다.

$$E_i = \frac{Q \cdot \Delta P}{\eta} \quad (3)$$

홀 직경이 작을수록 압력강하가 증가하여 펌프 동력이 커지며, 에너지 소비가 증가하는 경향을 보인다. 반면, 홀 직경이 증가할수록 압력강하가 감소하여 에너지 소비가 줄어드는 경향을 보이지만, 혼합 균일도 향상에는 한계가 존재한다. 이는 추가적인 균일도 개선 대비, 소비에너지 증가폭이 더 크다는 점을 의미한다. 다공판 홀 직경에 따른 유동 균일도와 에너지 소모 특성을 종합적으로 비교한 결과,  $V_{rms}$ 가 낮아 유동 균일도 측면에서 10 mm와 12 mm 조건이 상대적으로 적합한 것으로 판단되었다. 특히 두 조건은 균일도 측면에서 유사한 성능을 보였으나, 12 mm 홀 직경의 경우 압력강하량과 이에 따른 에너지

소모가 더 작게 나타났다. 따라서 혼합 성능을 유지하면서 에너지 효율을 고려할 경우, 12 mm 홀 직경이 가장 적합한 설계 파라미터로 도출되었다.

## 4.2 부상조의 높이

부상조의 적절한 높이를 도출하기 위하여 높이별 RMS 값을 계산하였다. Fig. 8은 다공판 홀의 직경이 12 mm 일 때 높이별 상승속도 분포를 보여주고 있다. 다공판과 가장 가까운  $H=0.1$  m 단면에서 가장 빠른 속도가 관찰되며, 속도 분포도 가장 균일하지 않은 것으로 나타났다. 단면의 높이가 증가함에 따라 속도는 점차 줄어들게 되며 속도분포의 차이도 감소한다.

Fig. 9는 다공판의 홀 직경이 12 mm 일 때 높이별 RMS 값을 보여주고 있다. 높이가 증가함에 따라 RMS 값은 빠르게 감소한다. 높이가 0.4 m 일 때 RMS 값은 2 이하로 나타난다. 높이가 0.5 m로 증가하면 RMS는 1 이하가 되며 단면에서 분포는 거의

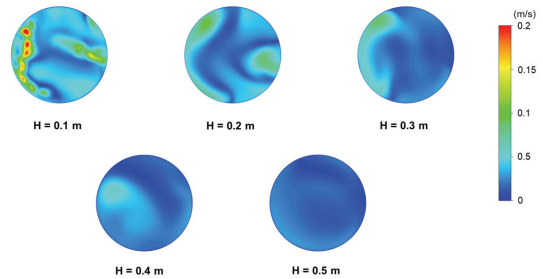


Fig. 8. Vertical velocity component contour according to height when  $D_H = 12$  mm

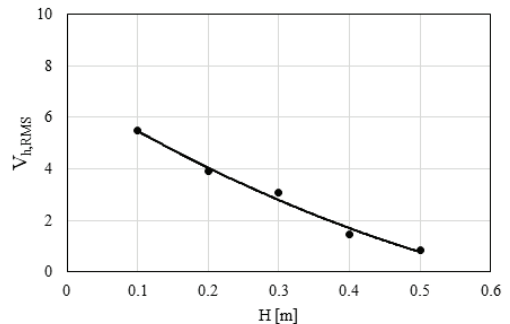


Fig. 9.  $V_{h,RMS}$  according to height  $D_H = 12$  mm

균일하게 된다. 따라서 직경이 0.2 m이고 폐수 공급 유량이 1 m<sup>3</sup>/hour인 부상조의 높이는 0.5 m 이상이 되면 상부에서 거의 균일할 분포의 유동이 형성되는 것으로 판단된다.

## 5. 결론

부유물질을 효과적으로 흡착하여 부상시키기 위해서는 적절한 부상조의 설계가 중요하며, 특히 부상조 내에서 균일한 유동을 갖는 부상조의 구조가 중요하다. 본 연구에서는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 해석을 사용하여 폐수 시료 샘플링을 위한 버블 부상조를 설계하였으며, 압력강하 및 속도 RMS 값을 고려할 때 12 mm의 홀 직경이 가장 적절한 것으로 판단된다. 또한 부상조 높이 별 속도 RMS 값을 고려하였을 때 0.5 m 이상의 부상조 높이가 필요한 것으로 나타났다.

본 연구는 실제 마이크로버블의 개별 거동이나 자유수면에서 형성되는 버블층 두께, 부상되는 부유물질의 절대량을 직접적으로 예측하는 데에는 한계가 있다. 그러나 본 연구는 복잡한 다상 CFD 해석을 수행하기에 앞서, 부상조의 형상과 유입 구조 등 주요 설계 변수를 사전에 선별하기 위한 저비용 설계 단계 연구로서 의미를 가진다. 이를 통해 향후 마이크로버블 수량, 하수 및 버블수 유속, 입자 농도와 같은 세부 구동 조건을 포함한 고해상도 해석의 효율적인 수행에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2021-NR055701).

## References

1. F. Wu, A. Xiao, J. Zhang, K. Moniz, N. Endo, F. Armas, R. Bonneau, M. A. Brown, M. Bushman, P. R. Chai, C. Duvallet, T. B. Erickson, K. Foppe, N. Ghaeli, X. Gu, W. P.

Hanage, K. H. Huang, W. L. Lee, M. Matus, K. A. McElroy, J. Nagler, S. F. Rhode, M. Santillana, J. A. Tucker, S. Wuertz, S. Zhao, J. Thompson, and E. J. Alm, "SARS-CoV-2 titers in wastewater foreshadow dynamics and clinical presentation of new COVID-19 cases", medRxiv, 2020, doi: <https://doi.org/10.1101/2020.06.15.20117747>.

2. D. Singh and S. V. Yi, "On the origin and evolution of SARS-CoV-2", *Experimental & Molecular Medicine*, Vol. 53, No. 4, 2021, pp. 537-547, doi: <https://doi.org/10.1038/s12276-021-00604-z>.
3. O. E. Hard and R. U. Halden, "Computational analysis of SARS-CoV-2/COVID-19 surveillance by wastewater-based epidemiology locally and globally: Feasibility, economy, opportunities and challenges", *Science of The Total Environment*, Vol. 730, 2021, pp. 138874, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138875>.
4. J. Peccia, A. Zulli, D. E. Brackney, N. D. Grunaugh, E. H. Kaplan, A. Casanovas-Massana, A. I. Ko, A. A. Malik, D. Wang, M. Wang, J. L. Warren, D. M. Weinberger, W. Arnold, and S. B. Omer, "Measurement of SARS-CoV-2 RNA in wastewater tracks community infection dynamics", *Nature Biotechnology*, Vol. 38, No. 10, 2020, pp. 1164-1167, doi: <https://doi.org/10.1038/s41587-020-0684-z>.
5. J. Daigle, K. Racher, J. Hazenberg, A. Yeoman, H. Hannah, D. Duong, U. Mohammed, D. Spreitzer, B. S. J. Gregorichuk, B. M. Head, A. F. A. Meyers, P. A. Sandstrom, A. Nichani, J. I. Brooks, M. R. Mulvey, C. S. Mangat, and M. G. Becker, "A sensitive and rapid wastewater test for SARS-CoV-2 and its use for the early detection of a cluster of cases in a remote community", *Applied And Environmental Microbiology*, Vol. 88, No. 5, 2022, pp. e0174021, doi: <https://doi.org/10.1128/aem.01740-21>.
6. Y. Qiu, J. Yu, K. Pabbaraju, B. E. Lee, T. Gao, N. J. Ashbolt, S. E. Hruday, M. Diggle, G. Tipples, R. Maal-Bared, and X. Pang, "Validating and optimizing the method for molecular detection and quantification of SARS-CoV-2 in wastewater", *Science of The Total Environment*, Vol. 812, 2022, pp. 151434, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151434>.
7. D. Polo, M. Quintela-Baluja, A. Corbishley, D. L. Jones, A. C. Singer, D. W. Graham, and J. L. Romalde, "Making waves: wastewater-based epidemiology for COVID-19 - approaches and challenges for surveillance and prediction", *Water Research*, Vol. 186, 2020, pp. 116404, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116404>.
8. J. R. Thompson, Y. V. Nancharaiha, X. Gu, W. L. Lee, V. B. Rajal, M. B. Haines, R. Girones, L. C. Ng, E. J. Alm, and S. Wuertz, "Making waves: wastewater surveillance of SARS-CoV-2 for population-based health management", *Water Research*, Vol. 184, 2020, pp. 116181, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116181>.

9. G. Medema, L. Heijnen, G. Elsinga, R. Italiaander, and A. Brouwer, "Presence of SARS-coronavirus-2 RNA in sewage and correlation with reported COVID-19 prevalence in the early stage of the epidemic in the Netherlands", *Environmental Science & Technology Letters*, Vol. 7, No. 7, 2020, pp. 511-516, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.0c00357>.
10. W. Randazzo, P. Truchado, E. Cuevas-Ferrando, P. Simón, A. Allende, and G. Sánchez, "SARS-CoV-2 RNA in wastewater anticipated COVID-19 occurrence in a low prevalence area", *Water Research*, Vol. 181, 2020, pp. 115942, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115942>.
11. F. Wu, A. Xiao, J. Zhang, K. Moniz, N. Endo, F. Armas, M. Bushman, P. R. Chai, C. Duvallet, T. B. Erickson, K. Foppe, N. Ghaeli, X. Gu, W. P. Hanage, K. H. Huang, W. L. Lee, M. Matus, K. A. McElroy, S. F. Rhode, S. Wuertz, J. Thompson, and E. J. Alm, "Wastewater Surveillance of SARS-CoV across 40 U.S. States", medRxiv, 2021, pp. 117400, doi: <https://doi.org/10.1101/2021.03.10.21253235>.
12. K. G. Barnes, J. I. Levy, J. Gauld, J. Rigby, O. Kanjerwa, C. B. Uzzell, C. Chilupsya, C. Anscombe, C. Tomkins-Tinch, O. Mbeti, E. Cairns, H. Thole, S. McSweeney, M. G. Chibwana, P. M. Ashton, K. C. Jere, J. S. Meschke, P. Diggle, J. Cornick, B. Chilima, K. Jambo, K. G. Andersen, G. Kawalazira, S. Paterson, T. S. Nyirenda, and N. Feasey, "Utilizing river and wastewater as a SARS-CoV-2 surveillance tool in settings with limited formal sewage systems", *Nature Communications*, 2023, Vol. 14, pp. 7883, doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43047-y>.