유동성 생물막 담체를 이용한 수처리 반응조 내 수리거동 고찰에 관한 연구 (II) - CFD 모사를 통한 검증 -

A Study on the Hydraulic Behavior in Moving Bed Biofilm Reactor for Water Treatment (II) - Verification through CFD simulation -

김미나¹ · 윤석민² · 김종오² · 정진욱³ · 박노석^{2,*}

Mi-na Kim¹ · Sukmin Yoon² · Jong-Oh Kim² · Jin-Wook Chung³ · No-Suk Park^{2,*}

¹한국시설안전공단 · ²경상대학교 건축도시토목공학부 및 공학연구원 · ³삼성 엔지니어링

¹Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation

²Division of Architecture, Urban and Civil Engineering and Engineering Research Institute, Gyeongsang National University

³Samsung Engineering Technology Center

(Received January 22, 2019; Revised February 22, 2019; Accepted March 2, 2019)

Abstract : In this study, tracer tests were carried out for pilot MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) and CFD simulation on transient state was performed for the most economically operating condition, which had been derived from actual tracer tests. As a result, the streamline of the water in the reactor showed a similar flow velocity distribution of about 0.5 m/s except for the outlet of the inside circulator. In addition, the streamline of air had flow velocities of less than 0.8 m/s similar to that of water flow. It can be seen that the hydraulic behavior of the pilot MBBR showed a typical ideal CSTR reactor characteristics. When comparing the results of the tracer test and the CFD simulation performed on the pilot plant, it is found that the absolute values of the hydraulic behavior index from actual tracer tests were almost identical to those of CFD simulated values. From the viewpoint of the decimal places and the magnitude of order, The error rate is about 30% or less.

Key Words : MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor), Tracer test, CFD (Computational Fluid Dynamics) simulation, CSTR (Complete Stirrer Tank Reactor), Hydraulic Efficiency Index

요약 : 본 연구에서는 파일럿 규모의 생물막 담체를 이용한 수처리 목적의 MBBR을 대상으로 추적자 실험을 수행하고 이 결과로부터 도출한 수리 지표를 분석하여 가장 경제적으로 운영이 가능한 운전 조건을 대상으로 선행된 추적자 실험을 transient 상태 CFD로 모사하였다. 그 결과 반응조 내 물의 streamline을 관찰해보면 circulator 유출부를 제외하고는 거의 0.5 m/s 정도의 비슷한 유속 분포를 나타내는 것을 알 수 있었다. 또한 공기의 streamline에서도 물 유속과 비슷한 0.8 m/s 이하의 서로 비슷한 유속 분포를 보이고 있었다. 파일럿 플랜트를 대상으로 수행된 추적자 실험과 CFD 모사 결과 비교 시 각 수리 거동 지표의 절대값이 실험치와 모사치가 거의 일치하는 것을 알 수 있었으나 소수점 자리수 및 magnitude of order의 관점에서 오차를 계산 시에 모든 지표가 약 30% 이하의 오차를 보이는 것으로 나타났다. 특히 T_p 및 평균 체류시간을 고려해볼 때 본 파일럿 규모의 MBBR은 이상적 CSTR에 가까운 반응조임을 알 수 있다.

주제어 : MBBR, 추적자 실험, CFD 모사, CSTR, 수리거동지표

1. 서론

본 연구의 대상인 유동성 담체를 이용한 MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor)은 공기 포기(air diffuser) 및 내부 교반 장치를 이용하여 담체와 처리수와의 접촉 기회를 제고하고, 사류를 저장하는 완전혼화(CSTR) 반응조를 구현하여야 한다. 선행된 추적자 실험에서 생물막 담체를 포함하는 유동 반응조 MBBR의 경우(Fig. 1 참조) 주입 공기의 양과 내부 교반기의 가동 대수가 증가할수록 또는 내부 교반기의 최적 위치의 선정 등은 이상적인 완전혼화 흐름조건을 구현하는 데 도움이 된다. 그러나 담체의 충전율이나 선별적인 공기 주입 위치 등은 경제적으로 최적 수리조건을 도출하는데 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 조사되었다.

1990년 초부터 이제까지 MBBR에 대한 연구는 연구실

규모의 실험을 통해 수처리 효율을 실질적인 측면에서 접근하는 연구에 초점이 맞추어져 있거나,¹⁻³⁾ MBBR의 적용 분야 및 처리원수의 다양성을 확장하는 연구가 대부분이었다.⁴⁻⁶⁾ 2006년에 들어서는 담체의 형상을 다양화하면서 작은 소재로 많은 양의 생물막을 성장시키는 연구와 그와 관련된 특허 및 회사의 연구 결과가 발표되기도 하였는데 그 수는 극히 드물었다.⁷⁾ 또한 몇몇 연구자들은 개발된 MBBR의 원형에 막 모듈이나 화학 침전 공정을 결합시킨 시스템의 성능을 시험하는 연구도 있었다.^{3,8)}

Chen 등은 매립지 침출수를 호기 및 혐기조건의 MBBR을 통해 COD와 암모니아를 동시에 제거하는 연구를 수행하면서 반응조의 개념을 완전혼화 흐름의 구현이라고 강조하였다.⁵⁾ 1990년대 초반부터 정수 및 하·폐수 처리에 적용되어온 MBBR의 설계 및 운전 개념은 반응조 내부의 흐름

* Corresponding author E-mail: nspark@gnu.ac.kr Tel: 055-772-1798 Fax: 055-772-1799

Fig. 1. Pilot MBBR used in the research.

거동이 완전혼화 흐름을 근간으로 하는 것이다. 그러나 실제 존재하는 담체 교반 반응조는 비이상적(non-ideal)인 특성을 가지기 때문에 분산(dispersion)의 정도에 따라서 압출형 흐름(plug flow)과 완전혼화 흐름이 공존하게 된다.⁹⁾ 일반적으로 단위공정 반응조의 흐름 특성을 분석할 때 추적자 실험 결과를 바탕으로 도출한 Morrill index, Modal index 및 단락류(Short circuit) index와 Rebhun & Argaman 법을 이용한 압출형 흐름 분율을 이용하였다. 그러나 이러한 실험에 의존하는 분석 방법의 경우 반응조 내 유효 체적(effective volume)에서 제외되는 사류 및 단락류의 발생 위치 및 영역의 범위를 보다 자세히 제공하지 못한다.

최근 수처리 분야에서 반응조 내의 수리 거동을 심도 있게 조사하기 위해 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 기법을 활용하는 연구가 다수 보고되고 있다. Sahu는 CFD 모사기법을 이용하여 작은 에너지로 임펠러와 반응조 형상을 최적화시켜 목적하는 교반효율에 도달하는 방법론을 제시하였다.¹⁰⁾ Kasat 등은 격벽이 있는 기계식 교반 반응조를 대상으로 solid-liquid 혼화에 있어서 사류 저감 방안을 상용 CFD 코드인 FLUENT 6.2를 통해서 도출하는 연구를 수행하였다.¹¹⁾ 그러나 이러한 완전혼화 반응조의 CFD 모사는 검증이 제외된 방법론에 초점을 맞춘 연구로 각각의 모사 결과와 실험결과를 직접적으로 비교한 부분이 미비하다.

이에 본 연구에서는 파일럿 규모의 생물막 담체를 이용한 수처리 목적의 MBBR을 대상으로 추적자 실험을 수행하고 이 결과로부터 도출한 수리 지표를 분석하여 가장 경제적으로 운영이 가능한 운전 조건을 대상으로 선행된 추적자 실험을 transient 상태 CFD로 모사하였다. 또한 CFD 모사 결과로부터 도출된 수리 지표는 실험값과 비교하여 검증을 수행하고 이상적 완전혼화 흐름 조건과의 차이를

원인 규명하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1. 추적자 실험 조건 및 방법

Fig. 2는 본 연구에서 추적자 실험 대상으로 경기도 O_하수처리장에 설치한 파일럿 규모의 MBBR 반응조의 형상을 간략화 하여 도시한 것이다. 반응조의 크기는 넓이 2 m, 길이 4 m 및 깊이 2.5 m로 제작되었다. 유효 수심까지의 깊이는 2 m이었으며, 유입구와 유출구에는 담체의 유출을 방지하기 위해 저항이 무시되는 다공망(perforated net)을 설치하였다. 유입 유량은 128 m³/day이며, 이론적 체류시간은 176분으로 설계 제작하였다.

대상 MBBR 반응조를 호기성 조건으로 유지하기 위해서 하부에 Fig. 3과 같이 산기관을 설치하였다. Disk type의 산기관은 배관 공사로 인해 바닥에서 약 30 cm 정도 상부에 설치하였다. 담체는 직경이 1.5 cm, 높이는 0.8 cm이며, 벽면 두께는 0.5 mm이다. 담체는 반응조 총 용적대비 부피비로 60%로 충전시켰다. 8개의 산기관 파이프라인 중 유입구에서 가까운 순서대로 1, 3, 5, 7번째 파이프라인만 개방하고 나머지 파이프라인은 닫았다. disk type 산기관 16만을 통해서 공기를 주입하는데, 총 공기 주입량도 0.4 m³/min로 유지하였으며 내부 교반기(circulator)는 2대 모두 경사지계(수평축과 40°로) 설치하여 운

전하였다(평면, 측면). 전단 내부교반기는 바닥에, 유출구쪽 교반기는 바닥에서 1 m되는 높이에 설치하여 운전하였다. Fig. 2 (a)에서 표시한 내부교반기는 동일하게 30 Hz로 운전하는 경우 약 3 m³/min의 물을 흡입하여 배출구로 배출하게 된다.

(a) The geometry of MBBR

(b) The biofilm carrier

Fig. 2. The geometry of MBBR and biofilm carrier used for tracer tests.

본 연구의 추적자 실험에서는 분석 및 안정성의 이유로 불소를 추적자로 이용하여 실험을 수행하였으며, MBBR 반응조 내에서 반응이나 축적되지 않도록 물과 밀도가 거의 비슷한 불화규산(H_2SiF_6 , 23~25%)을 사용하였다.

대상 MBBR 반응조의 경우 0.2 L의 정량을 pulse dose 방법으로 유입구에 투입한 후, 일정한 시간(약 5초 이내) 간격으로 반응조 유출부에서 연속적으로 시료를 채취하여 불소 농도를 측정하였다. 불소농도는 불소이온 전극(Fluoride ISE)를 사용하였다. 본 연구에서 불소 농도의 실시간 측정을 위해 사용한 장비는 Fluotrac-12(회사명, E2 Science)이며, 총 추적자 실험시간은 약 12시간(수리학적 체류시간의 3~4배)로 선정하였다.

2.2. CFD 모사 방법

2.2.1. 다상유동 모델링

다상유동은 상의 궤적에 대해 체적 분율과 입자 적용 방식에 따라 Eulerian 모델과 Lagrangian model로 접근가능하다. 본 연구에서는 물과 공기의 다상유동해석을 위하여 Eulerian 모델을 사용하였으며, 상에 대한 연속방정식과 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_\alpha r_\alpha U_\alpha) + \nabla \cdot (\rho_\alpha r_\alpha U_\alpha) = \sum_{\beta=1}^{N_p} \Gamma_{\alpha\beta} \quad (\text{연속방정식})$$

여기서, α , β 는 물과 공기의 상이며, ρ_α , r_α 는 상 α 에 대한 밀도, 체적분율, $\Gamma_{\alpha\beta}$ 는 상 α 에 대한 β 의 단위 체적당 질량 유량을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_\alpha r_\alpha U_\alpha) + \nabla \cdot (r_\alpha \rho_\alpha U_\alpha \otimes U_\alpha) \\ = -r_\alpha \nabla p_\alpha + \nabla \cdot (r_\alpha \mu_\alpha (\nabla U_\alpha + [U_\alpha]^T)) \end{aligned} \quad (\text{운동량방정식})$$

$$+ \sum_{\beta=1}^{N_p} (\Gamma_{\alpha\beta} U_\beta - \Gamma_{\beta\alpha} U_\alpha) + \sum_{\beta=1}^{N_p} M_{\alpha\beta}$$

여기서, $(\Gamma_{\alpha\beta} U_\beta - \Gamma_{\beta\alpha} U_\alpha)$ 항은 내부 상의 질량 전달에 의해 발생하는 운동량 전달을 나타내며, $M_{\alpha\beta}$ 는 상 β 로 인한 상 α 에 작용하는 표면장력을 나타낸다.

2.2.2. 격자(meshing)

파일럿 규모의 MBBR 반응조를 대상으로 각각의 시스템

Fig. 3. Meshing work.

구성요소 형상을 다음 Fig. 3과 같이 격자로 분할하였다. 전체 반응조 노드(nodes)수를 약 3,874,000개, 요소(element)수는 약 17,446,000개로 구성하였으며, 또한 격자의 형상은 그림에 나타난바와 같이 ‘Tetragonal’과 ‘Hexagonal’ 격자로 혼합되어 있는 ‘Hybrid’ 격자 형태로 주었으며, 유동 현상의 변화가 심한 영역에서는 더욱 세밀한 격자를 생성으로 만들어 삽입하는 기법을 이용하였다.¹²⁾

2.2.3. 경계조건(boundary conditions)

다음 Fig. 4는 본 연구의 모사 대상인 MBBR 반응조에 부여한 경계조건을 정리한 것이다. 그림에서 도시한 바와 같이 상부의 자유 수면을 제외한 반응조의 벽면은 ‘no-slip condition’을 적용하였다. 벽면 no-slip condition에서는 벽면으로부터 연직방향으로의 거리가 0인 유체의 유동 속도를 ‘zero’로 가정한다는 의미이다. 상부 자유 수면은 ‘degassing boundary’를 적용함으로써 유입된 공기가 대기 중으로 발산하는 현상을 가정하였다. 실제 반응조의 수온은 20℃로 가정하였다. 모사 대상 반응조의 설계 유량을 128 m³/day로 가정하였으며, 또한 난류 모델로 표준 k-ε 모델을 적용하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 추적자 실험 결과

상기 언급한 조건 대로 추적자 실험을 수행한 결과 다음

Fig. 4. Boundary conditions.

과 같은 농도 곡선을 얻었다(Fig. 5 참조). 기 수행된 추적자 실험의 관련 논문에서 기술한 바와 같이 추적자 최대 농도가 나타나는 시간은 22분이었으며, T_{10} 은 26분, 평균 체류시간은 156분으로 나타났다. 이와 같은 수리 거동 지표값은 공기 주입량을 설계 공기 주입량의 200%를 주입한 조건의 추적자 실험 결과보다 이상적인 CSTR 반응조의 특성을 보이고 있다. 공기 주입에 의한 동력비와 내부 교반기의 가동에 의해서 발생하는 추가 비용의 비교 및 본 실험 조건에서의 공기 주입량에 의한 미생물의 활성도를 고려한 결과, 수리적으로 가장 좋은 효율을 내는 조건을 CFD 모사 결과의 대상 조건으로 선정하였다.

Fig. 5. The result of tracer test.

Fig. 6. Water and air streamline.

3.2. CFD 모사 결과

3.2.1. 유선(streamline)

다음 Fig. 6는 MBBR 반응조 내에 공기가 주입되는 경우 물과 공기 분자의 움직임을 유선(streamline)으로 나타내었다. 물의 유선을 관찰해보면 내부 교반기 유출부를 제외하고는 거의 0.5 m/s 정도의 비슷한 유속 분포를 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 공기의 유선에서도 물 유속과 비슷한 0.8 m/s 이하의 서로 비슷한 유속 분포를 보이고 있다. 유선의 상황만을 고려한다면 이상적 CSTR 반응조의 거동이 나타났다.

다음 Fig. 7은 유선 다발과 contour로 물과 공기의 거동을 표시한 것이다. 유입구와 유출구로의 단락류(Short circuit flow)와 내부 교반기의 운전으로 공기의 흐름이 상부에서 유출구 쪽으로 편향되는 현상이 나타난다. 산기 장치에서 반응조로 수직으로 주입된 공기는 상향을 유지하지만 중간 깊이까지 상승한 공기의 흐름이 유출구벽 쪽에 설치된 하향 교반 내부기의 영향으로 상류 쪽으로 편향되었다가 다시 수표면 상부에서는 다시 유출구 쪽으로 편향된다.

Fig. 7. Overall hydraulic behavior (stream tube and contour).

Fig. 8. Local measurement plane.

3.2.2. 반응조 내의 물의 유동

자세한 CFD 모사 결과를 도시하기 위해 Fig. 8과 같이 수직으로 7개의 단면을 수평으로 9개의 단면을 캡처(capture)하여 물의 유동 정보를 벡터(vector)와 contour로 표시하였다.

Fig. 9는 Fig. 8에 나타낸 총 16개 단면에서 캡처한 반응조

Fig. 9. Velocity vector and contour on each plane.

내의 물의 유동을 도시한 것이다. 결과를 살펴보면 내부 교반기가 위치한 P04를 중심으로 P03 및 P05에서는 유속이 빠른 구역이 나타나지만 이러한 유동이 양 측벽으로 옮겨가면서 에너지의 소산이 발생하여 지점별 유속의 차가 줄어드는 것을 보이고 있다. 일반적으로 직육면체 반응조의 경우 바닥이나 측벽과의 마찰에 의한 에너지의 소산이 가장 크게 나타난다. P04의 단면에 있어서 2개의 내부 교반기가 배출하는 흐름 사이에 낮은 유속이 나타나는 영역대가 관찰되는데 이는 측면에서 볼 때 시계방향으로 와류가 형성되는 사류가 나타나고 있다. 이 사류 영역은 측벽으로 진행되면서 그 크기가 작아지며 이러한 사류가 담체의 유동에 방해가 되지 않을 것으로 예측된다.

수평으로 9개의 단면별 물의 유동을 관측할 때에는 내부 교반기의 배출구가 위치한 P03과 P04에서 국지적으로 빠른 유속 영역이 나타나는데 이는 내부 교반기로 흡입된 물이 다시 배출되면서 나타나는 현상이다. P02 단면에서 공기가 유입되지만 유입된 공기가 상대적으로 물의 유동에 내부 교반기만큼 직접적인 영향을 미치지 않는 것으로 관측되었다.

3.2.3. 반응조 내의 공기의 유동

Fig. 10은 공기의 유동을 시간대 별로 나타낸 결과이다. 산기관을 통해서 주입된 공기가 내부 교반기에 의해서 유입구 측으로 편향되었다가 다시 유입구로 유입되는 물이 직접적으로 유출구를 찾아가면서 발생하는 단락류에 의해 유출구 측으로 편향되는 현상을 보이고 있다. 이러한 현상은 이상적인 CSTR 반응조를 구현하는데 큰 장애가 되지 못하며, 지속적으로 주입되는 공기는 반응조 내 미생물의 활성을 도와서 수질을 정화하는데 도움을 줄 것으로 사료된다.

3.2.4. 반응조 내의 국부 유동장

일반적으로 수처리를 위한 직육면체 반응조의 경우 사류 영역을 정의할 때 조 내의 유속의 10%이하가 되는 영역으로 정의한다.¹³⁾ 이에 본 연구에서는 상기 운전조건을 대상으로 CFD 모사를 수행한 결과 반응조 내 평균 유속이 0.2652 m/s로 도출되었다. 이에 Fig. 11은 조 내 평균 유속의 10%가 되는 지역(0.02652 m/s 이하), 20%가 되는 지역(0.05304 m/s 이하), 30%가 되는 지역(0.07956 m/s 이하) 및 40% (0.1326 m/s) 되는 지역을 도시하였다. 일반적으로 정

Fig. 10. Air behavior in MBBR.

Fig. 11. Local velocity distribution.

의하는 사류 영역(조 내 평균 유속의 10% 이하가 되는 영역)이 거의 관측되지 않으며, 흐름 방향의 우측하단 구석에서 사류가 미비하지만 관측되는 것으로 나타났다.

평균 유속의 20% 이하 영역은 측면에서 유입구 부근(상류 측 내부 교반기 상부), 두 내부 교반기의 사이, 하류 측 내부 교반기의 하단 구석에서 나타나고 있다. 일반적으로 평

Fig. 12. C-curve from CFD simulation.

Fig. 13. F-curve from CFD simulation.

균 유속의 10% 이하가 되는 영역을 사류 지역으로 정의하지만, 상대적으로 유속이 낮은 영역에서 나타나고 있다. 이러한 현상은 평균 유속의 30% 이하가 되는 영역에서 조금 더 명확하게 관측되어진다.

3.2.5. 추적자 실험 모의

다음 Fig. 12와 13은 실제 추적자 실험을 대상으로 CFD 기법을 통해 transient 상태로 모사한 결과로부터 도출한 C-curve와 F-curve를 도시한 것이다. 추적자로는 불화규소 5 mg/L를 가정하였으며, 주입한 추적자 해당 양을 pulse input 방식으로 투입한 후 일정 간격(본 모사에서는 1분 간격)으로 유출부에서 관측하는 상황을 모의하였다.

Fig. 12와 13에서 나타난 바와 같이 유입부에 주입한 추적자를 유출부측에서 시간대별 농도로 측정한 결과(C-curve)를 일반적으로 범용성을 확장하기 위해 C-curve와 F-curve를 정규화하여 무차원으로 나타낸다. 상기 추적자 실험을 모의한 결과로부터 수리 거동 지표를 도출하여 앞서 선행한 추적자 실험과의 비교를 위해 다음 Table 1과 같이 정리하였다. 실제 추적자 실험을 수행하였을 때에는 피크를 나타내는 지점이 하나만 나타났는데, 모사의 경우 지역적으로 두 개의 피크 지점이 나타났다. 이러한 오차는 담체의 충전 정도, 벽면의 거칠기, 공기 유량의 균등 분배 정도, 유입 및 유출부의 수리구조의 차이, 내부 교반기의 단순화 등으로 인해 발생할 수 있다.^{14,15)}

Table 1에서 나타난 바와 같이 각 수리 거동 지표의 절대

Table 1. Comparison between actual tracer test and CFD simulation

Condition and Hydraulic Index	Tracer test	CFD simulation	Error percentage (%)
Air injection (%)	40	39.4	
Open diffuser line No.	1,3,5,7	1,3,5,7	
Operating Circulator No.	2 (40° inclined)	2 (40° inclined)	
Carrier filling rate (%)	60	-	
T_p (min)	22	24.5	
HRT (T) (min)	156	136	12.8
T_p/T	0.141	0.179	21.2
N_{CSTR}	1.3	1.8	27.8
Morrill Ind.	13.38	11.20	16.2
T_{10}	26	29.2	10.9
Modal Ind.	0.12	0.09	25.0
Plug Flow fraction	0.06	0.11	36.3
Mixed Flow fraction	0.94	0.89	4.2
Short Circuit Index	0.1	0.21	110.0

값이 실측치와 모사치가 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 그러나 소수점 자리수 및 magnitude of order의 관점에서 오차를 계산 시에 모든 지표가 약 30% 이하의 오차율을 보이는 것으로 나타났다. 특히 T_p 및 평균 체류시간을 고려해볼 때 본 파일럿 규모의 MBBR은 이상적 CSTR에 가까운 반응조임을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 파일럿 규모의 생물막 담체를 이용한 수처리 목적의 MBBR을 대상으로 추적자 실험을 수행하고 이 결과로부터 도출한 수리 지표를 분석하여 가장 경제적으로 운영이 가능한 운전 조건을 대상으로 선행된 추적자 실험을 transient 상태 CFD로 모사하였다. 또한 CFD 모사 결과로부터 도출된 수리 지표는 실험값과 비교하여 검증을 수행하고 이상적 완전혼화 흐름 조건과의 차이를 원인 규명하고자 하였다. 이에 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) CFD 기법을 이용하여 파일럿 규모의 MBBR 반응조를 대상으로 추적자 실험을 모의한 결과 반응조 내 물의 streamline을 관찰해보면 circulator 유출부를 제외하고는 거의 0.5 m/s 정도의 비슷한 유속 분포를 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 공기의 streamline에서도 물 유속과 비슷한 0.8 m/s 이하의 서로 비슷한 유속 분포를 보이고 있다. 전형적인 이상적 CSTR 반응조의 거동이 나타나는 것을 알 수 있다.

2) 또한 산기관을 통해서 주입된 공기가 내부 교반기에 의해서 유입구 측으로 편향되었다가 다시 유입구로 유입되는 물이 직접적으로 유출구를 찾아가면서 발생하는 단락류에 의해 유출구 측으로 편향되는 현상을 보이고 있다. 이러한 현상은 이상적인 CSTR 반응조를 구현하는데 큰 장애가 되지 못하며, 지속적으로 주입되는 공기는 반응조 내 미생물의 활성을 도와서 수질을 정화하는 데 도움을 줄 것으로

기대하고 있다.

3) 일반적으로 정의하는 사류 영역(조내 평균 유속의 10% 이하가 되는 영역)이 거의 관측되지 않으며, 흐름 방향의 우측하단 구석에서 사류가 미비하지만 관측되는 것으로 나타났다. 평균 유속의 20% 이하 영역은 측면에서 유입구 부근(상류 측 circulator 상부), 두 circulator의 사이, 하류 측 내부 교반기의 하단 구석에서 나타나고 있다. 통상적으로 평균 유속의 10% 이하가 되는 영역을 사류 지역으로 정의하지만, 상대적으로 유속이 낮은 영역에서 나타나고 있다. 이러한 현상은 평균 유속의 30% 이하가 되는 영역에서 조금 더 명확하게 관측되어 진다.

4) 파일럿 플랜트를 대상으로 수행된 추적자 실험과 CFD 모사 결과 비교 시 각 수리 거동 지표의 절대값이 실측치와 모사치가 거의 일치하는 것을 알 수 있었으나 소수점 자리수 및 magnitude of order의 관점에서 오차를 계산 시에 모든 지표가 약 30% 이하의 오차율을 보이는 것으로 나타났다. 특히 T_p 및 평균 체류시간을 고려해볼 때 본 파일럿 규모의 MBBR은 이상적 CSTR에 가까운 반응조임을 알 수 있다.

Acknowledgement

본 연구는 삼성 엔지니어링 ‘MBBR 반응조 CFD 모사 및 수류 TEST’ 연구과제의 지원으로 수행된 것입니다.

KSEE

References

1. Lars, J. H., Bjørn, R. and Hallvard, Ø., “Nitrification in a moving bed biofilm reactor,” *Water Res.*, **28**(6), 1425~1433 (1994).
2. Ødegaard, H., Rusten, B. and Westrum, T., “A new moving bed biofilm reactor-applications and results,” *Water Sci.*

- Technol.*, **29**(10-11), 157~165(1994).
3. Lee, W., Kang, I. and Lee, C., "Factors affecting filtration characteristics in membrane coupled moving bed biofilm reactor," *Water Res.*, **40**(9), 1827~1835(2006).
4. Salvetti, R., Azzellino, A., Canziani, R. and Bonomo, L., "Effects of temperature on tertiary nitrification in moving-bed biofilm reactors," *Water Res.*, **40**(15), 2981~2993(2006).
5. Chen, S., Dezhi, S., and Chung, J., "Simultaneous removal of COD and ammonium from landfill leachate using an anaerobic - aerobic moving-bed biofilm reactor system," *Waste Manag.*, **28**(2), 339~346(2008).
6. Jähren, S. J., Rintala, J. A. and Ødegaard, H., "Aerobic moving bed biofilm reactor treating thermophilic conditions," *Water Res.*, **36**(4), 1067~1075(2002).
7. Rusten, B., Eikebrokk, B., Ulgenes, Y. and Lygren, E., "Design and operations of the Kaldnes moving bed biofilm reactors," *Aquacult. Eng.*, **34**(3), 322~331(2006).
8. Wang, X. J., Xia, S. Q., Chen, L., Zhao, J. F., Renault, N. J. and Chovelon, J. M., "Nutrients removal from municipal wastewater by chemical precipitation in a moving bed biofilm reactor," *Process Biochem.*, **41**(4), 824~828(2006).
9. Kim, Y., Park, N., Chung, N., Kim, S. and Bea, B., "Application of dispersion number for analysis of tracer test in sedimentation basin," *J. Korean Soc. Water Wastewater*, **21**(2), 187~193(2007).
10. Sahu, A. K., Kumar, P., Patwardhan, A. W. and Joshi, J. B., "CFD modelling and mixing in stirred tanks," *Chem. Eng. Sci.*, **54**(13-14), 2285~2293(1999).
11. Kasat, G. R., Khopkar, A. R., Ranade, V. V. and Pandit, A. B., "CFD simulation of liquid-phase mixing in solid-liquid stirred reactor," *Chem. Eng. Sci.*, **63**(15), 3877~3885(2008).
12. Khopkar, A. R., Kasat, G. R., Pandit, A. B. and Ranade, V. V., "CFD simulation of solid suspension in stirred slurry reactor," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **45**(12), 416~4428(2006).
13. Lee, T. J., Oh, J. I., Yoon, S., Kim, J. and Park, N., "CFD simulation of the effects of inlet flow rate on hydraulic behavior in Continuous Stirred-Tank Reactor (CSTR)," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **38**(1), 25~33, (2016)
14. Benjamin, M. M. and Lawler, D. F., *Water Quality Engineering : Physical/Chemical Treatment Processes*, 1st ed., John Wiley & Sons, New York (2013).
15. Teixeira, E. C. and Siqueira, R. N., "Performance assessment of hydraulic efficiency indexes," *J. Environ. Eng.*, **134**(10), 51~859(2008).