유동성 생물막 담체를 이용한 수처리 반응조 내 수리거동 고찰에 관한 연구 (I) - 추적자 실험을 통한 고찰 -

A Study on the Hydraulic Behavior in Moving Bed Biofilm Reactor for Water Treatment (I) - Observation through Tracer Tests -

윤상진¹ · 정진욱² · 윤석민¹ · 박노석^{1,*}

Sangjin Yoon¹ · Jin-Wook Chung² · Sukmin Yoon¹ · No-Suk Park^{1,*}

¹경상대학교 토목공학과 및 공학연구원 · ²삼성 엔지니어링(주) 기술연구소

¹Department of Civil Engineering and Engineering Research Institute, Gyeongsang National University

²Samsung Engineering Technology Center

(Received January 22, 2019; Revised February 8, 2019; Accepted February 8, 2019)

Abstract : The purpose of this study was to investigate the optimum condition of hydraulic behavior in MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) process under various operating conditions. As results of the tracer tests, it was found that the air injection amount/rate had an important influence on the hydraulic behavior in the reactor. However, the filling rate of the carrier did not affect the hydraulic flow. It is also observed that the selective operation of the air injection pipeline has little effect on the hydraulic behavior. The operation of the internal circulators reduces the short-circuit flow and the dead flow, and by inclining them, causing the up-down flow causes improve flow condition into to that of the ideal CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor).

Key Words : MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor), tracer test, short circuit flow, eddy flow, CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor)

요약 : 수처리 공정으로 각광을 받고 있는 MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor)공정을 대상으로 다양한 운전 조건에 따라 추적자 실험을 수행하여 반응조 내 최적 수리거동 조건을 도출하고자 하였다. 추적자 실험 결과 공기 주입량의 과소가 반응조 내 수리 거동에 중요한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 담체의 충전률은 수리 흐름에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한 산기관 파이프라인의 선별적인 운영은 반응조 수리 거동에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 관측되었다. 내부 교반기의 운전은 단락류와 사류를 저감시키며, 이를 경사지게 설치함으로써 상하 유동을 유발시키는 것이 이상적인 CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor)의 거동에 가까운 수리흐름 조건을 나타나게 한다.

주제어 : MBBR, 추적자 실험, 단락류, 사류, CSTR

1. 서론

본 연구의 대상인 유동성 담체를 이용한 하·폐수 처리 반응조는 1990년대 초반 북유럽에서 질산화 및 탈질화의 속도를 제고하기 위해 개발된 ‘Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)’이며, 고도처리 공법의 일환이다(Fig. 1 참조). Lars 등은 개발 초기에 MBBR 반응조에서 질산화의 속도를 제어하는 인자로 반응조 내의 암모니아 및 산소 농도를 변화시키면서 대상 폐수의 질산화 속도를 예측하였다. 또한 그들은 작은 연구실 규모의 칼럼형식의 반응조 실험을 통해 2차 처리수의 질산화에 MBBR이 가장 적합한 공정임을 역설하였다.¹⁾

MBBR 반응조의 적용분야는 2000년대에 들어서 매립장 침출수를 처리하는 데에도 확장하게 되었는데 Chen 등은 혐기 및 호기조건의 MBBR 반응조를 대상으로 침출수로부터 COD와 암모니아를 동시에 처리하는 성능을 시험한 결과, COD는 원수 대비 90% 이상 암모니아는 97% 이상의 제거율을 보임을 증명하였다.²⁾ 그들의 연구에 사용된 실험

반응조는 약 5 L 미만의 실험실 규모였으며, 충분한 교반이 가능하도록 많은 교반 장치를 통해 완전혼합흐름(CSTR, Continuous Stirred Tank Reactor) 조건에서 실험을 수행하였다. 그리고 그들은 전체 반응조의 약 40%정도로 직경이 작은(약 7 mm) 담체를 충전하여 안정화시켜 실험을 수행하였다. 앞서 Lee 등은 MBBR 반응조 내 침지형 막 모듈을 결합하여 막 모듈의 차압을 저감할 수 있는 각각의 인자들을 도출한 연구를 수행하였는데 반응조 내의 유동 및 생물막 담체의 역할로 차압이 확실히 느리게 증가하는 현상을 보여주었다.³⁾ 이들이 제시한 결합반응조의 아이디어는 MBBR에서 생성되는 슬러지의 침강성이 기존 활성 슬러지 공정에서 생성되는 슬러지보다 나쁘기 때문에 이를 막 모듈과 결합시키려는 노력을 가미한 것이다.

또한 2000년대 초반에는 MBBR의 안정적인 효율성 및 운전의 용이성으로 인해 특정 폐수의 처리 분야에도 적용되기 시작하였다. Jahren 등은 실험실 규모의 호기성 MBBR 반응조를 이용하여 55℃ 이상의 제지 폐수(pulping white water)를 대상으로 용존 COD를 90% 이상 제거하는 성능

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

(b) The carrier used in the research (Diameter: 1.5 cm, Height: 0.8 cm, thickness of the wall: 0.5 mm)

Fig. 1. Moving bed biofilm reactor diagram and the carrier.

을 검증하였다.⁴⁾ 반응조의 형식은 연속식 CSTR이었으며, 담체는 Fig. 1의 (b)와 비슷한 형상을 가진 것을 사용하였다. Salvetti 등은 조금 큰 파일럿 규모의 MBBR 반응조(H 1.25 m × L 1 m × W 0.87 m)를 대상으로 온도에 의한 생물막의 활성화 변화가 고도처리 효율에 미치는 영향을 분석하였는데 산소의 농도가 제한 인자인 순산소 주입 반응조의 설계에서는 온도를 중요한 설계인자로 고려하여야함을 역설하였다.⁵⁾ 노르웨이는 MBBR 반응조를 개발하면서 그 적용 범위를 먹는 물 생산에서 어류 양식장 용수의 재이용 등에 걸쳐 다양한 분야에 적용을 도모하였다. Rusten은 바깥 외경이 톱니처럼 요철을 가지고 있는 담체에 지식재산권을 가지고 있는 Kaldnes MBBR을 대상으로 설계와 운영의 가이드라인을 제시하였다.⁶⁾ 그러나 그들이 제안한 설계 및 운영 지침에는 원수의 특성을 고려하여 전체 부피에 대해 생물막 표면적의 비를 제안하였고, 수질의 변동을 가능한 자제하여야하며, 어류 양식장 폐수를 처리하는데 필요한 수질 전처리에 대한 실험결과를 제시하였다. 앞서 언급한 바와 같이 MBBR의 경우 생성되는 슬러지의 침강성이나빠서 침전 공정을 후처리로 두기에 무리가 있었지만 Wang 등은 화학적 침전 공정을 결합함으로써 나쁜 침강성을 보완하는 방법을 제안하기도 하였다.⁷⁾ 그러나 이들의 연구 역시 실험실 규모의 약 13 L의 반응조로 구 모양의 생물막 담체를 이용하여 실험하였다.

이와 같이 MBBR 반응조는 1990년 초반 노르웨이에서

개발되어 정수부터 하수 및 다양한 폐수 처리에 적용되어 온 컴팩트하고 운영이 쉬운 공법임을 증명하는 다수의 논문들이 게재되었다. 특히 담체가 반응조 내에서 자유롭게 유동하면서 처리 대상수와 접촉하는 형식이라 수두손실이 거의 없고 담체의 생물막 양을 제어하기 위한 추가적인 역세척 장치 및 설비가 필요 없는 큰 장점으로 부각되어 있다.⁸⁾ 그런데, 본 연구에서 언급하고 있는 대부분의 MBBR 반응조에 대한 연구가 수처리 효율을 수질적인 측면에서만 조사하고 그 우수성을 입증하는 데만 초점이 맞추어져 있으며, 대부분의 연구가 실험실 규모로 국한되어 있어 실제 엔지니어링 측면에서 수리적인 최적화가 확립되어 있는지의 심스러운 부분이 있었다. 생물막 담체를 이용하는 수처리 반응조의 경우에는 반응조 내 사류 및 단락류가 최소화되어야 하고, 담체와 처리수와의 접촉 기회를 제고할 수 있는 완벽한 CSTR 반응조로 설계되어야 한다.

이에 본 연구에서는 파일럿 규모의 생물막 담체를 이용하는 MBBR 반응조(유입유량 128 m³/day, 이론적 체류시간 176분)를 대상으로 다양한 조건 하의 추적자 실험을 수행함으로써 최적 수리거동 조건을 도출하고자하였다. 이제까지 MBBR을 다룬 논문들이 일반적으로 충분한 접촉시간을 근간으로 거의 이론적으로 완벽한 CSTR 조건에서 처리효율에 초점을 맞추고 공정의 우수성을 증명하였다면 본 연구는 반응조 내의 변형이 가능한 수리조건을 변화함으로써 실제 이론적인 CSTR의 구현이 가능한지를 고찰하고, 이러한 반

응조 내 수리 조건에 영향을 미칠 수 있는 인자(주입 공기량, 담체 충전률, 공기 주입 위치, 내부 교반기(circulator)의 사용 여부 등)를 변화시키면서 추적자 실험을 다양하게 수행하였다.

2. 연구 방법

2.1. 대상 MBBR 반응조

Fig. 2는 본 연구에서 추적자 실험 대상으로 경기도 O_하수처리장에 설치한 파일럿 규모의 MBBR 반응조의 형상을 간략화하여 도시한 것이다. 반응조의 크기는 넓이 2 m, 길이 4 m 및 깊이 2.5 m로 제작되었다. 유효 수심(자유 수면에서 바닥까지의 깊이)은 2 m였으며, 유입구와 유출구에는 담체의 유출을 방지하기 위해 저항이 무시되는 다공망(perforated net)을 설치하였다. 유입 유량은 앞서 언급한 바

와 같이 128 m³/day이며, 이론적 체류시간은 176분으로 설계 제작하였다.

2.2. 산기관 및 내부교반기(circulator)

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. 각 실험 시 각 산기 장치에서 주입되는 공기의 양은 등분포로 주입되게 밸브 조절을 하였으며, 총 주입 공기량을 개방된 산기 장치로 나누어 균등하게 주입되게 설치하였다. 내부에 설치한 내부교반기는 생물막 담체와 처리수와의 완전 혼화를 제고하고 사류를 저감할 목적으로 설치하였는데 최대 용량 60 Hz로 운전할 경우 약 6 m³/min의 물이 교반기 후방으로 유입되어 전방으로 유출되는 형식이다. 교반기는 최대 2대를 설치할 수 있으며, 위치는 이동이 가능하게 제작하였다(Fig. 3 참조).

Fig. 2. The geometry of MBBR used for tracer tests.

Fig. 3. Photo and geometry of the circulator in MBBR.

Fig. 4. MBBR and tracer tester.

2.3. 추적자 실험 방법

추적자 실험(tracer test)을 수행하기 위해서 적절한 추적자의 선정이 필요한데, 추적자는 실험하는 동안 물속에 있는 다른 물질과 반응하지 않는 비반응성 물질, 즉 보존성 물질이어야 한다. 일반적으로 추적자는 불소(fluoride, F), Rhodamine WT, 리튬(lithium, Li), 나트륨(sodium, Na), 염소(chloride, Cl) 그리고 칼슘(calcium, Ca) 등이 사용된다.⁹⁾ 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 채취하

여 불소 농도를 측정하였다. 불소농도는 불소이온 전극(Fluoride ISE)을 사용하였다. 각 실험조건을 대상으로 수행된 실험시간은 약 12시간(수리학적 체류시간의 3~4배)으로 선정하였으며, 총 16가지 조건을 대상으로 수행하였다(Fig. 4 참조). 본 연구에서 불소 농도의 실시간 측정을 위해 사용한 장비는 Fluotrac-12(회사명 E2 Science)이다.

2.4. 추적자 실험 조건

MBBR 반응조를 대상으로 수리적으로 최적 운전 조건 도출을 위하여 Table 1과 같이 16개의 운영 조건하에 추적자 실험을 수행하였다. 상기 언급한 파일럿 규모의 MBBR 반응조가 경기도 O_하수처리장에 설치된 이후 2016년 8월 16일부터 당해 10월 1일까지 지속적으로 추적자 실험을 수행하였다. Table 1의 첫 번째 열은 실험 조건(case)을 번호를 부여하여 표시한 것이고, 두 번째 열은 실험을 시작한 날짜를 “yyyymmdd”의 형식으로 나타내었다. 1회 실험이 약 12시~16시간 정도 소요됨에 따라 야간에 추적자를 주입하고 실험을 개시하는 경우 같은 일자가 기입되어 있다.

세 번째 열의 공기 주입량은 다음 Table 2와 같은 조건표를 이용하여 공기 주입량을 정량화 할 수 있다. 네 번째 열은 유입구로부터 유출구까지 설치된 8개 열, 32개 disk type 산기장치 중 open된 상태의 산기관 번호와 장치의 개수를 나타내었다. 유입구부터 유출구까지의 산기관 파이프 라인 번호는 1~8까지이며, 유입구 쪽으로부터 오른쪽순으로 번호를 부여하였다. 각 산기관 파이프파이프 라인에는

Table 1. Tracer tests cases

Case No.	Date (yyyymmdd)	Air injection (%)	Open diffuser line (No.)	Operating circulator No.	Carrier filling rate (%)
1	20160816	200	8 line all (32)	0	0
2	20160905	100	8 line all (32)	0	0
3	20160906	100	8 line all (32)	0	60
4	20160907	50	1,3,5,7 (16)	0	60
5	20160908	50	2,4,6,8 (16)	0	60
6	20160908	50	1,3,5,7 (16)	2 (front)	60
7	20160909	25	1,3,5,7 (16)	0	60
8	20160910	25	1,3,5,7 (16)	2 (front)	60
9	20160910	25	1,3,5,7 (16)	1 (front) 1 (rear)	60
10	20160911	25	1,3,5,7 (16)	1 (front)	60
11	20160911	25	1,3,5,7 (16)	1 (rear)	60
12	20160919	30	1,3,5,7 (16)	0	50
13	20160920	19	1,3,5,7 (16)	0	40
14	20160929	15	1,3,5,7 (16)	1 (front) 1 (rear) (40°)	40
15	20160930	40	1,3,5,7 (16)	0	60
16	20161001	40	1,3,5,7 (16)	1 (front) 1 (rear) (40°)	60

Table 2. Air injection conditions

Air injection (%)	19	25	30	50	100	200
Actual air injection rate (m ³ /min)	0.155	0.2	0.24	0.4	0.8	1.5

각 4개의 disk type의 산기관이 등간격으로 설치되어 있으므로 예를 들어 “1, 3, 5, 7 (16)”으로 표시된 경우는 1, 3, 5, 7번 산기관 파이프라인에 설치된 16개 disk type의 산기 장치에서만 공기가 주입되고 나머지는 공기 주입을 차단한 상태를 의미한다. “8 line all”이라고 표시한 것은 32개 disk type 산기장치 모두를 통해서 공기를 주입하는 상태를 언급하는 것이다. 다섯 번째 열의 “operating circulator No.”는 처리수와 담체와의 접촉기회를 증가시키고 사류를 저감할 목적으로 설치한 내부 교반기의 가동 대수를 의미한다. 처리수와 생물막 담체의 접촉에 필요한 수체의 교란을 공기 주입에 의존하였으나 운전비용 절감을 위해서 Fig. 2와 3과 같이 2개의 내부 교반기를 반응조 내 위치를 변경시키면서 가동 대수를 0, 1대 또는 2대의 가동 여부에 따라 추적자 실험을 수행하였다. 단순히 “1 (front)”와 “1 (rear)”는 바닥 중앙에서 1 대당 6 m³/min의 물을 후단에서 흡입하여 전단으로 분출하는 펌핑으로 수체를 순환시키는 역할을 한다. “(40°)”는 수평을 기준으로 전단에서는 상향, 후단에서는 하향으로 물을 순환시키는 것을 나타내었다(Fig. 2 참조). “1 (rear) (40°)”는 후단 내부 교반기를 유출구 벽면 중심 중간(바닥에서 약 1 m 되는 위치) 부분에 설치한 다음 하향 40도로 물을 흡입하고 분출하는 조건을 나타낸 것이다. 마지막으로 “carrier filling rate”은 담체 충전율을 의미하며 부피비(volume ratio)로 담체 충전율을 퍼센트(%)로 나타낸 것이다.

3. 결과 및 토의

파일럿 규모의 MBBR 반응조를 대상으로 유입부에 주입한 추적자(0.2 L)를 유출부 측에서 시간대별(5초 간격)로 농도를 측정된 결과를 그래프로 나타내고(C-curve), 이 값을 무차원하여 시간대별 농도를 누적으로 적산한 값을 그래프(F-curve)로 작성하였다. 16 조건 하의 MBBR 반응조를 대상으로 추적자 실험을 수행한 결과 대부분 완전혼화 반응조의 거동을 보이는 것으로 나타났지만(Fig. 5~20 참조), 이상적인 완전혼화 반응조와는 차이가 있음을 알 수 있으며, 이를 자세히 정량화하기 위해 다양한 수리거동 지표(T_{10} , T_{50} , T_{90} , T_p , Modal index, Morrill index, β 값 및 short circuiting index 등)를 이용하여 추적자 실험을 분석하였다.

각 운전 조건에 따른 수리거동 지표(T_{10} , T_{50} , T_{90} , T_p , Modal index, Morrill index, β 값 및 short circuiting index 등)를 도출하여 연구 대상인 파일럿 규모의 MBBR 반응조 내부의 수리 거동에 대해 논하고자 하였다. 추적자 실험 결과로 추출한 2차 정보인 수리거동 지표는 다음과 같이 정

의할 수 있다.¹⁰⁾

- ① T_{10} : 추적자의 10%가 유출부를 통과한 시간(min.)
- ② T_{50} , T_g : 추적자의 50%가 유출부를 통과한 시간(min.)
- ③ T_{90} : 추적자의 90%가 유출부를 통과한 시간(min.)
- ④ T_p : 추적자의 농도가 peak에 도달하는 시간(min.)
- ⑤ Modal index (T_p/τ) : 반응조 내의 plug flow 정도를 나타내는 지표
- ⑥ Morrill index (T_{10}/T_{90}) : 반응조 내의 mixing 정도를 나타내는 지표
- ⑦ τ : 이론적 체류시간(min.)
- ⑧ $\beta(T_{10}/\tau)$: 유효 접촉 인자
- ⑨ Short circuiting index ($(T_g - T_p)/T_g$) : 조 내의 단락류 정도를 나타내는 지표

첫 번째 추적자 실험은 2016년 8월 16일 진행되었으며, 담체는 주입하지 않은 상태로 유입유량 128 m³/일로 정유량으로 운전하였다. 8개의 산기관 파이프라인 모두 개방하여 설치한 disk type 산기장치 32개 모두 공기 주입에 사용하였으며, 총 공기 주입량은 1.5 m³/min이었다. 이 공기 주입량은 설계 공기 주입량을 100%로 봤을 때 200%에 달하는 양이었으며 실험 시 다른 특이사항은 없었다.

상기 그래프에서 나타나듯이 약 22분 정도에 추적자 최대 농도가 관측되었으며, Fig. 5의 유출부 농도 곡선은 이상적인 CSTR 반응조 그래프와 거의 유사한 형상을 나타내었다. 본 MBBR 반응조의 이론적 체류시간이 약 176분임을 감안할 때 평균 체류시간은 119분 정도로 나타났으며, T_{10} 은 22분으로 도출되었다.

두 번째 추적자 실험은 2016년 9월 5일 진행되었으며, 담체는 주입하지 않은 상태로 유입유량 128 m³/일로 정유량으로 운전하였다. 8개의 산기관 파이프라인 모두 개방하여 설치한 disk type 산기장치 32개 모두 공기 주입에 사용하였으며, 총 공기 주입량은 0.8 m³/min이었다. 이 공기 주입량은 설계 공기 주입량을 100%로 봤을 때 100%에 달하는 양이었다. 공기 블로어(blower)의 압력은 0.38 bar로 운전하였으며, 이 때 유입수의 pH는 8.49, 수온은 29℃였다.

추적자 최대농도가 나타나는 시간은 30분 정도였으며, T_{10} 은 23분, 평균체류시간은 120분으로 앞서 수행한 운전 조건 1과 거의 같은 값을 나타내었다. 이것으로 인해 공기 주입량의 변화가 MBBR 반응조 내 수리흐름에 큰 영향을 주지 않는 것으로 잠정적으로 생각할 수 있었다. 단지 평균 체류시간과 T_{10} 값이 약 1분 정도 지체되는 현상이 나타나지만 이러한 차이는 미비하다. 혼화흐름 분율(mixed flow

Fig. 5. The results of tracer test (case 1).

Fig. 6. The results of tracer test (case 2).

Fig. 7. The results of tracer test (case 3).

Fig. 8. The results of tracer test (case 4).

fraction)도 0.01정도의 차이를 보이지만 그 차이는 무시할 만한 것으로 판단된다.

세 번째 추적자 실험은 2016년 9월 6일 진행되었으며, 담체를 부피비로 60% 충전한 상태로 유입유량 128 m³/일로 정유량으로 운전하였다. 8개의 산기관 파이프라인 모두 개

Fig. 9. The results of tracer test (case 5).

Fig. 10. The results of tracer test (case 6).

Fig. 11. The results of tracer test (case 7).

Fig. 12. The results of tracer test (case 8).

방하여 설치한 disk type 산기장치 32개 모두 공기 주입에 사용하였으며, 총 공기 주입량은 0.8 m³/min이었다. 이 공기 주입량은 설계 공기 주입량을 100%으로 봤을 때 100%에 달하는 양이었다. 본 조건 실험에서는 담체를 60% 충전한 것이 특이한 점이며, 이 때 유입수의 pH는 8.17, 수온은

Fig. 13. The results of tracer test (case 9).

Fig. 14. The results of tracer test (case 10).

Fig. 15. The results of tracer test (case 11).

Fig. 16. The results of tracer test (case 12).

27.5℃였다.

담체 충전시 담체는 수면에서 약 1.3 m까지 관측이 가능했으며, 실험시 수면에서 바닥까지의 깊이는 총 2 m였다. 추적자 최대 농도가 나타나는 시간은 34분이었으며, T_{10} 은 30분, 평균체류시간은 133분으로 앞서 수행한 운전 조건 1, 2에 비해 거의 같은 값을 나타내었다. 이 결과로부터 물과 비중이 비슷한 담체의 충전이 MBBR 반응조 내 수리흐름에 큰 영향을 주지 않을 것이며, 단지 평균체류시간과 T_{10} 값이 약 3분 정도 지체되는 현상이 나타나지만 이러한 차

Fig. 17. The results of tracer test (case 13).

Fig. 18. The results of tracer test (case 14).

Fig. 19. The results of tracer test (case 15).

Fig. 20. The results of tracer test (case 16).

이는 무시할 만하다.

네 번째 추적자 실험은 2016년 9월 7일 진행되었으며, 담체를 부피비로 60% 충전한 상태로 유입유량 128 m³/일로 정유량으로 운전하였다. 8개의 산기관 파이프라인 중 유입구에서 가까운 순서대로 1, 3, 5, 7번째 파이프라인을 개방하고 나머지 파이프라인은 닫았다. 그래서 disk type 산기장치 16개만을 통해서 공기 주입에 사용하였으며, 총 공기 주입량은 0.4 m³/min이었다. 이 공기 주입량은 설계 공기 주입량을 100%로 고려하였을 때 50%에 달하는 양이었다.

본 실험에서는 블로어 2대를 교차하여 가동하였다. 이 때 유입수의 pH는 7.27, 수온은 27.4℃였다.

추적자 최대 농도가 나타나는 시간은 34분이었으며, T_{10} 은 30분, 평균체류시간은 143분으로 평균 체류시간이 10정도 지체된 것을 제외하고는 운전 조건 3에 비해 거의 같은 값을 나타내었다. 이 결과로부터 공기 주입량을 50%까지 줄여도 충진한 상태의 MBBR 반응조 내 수리흐름은 크게 변화하지 않는 것을 알 수 있었다. 특히 중요한 수리거동 지표인 T_{10} 값은 동일하게 도출되었다.

다섯 번째 추적자 실험은 2016년 9월 8일 진행되었으며, 담체를 부피비로 60% 충진한 상태로 유입유량 128 m³/일로 정유량으로 운전하였다. 8개의 산기관 파이프라인 중 유입구에서 가까운 순서대로 2, 4, 6, 8번째 파이프라인을 개방하고 나머지 파이프라인은 닫았다. 그래서 disk type 산기장치 16개만을 통해서 공기 주입에 사용하였으며, 총 공기 주입량은 0.4 m³/min이었다. 운전 조건 4와 마찬가지로 설계 공기 주입량을 100%로 봤을 때 50%에 달하는 양이었다.

본 실험에서의 특이한 점은 공기 주입량은 동일하나 주입 위치가 운전 조건 4와 다르다는 것이다. 추적자 최대 농도가 나타나는 시간은 36분이었으며, T_{10} 은 29분, 평균체류시간은 132분으로 추적자 최대 농도가 나타나는 시간이 1분 정도 앞당겨진 것을 알 수 있지만 운전 조건 4에 비해 거의 같은 값을 나타내었다. 이 결과로부터 공기 주입 위치가 극단적으로 구석에 편중되지 않고 균등하게 분포한 경우 MBBR 반응조 내 수리흐름은 크게 변화하지 않는 것을 알 수 있었다. 단지 각 산기장치에서 주입되는 공기의 양을 균등하게 배분할 수 있는 것이 중요하다.

여섯 번째 추적자 실험은 2016년 9월 8일 진행되었으며, 담체를 부피비로 60% 충진한 상태로 유입유량 128 m³/일로 정유량으로 운전하였다. 8개의 산기관 파이프라인 중 유입구에서 가까운 순서대로 1, 3, 5, 7번째 파이프라인만 개방하고 나머지 파이프라인은 닫았다. 그래서 disk type 산기장치 16개만을 통해서 공기 주입에 사용하였으며, 총 공기 주입량은 0.4 m³/min이었다. 특이한 점은 수중에 유입구 벽면 깊이 방향으로 1 m 되는 위치에 설치된 내부 교반기 2대를 약 30 Hz로 가동하였는데, 내부 교반기를 통해서 나오는 유량은 3 m³/min으로 계산되었으며 내부 교반기 흡입측은 반대로 -3 m³/min이 흡입되었다( ).

추적자 최대 농도가 나타나는 시간은 28분이었으며, T_{10} 은 26분, 평균체류시간은 123분으로 나타났는데, 운전 조건 5에 비해 이상적인 CSTR 거동에 가까운 것으로 나타났다. 이 결과로부터 내부 교반기의 가동은 담체의 충진 및 공기량 주입의 변화보다 수리거동에 긍정적인 영향을 확실하게 주는 것으로 인지할 수 있었다.

일곱 번째 추적자 실험은 2016년 9월 9일 진행되었으며, 담체를 부피비로 60% 충진한 상태로 유입유량 128 m³/일로 정유량으로 운전하였다. 8개의 산기관 파이프라인 중 유

입구에서 가까운 순서대로 1, 3, 5, 7번째 파이프라인만 개방하고 나머지 파이프라인은 닫았다. 이번 조건에서는 disk type 산기장치 16개만을 통해서 공기를 주입하는데, 총 공기 주입량은 0.2 m³/min로 낮추었다. 설계 공기 주입량 대비 25%에 해당하는 양이다. 운전 조건 6과 다르게 내부 교반기는 가동하지 않았다.

추적자 최대 농도가 나타나는 시간은 90분이었으며, T_{10} 은 66분, 평균체류시간은 168분으로 나타났는데, 공기 주입량을 25%로 감소함으로써 확실하게 수리거동이 이상적인 CSTR 반응조와 멀어지는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 주입하는 공기가 미생물의 활성뿐만 아니라 수리거동에도 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 단 설계 공기 주입량의 50%까지 감소할 때까지는 각 운전 조건에서 공기 주입량이 수리거동에 미치는 영향이 미비하였지만 그 이하 25%에 달할 때에는 공기 주입량의 감소가 수리 거동에 부정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다.

여덟 번째 추적자 실험은 2016년 9월 10일 진행되었으며, 담체를 부피비로 60% 충진한 상태로 유입유량 128 m³/일로 정유량으로 운전하였다. 8개의 산기관 파이프라인 중 유입구에서 가까운 순서대로 1, 3, 5, 7번째 파이프라인만 개방하고 나머지 파이프라인은 닫았다. 이번 조건에서는 disk type 산기장치 16개만을 통해서 공기를 주입하는데, 총 공기 주입량은 0.2 m³/min로 유지하면서 운전 조건 6과 같이 내부 교반기 2대를 가동하였다(30 Hz, 3 m³/min,). 이는 공기 주입량의 감소가 수리거동에 미치는 영향을 내부 교반기의 가동으로 대체가 가능한 지 알아보고자 함이었다.

추적자 최대 농도가 나타나는 시간은 44분이었으며, T_{10} 은 36분, 평균체류시간은 136분으로 나타났는데, 운전 조건 7에 비해 이상적인 CSTR 거동에 가까운 것으로 나타났다. 그러나 앞서 언급한 운전 조건 4나 5의 공기 주입량 50%를 유지하면서 내부 교반기를 가동하지 않는 경우와 비교하여 반응조 내의 수리거동이 좋게 나타나지 않았다. 여기서 수리 거동이 좋지 않다는 의미는 이상적인 CSTR과의 일치도를 언급하는 것이다.

아홉 번째 추적자 실험은 2016년 9월 10일 진행되었으며, 담체를 부피비로 60% 충진한 상태로 유입유량 128 m³/일로 정유량으로 운전하였다. 8개의 산기관 파이프라인 중 유입구에서 가까운 순서대로 1, 3, 5, 7번째 파이프라인만 개방하고 나머지 파이프라인은 닫았다. 이번 조건에서는 disk type 산기장치 16개만을 통해서 공기를 주입하는데, 총 공기 주입량은 0.2 m³/min로 유지하면서 운전 조건 8과 같이 내부

교반기 2대를 가동하였다(30 Hz, 3 m³/min,). 본 조건에서는 공기 주입량을 감소시킨 경우 내부 교반기의 위치 변경이 MBBR 반응조 내 수리 거동에 미치는 영향을 알아보기 위함이었다.

추적자 최대 농도가 나타나는 시간은 40분이었으며, T_{10} 은 32분, 평균체류시간은 142분으로 나타났는데, 운전 조

건 8에 비해 이상적인 CSTR 거동에 일치도는 거의 유사한 것으로 나타났다. 앞서 언급한 운전 조건 4나 5의 공기 주입량 50%를 유지하면서 내부 교반기를 가동하지 않는 경우와 비교하여 반응조 내의 수리거동이 좋게 나타나지 않았다.

열 번째 추적자 실험은 2016년 9월 11일 진행되었으며, 담체를 부피비로 60% 충전한 상태로 유입유량 128 m³/일로 정유량으로 운전하였다. 8개의 산기관 파이프라인 중 유입구에서 가까운 순서대로 1, 3, 5, 7번째 파이프라인만 개방하고 나머지 파이프라인은 닫았다. 이번 조건에서는 disk type 산기장치 16개만을 통해서 공기를 주입하는데, 총 공기 주입량은 0.2 m³/min로 유지하면서 운전 조건 8이나 9와 다르게 유입부 전단에서 내부 교반기 1대를 가동하

였다(30 Hz, 3 m³/min,). 본 조건에서는 공기 주입량을 감소시킨 경우 내부 교반기의 댕 수 변경이 MBBR 반응조 내 수리 거동에 미치는 영향을 알아보기 위함이었다.

추적자 최대 농도가 나타나는 시간은 52분이었으며, T_{10} 은 36분, 평균체류시간은 140분으로 나타났는데, 운전 조건 9에 비해 추적자 최대 농도가 나타나는 시간은 약 10분 이상 지체되는 것으로 나타났으나 이상적인 CSTR 거동에 일치도는 거의 유사한 것으로 나타났다. 앞서 언급한 운전 조건 9나 8에서 공기 주입량을 25%로 유지하면서 내부 교반기 2대 가동한 경우와 비교하면, 내부 교반기를 1대나 2대를 가동하는 차이는 크지 않지만 내부 교반기의 가동 유무는 수리 거동에 큰 차이를 가져오는 것으로 나타났다. 즉 교반을 천천히 일으키는 정도만 수반된다면 교반 강도의 영향은 미비한 것으로 인지할 수 있다.

열한 번째 추적자 실험은 2016년 9월 11일 진행되었으며, 담체를 부피비로 60% 충전한 상태로 유입유량 128 m³/일로 정유량으로 운전하였다. 8개의 산기관 파이프라인 중 유입구에서 가까운 순서대로 1, 3, 5, 7번째 파이프라인만 개방하고 나머지 파이프라인은 닫았다. 이번 조건에서는 disk type 산기장치 16개를 통해서 공기를 주입하는데, 총 공기 주입량은 0.2 m³/min로 유지하면서 운전 조건 10과 다르게 유출부 후단에 내부 교반기 1대를 가동하였다(30

Hz, 3 m³/min,). 본 조건에서는 공기 주입량을 감소시킨 경우 내부 교반기의 댕 수를 1대로 고정하고 그 위치를 변경하였을 때 MBBR 반응조 내 수리 거동에 미치는 영향을 알아보기 위함이었다.

추적자 최대 농도가 나타나는 시간은 44분이었으며, T_{10} 은 38분, 평균체류시간은 155분으로 나타났는데, 운전 조건 10에 비해 dead space 분율이 약 0.08정도 감소하는 것으로 나타났으나 이상적인 CSTR 거동에 일치도는 거의 유사한 것으로 나타났다. 운전 조건 10에서 공기 주입량을 25%로 유지하면서 내부 교반기 1대를 전단에서 가동한 것과 비교하면, 내부 교반기 위치에 대한 수리 거동에 미치는 영향은 미비한 것으로 나타났다.

열두 번째 추적자 실험은 2016년 9월 19일 진행되었으며, 담체를 부피비로 50%로 감소시키고 유입유량 128 m³/일로 정유량으로 운전하였다. 8개의 산기관 파이프라인 중 유입구에서 가까운 순서대로 1, 3, 5, 7번째 파이프라인만 개방하고 나머지 파이프라인은 닫았다. 이번 조건에서는 disk type 산기장치 16개를 통해서 공기를 주입하는데, 총 공기 주입량은 0.24 m³/min로 유지하면서 운전 조건 11과 다르게 내부 교반기를 가동하지 않았다. 본 조건에서는 담체의 충전률의 감소가 MBBR 반응조 내 수리 거동에 미치는 영향을 알아보기 위함이었다.

추적자 최대 농도가 나타나는 시간은 52분이었으며, T_{10} 은 38분, 평균체류시간은 145분으로 나타났는데, 운전 조건 11에 비해 dead space 분율이 약 0.06정도 증가하는 것으로 나타났으며, 운전 조건 11과 비교했을 때 공기 주입량을 25%로 유지하면서 내부 교반기의 가동 유무는 확실하게 위치에 대한 수리 거동에 미치는 영향이 나타나는 것으로 나타났다.

열세 번째 추적자 실험은 2016년 9월 20일 진행되었으며, 담체를 부피비로 다시 40%로 감소시키고 유입유량 128 m³/일로 정유량으로 운전하였다. 8개의 산기관 파이프라인 중 유입구에서 가까운 순서대로 1, 3, 5, 7번째 파이프라인만 개방하고 나머지 파이프라인은 닫았다. 이번 조건에서는 disk type 산기장치 16개를 통해서 공기를 주입하는데, 총 공기 주입량은 다시 0.155 m³/min로 감소하여 운전 조건 12와 동일하게 내부 교반기를 가동하지 않았다. 본 조건에서는 담체의 충전률의 감소와 공기 주입량을 더 감소시킨 경우 MBBR 반응조 내 수리 거동에 미치는 영향을 알아보기 위함이었다. 본 조건에서 유입수 수질은 pH는 7.10, 수온은 26.3℃이었다.

추적자 최대 농도가 나타나는 시간은 46분이었으며, T_{10} 은 36분, 평균체류시간은 132분으로 나타났는데, 운전 조건 12에 비해 미비하지만 오히려 이상적인 CSTR 반응조에 가까운 수리 거동이 나타났다. 이는 담체의 일정량 이상의 충전률 감소가 공기 주입량 감소보다 수리 거동에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 공기량 주입이나 내부 교반기의 가동 등 외부 힘에 의한 교란이 미비할 때에는 담체를 충분히 유동시키는 에너지가 부족한 것으로 사료된다.

열네 번째 추적자 실험은 2016년 9월 29일 진행되었으며, 담체를 부피비로 다시 40%로 감소시키고 유입유량 128 m³/일로 정유량으로 운전하였다. 8개의 산기관 파이프라인 중 유입구에서 가까운 순서대로 1, 3, 5, 7번째 파이프라인만 개방하고 나머지 파이프라인은 닫았다. 이번 조건에서는 disk type 산기장치 16개를 통해서 공기를 주입하는데, 총 공기 주입량은 다시 0.12 m³/min로 감소하였으며, 내부교반기 2대를 가동했다. 내부 교반기 1대는 유입부 벽면 바닥에서 수평을 기준으로 40도 상향으로, 1대는 유출부 벽면 수심 중간 깊이에서 40도로 하향으로 설치, 가동

하였다(30 Hz, 3 m³/min,). 본 조건에서는 MBBR 반응조 내 담체의 유동이 발생하지 않는

사류가 관측되어 이를 감소시키기 위해 내부 교반기를 경사지게 위치시켜 전체적인 유동을 유도하는 환경을 만들고자 하였다. 본 조건에서 유입수 수질은 pH는 6.85, 수온은 26.3℃이었다.

추적자 최대 농도가 나타나는 시간은 44분이었으며, T_{10} 은 27분, 평균체류시간은 134분으로 나타났는데, 운전 조건 8과 9의 조건에서 2대의 내부 교반기를 가동한 조건과 비교하면 확실하게 이상적인 CSTR 반응조에 가까운 수리 거동이 나타났다. 이는 육안으로도 관측된 사류지역을 감소시키고 상하 방향으로 유동을 유도하기 위한 경사진 배치가 효과가 있는 것으로 관측되었다.

열다섯 번째 추적자 실험은 2016년 9월 30일 진행되었으며, 담체를 부피비로 전 조건에 비해 다시 60%로 증가시키고 유입유량 128 m³/일로 정유량으로 운전하였다. 8개의 산기관 파이프라인 중 유입구에서 가까운 순서대로 1, 3, 5, 7 번째 파이프라인만 개방하고 나머지 파이프라인은 닫았다. disk type 산기장치 16개를 통해서 공기를 주입하는데, 총 공기 주입량은 다시 0.315 m³/min로 증가시켰으며 내부 교반기는 가동시키지 않았다. 본 조건에서의 공기 주입량은 설계 공기주입량의 약 40%에 해당하는 양이며, 이 정도의 공기 주입량으로 운전을 하는 경우 MBBR 반응조 내 담체의 유동이 만족스러운지를 검토하기 위해서 수행되었다. 본 조건에서 유입수 수질은 pH는 6.82, 수온은 26.2℃이었다.

추적자 최대 농도가 나타나는 시간은 62분이었으며, T_{10} 은 46분, 평균체류시간은 153분으로 나타났는데, 본 운전 조건에서는 가장 경제적인 운전조건을 가정하여 내부 교반기도 가동하지 않고 공기 주입량도 극한으로 감소시킨 경우를 구현한 것이다. 그러나 이 조건에서는 이상적인 CSTR 반응조와는 거리가 먼 수리 거동이 나타났다.

열여섯 번째 추적자 실험은 2016년 10월 1일 진행되었으며, 담체를 부피비로 60%로 유지하고 유입유량 128 m³/일로 정유량으로 운전하였다. 8개의 산기관 파이프라인

인 중 유입구에서 가까운 순서대로 1, 3, 5, 7번째 파이프라인만 개방하고 나머지 파이프라인은 닫았다. disk type 산기장치 16만을 통해서 공기를 주입하는데, 총 공기 주입량도 0.315 m³/min로 유지하였으며 내부 교반기는 2대 모두 운전 조건 14와 같이 경사지게 설치하여 운전하였다

운전 조건 15가 만족스러운 반응조 내의 유동을 구현하지 못해서 앞선 실험에서 내부 교반기를 경사지게 배치한 경우가 긍정적인 수리 거동을 구현하는데 어느 정도 영향을 미치는지를 조사하기 위해 본 실험을 수행하였다.

본 운전 조건에서 추적자 최대 농도가 나타나는 시간은 22분이었으며, T_{10} 은 26분, 평균체류시간은 156분으로 나타났다. 이와 같은 수리 거동 지표값은 운전 조건 1의 공기 주입량을 설계 공기 주입량의 200%를 주입한 운전 조건 1의 결과보다 이상적인 CSTR 반응조의 특성을 보이고 있다. 추후에 공기 주입에 의한 동력비와 내부 교반기의 가동에 의해서 발생하는 추가 비용의 비교 및 본 실험 조건에서의 공기 주입량에 의한 미생물의 활성도를 고려하여야 하겠지만 반응조 내의 수리 거동만을 고려한다면 가장 좋은 효율을 낼 것으로 기대된다.

다음 Table 3과 4는 총 16개의 조건에 걸쳐 수행된 추적자 실험결과를 요약·정리한 것이다. 각 수리 거동 지표는 정량화된 C-curve와 F-curve로부터 도출하였다.

상기 Table 3과 4에서 정리한 추적자 실험 결과 및 수리 거동 지표의 값을 살펴보면 운전 조건 1, 2, 3은 만족스러운 이상적인 CSTR의 반응조 특성을 나타내고 있다. 그러나 운영 측면에서 보면 공기 주입량이 너무 과다하여 경제적인 운영과는 거리가 있는 것으로 판단된다. 추적자 실험의 운전 조건을 결정함에 있어서 16회로 진행되는 동안 최적의 운전 조건을 찾아가는 방향으로 수행되었다. 즉 Morrill index 및 Modal index, T_{10} 값, N_{CSTR} 값, 단락류 지수를 평

Table 3. Hydraulic efficiency index (case 1~8)

Case No.	1	2	3	4	5	6	7	8
Air injection (%)	200	100	100	50	50	50	25	25
Open diffuser line No.	all	all	all	1,3,5,7	2,4,6,8	1,3,5,7	1,3,5,7	1,3,5,7
Operating Circulator No.	0	0	0	0	0	2	0	2
Carrier filling rate (%)	0	0	60	60	60	60	60	60
T_p (min)	22	30	34	34	36	28	90	44
HRT (T) (min)	119	120	133	143	132	123	168	136
T_p/T	0.185	0.251	0.255	0.238	0.273	0.228	0.536	0.324
N_{CSTR}	1.54	1.49	1.52	1.37	1.59	1.75	2.38	1.72
Morrill Ind.	11.27	11.48	9.27	10.13	9.52	9.69	4.61	7.67
T_{10}	22	23	30	30	29	26	66	36
Modal Ind.	0.12	0.17	0.19	0.19	0.20	0.16	0.5	0.24
Plug Flow fraction	0.07	0.09	0.12	0.11	0.12	0.08	0.26	0.16
Mixed Flow fraction	0.93	0.91	0.88	0.89	0.88	0.92	0.74	0.84
Short Circuit Index	0.45	0.43	0.35	0.36	0.32	0.13	0.05	0.23

Table 4. Hydraulic efficiency index (case 9~16)

Case No.	9	10	11	12	13	14	15	16
Air injection (%)	25	25	25	30	20	15	40	40
Open diffuser line No.	1,3,5,7	1,3,5,7	1,3,5,7	1,3,5,7	1,3,5,7	1,3,5,7	1,3,5,7	1,3,5,7
Operating Circulator No.	2	1	1	0	0	2 (incline)	0	2 (incline)
Carrier filling rate (%)	60	60	60	50	40	40	60	60
T_p (min)	40	52	44	52	46	44	62	22
HRT (T) (min)	142	140	155	145	132	134	153	156
T_p/T	0.282	0.371	0.284	0.359	0.348	0.328	0.405	0.141
N_{CSTR}	1.52	1.77	1.74	1.63	1.63	1.73	2.14	1.3
Morrill Ind.	9.31	7.61	8.32	8.05	7.44	10.15	6.39	13.38
T_{10}	32	36	38	38	36	27	46	26
Modal Ind.	0.22	0.29	0.24	0.29	0.26	0.24	0.34	0.12
Plug Flow fraction	0.12	0.16	0.14	0.15	0.17	0.07	0.16	0.06
Mixed Flow fraction	0.88	0.84	0.86	0.85	0.83	0.93	0.84	0.94
Short Circuit Index	0.27	0.23	0.16	0.28	0.28	0.17	0.01	0.1

가하였을 때 가장 경제적으로 이상적인 CSTR 반응조를 구현하는 조건은 16번이다. 그 다음으로 14번, 공기 주입량은 50%, 전단에서 두 대의 내부 교반기를 가동하는 운전 조건 6번, 9번 등이 수리 거동적인 측면에서 사류 및 단락류의 발생이 작고 이상적인 CSTR반응조의 특성을 잘 반영하는 운전 조건이라 할 수 있다.

4. 결론

MBBR 반응조를 대상으로 16가지 운전 조건 시나리오로 변화시키면서 추적자 실험을 수행하였다. 이에 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 공기 주입량의 과소가 처리 효율에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 용존산소(DO, Dissolved Oxygen)에 의한 미생물의 활성도를 제외하고서라도 공기 주입량이 많으면 이상적인 CSTR 반응조 특성에 가깝게 나타나므로 처리효율이 좋을 것으로 예상된다.
- 2) 담체는 반응조 수리흐름에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 담체의 충전률이 증가함에 따라 수리 거동 지표가 다소 이상적인 CSTR 반응조 지표에 비해 미비하게 떨어지는 것으로 조사되었지만 단락류 지표의 경우 감소하는 경향이 나타났다. 특히 담체 충전율이 40%, 50%, 60%로 변화를 준 경우 수리 거동은 거의 차이가 없는 것으로 조사되었다.
- 3) 산기관 파이프라인의 선별적인 운영은 반응조 수리 거동에 거의 영향을 미치지 않는다. 산기관 파이프라인이 등 간격으로 분포하는 경우 1, 3, 5, 7번의 라인으로 공기 주입을 하는 경우와 2, 4, 6, 8번 라인으로 주입하는 경우의 차이는 무시할 정도로 미비하였다. 단, 하나의 산기관 파이프라인에 산기장치를 설치하는 경우 충분한 저항을 주어 공

기 유량이 균등하게 배출되게 하는 것이 아주 중요하다.

4) 내부 교반기의 가동 댓 수는 처리 효율에 영향을 미친다. 내부 교반기의 가동 댓 수가 0, 1 및 2대로 증가할수록 수리 거동 지표 값이 이상적인 CSTR 반응조 특성에 가까워지고 특히 단락류 및 사류가 감소하는 것으로 나타났다.

5) 내부 교반기의 위치 및 설치 경사가 수리 거동에 지대한 영향을 미친다. 운전 조건 14와 16의 경우 수평면을 기준으로 40도 정도 경사지게 설치·운전하는 경우 이상적으로 나타났다. 그리고 내부 교반기가 전단 및 후단에 편중되어 운전하는 경우보다 전단과 후단으로 나누어 각 1대씩 가동하는 경우 수리 거동이 좋은 것으로 나타났다.

6) 운전 조건 16번이 가장 이상적인 CSTR 반응조 특성을 나타내었으며, 그 다음으로 14, 6 및 9번이 좋은 수리 거동 특성을 보이는 운전 조건으로 조사되었다. 운전 조건 1, 2, 3은 만족스러운 이상적인 CSTR의 반응조 특성을 나타내고 있으나 운영 측면에서 보면 공기 주입량이 너무 과다하여 경제적인 운영과는 거리가 있는 것으로 판단된다.

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. Chen, S., Sun, D. and Chung, J-S., “Simultaneous removal of COD and ammonium from landfill leachate using an

- anaerobic - aerobic moving-bed biofilm reactor system," *Waste Manage.*, **28**(2), 339~346(2008).
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. Jähren, S. J., Rintala, J. A. and Ødegaard, H., "Aerobic moving bed biofilm reactor treating thermomechanical pulping whitewater under thermophilic conditions," *Water Res.*, **36**(4), 1067~1075(2002).
5. 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)
6. 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).
7. 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).
8. Ødegaard, H., Rusten, B. and Westrum, T., "A new moving bed biofilm reactor-application and results," *Wat. Sci. Tech.*, **29**(10-11), 157~165(1994).
9. Benjamin, M. M. and Lawler, D. F., *Water Quality Engineering: Physical/Chemical Treatment Processes*, 1st ed., John Wiley & Sons., New York, (2013).
10. Teixeira, E. C. and Siqueira, R. N., "Performance assessment of hydraulic efficiency indexes," *J. Environ. Eng.*, **134**(10), 51~859, (2008).