자기세정 여과 반응장치를 이용한 하수처리에 관한 연구 A Study of Sewage Treatment with a Self-Cleaning Filtration Unit

모성영 · 이풀잎 · 김범수* · 이태진[†]
Sung-Young Mo · Pul-Eip Lee · Bum-Su Kim* · Tae-Jin Lee[†]

서울과학기술대학교 환경공학과 · *에이치엔텍

Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science & Technology

*Technical Research Team of H-entech

(Received February 19, 2016; Revised March 21, 2016; Accepted April 18, 2016)

Abstract : In this study, sewage was fed with up flow direction into a reactor equipped with a screw to circulate media that had lower specific gravity than water. It was observed that the media in the reactor could be circulated by a screw with reverse flow of the sewage feeding from the top to the bottom direction. Under these conditions, concentrations of inflow and outflow pollutants were measured at the filtration unit. Experimental results revealed stable circulation of the media with a screw in the reactor. Circulation of the media in the reactor showed more efficiency in removing the pollutants (particulate matters and organics) than no circulation. The maximum removal efficiencies of suspended solid (SS), chemical oxygen demand (COD_{mn}), and total phosphorus (T-P) were 96%, 72% and 65%, respectively. Improvements for SS, COD_{mn} and T-P removals with circulation of media were 52.38%, 43.14% and 118.12% respectively, compared to those without circulation.

Key Words : Self-Cleaning Filtration, Media, Suspended Solid (SS), Media Circulation Time (MCT)

요약 : 본 연구에서는 내부에 여재순환용 스크루가 장착된 여과장치에 물보다 비중이 작은 여재를 충전한 후 오수를 상향류로 유입하였다. 반응기 내부의 여재가 스크루에 의해 상부에서 하부로 오수의 흐름에 반하여 원활히 순환되는지 확인하였으며 이 과정에서 여과장치에 의한 오염물질의 제거양상을 살펴보았다. 실험결과 내부 스크루에 의한 여재의 안정적인 순환을 확인할 수 있었으며, 여재 순환주기에 따른 오염물질의 제거효율은 순환주기가 길어질수록 여과작용이 원활히 진행되어 입자상 물질과 유기물질이 효과적으로 제거하는 것으로 나타났다. 최대 처리효율은 SS, COD_{mn}, 그리고 T-P순으로 각각 96%, 72%, 65%를 보였으며, 이는 여재가 순환되지 않는 경우보다 각각 52.38%, 43.14%, 118.12%의 처리효율이 개선되는 효과가 있는 것으로 나타났다.

주제어 : 자기세정 여과장치, 여재, 부유물질, 여재순환주기

1. 서론

급속한 경제성장과 산업시설의 밀집화 및 도시집중화로 인해 생활수준의 향상에 따라 하수발생량은 크게 증가하고 있으며, 최근 시민의식의 향상 및 환경보존의 필요성 체감으로 인해 오염물질의 안정적인 처리에 관심이 집중되고 있어 특히 하수처리의 효율을 높이기 위해 하수의 안정적인 처리는 필수적이라고 할 수 있다.¹⁾ 이러한 수질오염 문제를 해결하기 위하여 하수처리시설은 지속적으로 건설되어 왔고, 하수처리시설의 방류수 수질기준 또한 점차적으로 강화되어 왔다. 이처럼 엄격한 방류수 수질기준을 적용하고 있어, 처리시설의 확장없이 기존 하수처리시설 만으로 강화되는 방류수 수질기준을 안정적으로 준수하기는 거의 불가능한 실정이다.^{2,3)}

기존의 하수처리시설은 유기물, 부유물질, 영양염류의 단순제거를 목적으로 하였으나, 제한된 수자원으로 인해 향후 하수처리는 상수원 보호뿐 아니라 하수처리수의 수자원화 개념까지 확장되고 있는 실정이다. 생활용수 수준의 초고도 하수처리는 상수원수 2급수에 해당하는 수질 확보가

술로 초고도 처리와 유해물질의 적절한 처리 및 관리가 필요하다.^{4,6)} 이러한 시대적 요구에 따라 부유물질 및 입자성 물질의 배출조건을 만족하기 위한 다양한 고도처리기술들이 개발 또는 사용되고 있으며 국내 하수처리장의 대부분은 일반 여과법 및 막분리가 병행된 활성슬러지법 등이 널리 적용되고 있다.⁷⁻¹⁰⁾

기존 공법으로 사용되어 오는 활성슬러지법의 문제점으로는 유기물 농도가 매우 낮은 우수나 하천수가 유입이 되거나 산업장 방류수 등이 병합처리 되거나 또는 겨울철 수온이 낮을 때 처리효율이 저하하여 목표수질을 유지하는데 어려움이 많다. 또한 유지관리가 쉽지 않을 뿐 아니라, 부하변동이 큰 경우에 대처하기 어렵고, 잉여오수가 다량 발생하는 등 여러 가지 문제점을 들 수 있다.¹¹⁾ 특히 다량의 슬러지 발생과 사상균 등의 증식에 의한 슬러지 별킹현상, 잉여슬러지가 발생량이 적고, 유기물 뿐만 아니라 질소, 인과 같은 영양염류를 제거율이 낮아 문제시된다.¹²⁻¹⁴⁾ 따라서 이러한 활성슬러지 공법의 문제점을 해결하기 위해 공정 후단에 모래여과탑이나 막분리와 같은 여과처리시설을 병합하여 운전하여 처리수질을 확보하고자 하고 있다.

[†] Corresponding author E-mail: leetj@seoultech.ac.kr Tel: 02-970-6614 Fax: 02-971-5776

국내 대부분의 하수처리시설에서 적용되고 있는 모래여과법은 응집, 침전, 여과 및 소독처리에 의존하고 있어 수질악화에 효과적으로 대처하는데 한계가 있다. 하수처리에서 오염물질들을 제거하기 위하여 응집제를 주입하게 될 경우에는 모래여과지의 폐색으로 인한 여과장애를 초래함과 아울러 비경제적인 처리가 되는 문제점을 가지고 있는 현실이다.¹⁵⁻¹⁷⁾ 또한 잦은 역세척으로 공정의 운영이 까다롭기도 하다. 막분리 공법을 적용한 여과시설은 역세척 또는 파울링의 문제와 더불어 적지 않은 설치비와 과다한 운영비는 현장적용에 많은 어려움을 수반하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 기존의 병합 활성슬러지법의 문제점으로 지적되고 있는 단점들을 보완하고자 향후 강화가 예상되는 방류수 수질기준에 대처하고, 처리효율이 안정적으로 유지되며, 여과시설의 불완전한 요소인 역세척 과정이 없이 연속적으로 여과기능을 확보할 수 있는 자기세정형 여과장치를 사용하여 방류수 기준에 적합한 처리수를 얻고자 하였다.^{18,19)} 자기세정형 여과장치는 여과장치 내부에 스크루를 삽입하여 스크루에 의해 여재를 하단부로 이송하며, 이송과정에서 탈리된 입자상 물질은 중력침전에 의해 연속적으로 하단으로 배출하고, 상향류의 여과기능은 연속적으로 가능하도록 하였다. 따라서 본 연구에서 제시하는 자기세정 여과장치는 역세척 공정이 필요하지 않으며 운영이 단순하고 부지 면적을 최소화할 수 있는 장점이 있다고 보여진다.

따라서 본 실험에서는 기존의 여과처리공법으로 오수를 처리하였을 때 나타나는 문제점을 극복하기 위해 자기세정형 여과장치를 설치하고 오수의 처리효율을 살펴보았다. 이를 위하여 자기세정 여과장치의 여재의 순환에 따른 수질의 변화를 살펴보았으며 여재의 순환주기에 따른 수질처리의 안정성 등을 관찰해 보았다. 또한 비교 연구를 위해 기존의 여과장치와 같이 여재의 순환이 없는 상태에서 변화도 분석하였다. 본 연구에서 제시되는 연구결과는 여과장치의 개선에 관한 것으로 타 연구자의 여과장치 개발에 접근방법을 모색하는데 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 연구방법

본 연구에서는 오수 또는 폐수에 함유한 입자상 물질이나 유기물질을 제거에 관한 것으로 비중이 물보다 가벼운 Polypropylene (PP) 재질의 여재를 반응기에 충전한 후 오수를 상향류로 여재를 통과하여 여재의 여과기능과 여재 표면에 성장한 생물막에 의해 입자상 물질과 하수 내 유기물질을 제거하고자 하였다.

2.1. 실험장치

Fig. 1은 실험에서 사용된 lab Scale 규모의 자기세정 여과장치를 모식화한 그림과 사진을 나타낸다. 여재 깊이에 따른 유출수의 수질을 모니터링하기 위해 상단, 중단, 하단에 설치된 유출라인에서 시료를 채취하였다. 본 연구에서 사용된 자기세정 여과장치는 여재가 충전된 반응기로 안쪽에는 상·하부가 개방된 원형통으로 둘러싸인 스크루가 있고, 스크루 상·하단부는 스크러버 암이 장착되어 일체형으로 구성되어 있다. 반응조 높이는 30 cm, 직경 13 cm, 반응조 총 부피는 약 4 L이며, 반응조 내 스크루의 길이는 15 cm, 외경 4 cm로 구성되었으며 반응기는 투명아크릴 재질로 제작하였다.

스크루를 둘러싸고 있는 내부가이드 원형관은 가능한 한 스크루에 직경과 같도록 하여 여재가 스크루 외곽으로 흐를 수 없도록 제작되었다.²⁰⁾ 스크루는 반응기 상단부의 여재를 하단부로 이송하는 역할을 수행하게 되며, 스크러버 암은 반응조의 윗단·아랫단에 설치하였다. 윗단에 위치한 스크러버 암은 상단에 있는 여재를 스크루 내부로 여재가 원활히 들어갈 수 있도록 설치하였으며, 하단에 위치한 스크러버 암의 역할은 여재의 거름작용에 의해 포획된 입자성 물질이나 과도하게 자란 미생물막을 탈리시켜 주어 상단부로 여재가 부상할 수 있도록 해주는 역할을 해준다. 탈리된 입자성 물질은 중력 침전 현상에 의해 반응기 아래로 침전하게 된다. 오수를 주입하는 유입구는 반응기 하단부에 위치하며 이때 유입구는 반응기에 충전된 여재의 하단에 위

Fig. 1. Photograph of Lab-Scale : (a) schematic diagram of self-cleaning filtration unit, (b) photograph of the experimental equipment.

Table 1. Experimental conditions of self-cleaning filtration unit

Item	Unit
Filter material	Acrylic
Flux (L/day)	276
HRT (min)	11
Velocity (cm/min)	1.47
RPM	10

치하여 여재층 전면으로 오수가 유입될 수 있도록 하고, 유출구는 반응기 상단부에 위치하되 내부 스크루 최 윗단 보다 아래쪽에 위치하도록 하였다.

반응조 내부의 스크루의 회전속도를 10 rpm을 유지하기 위해 교반모터를 사용하였다. 실험에 사용된 공정유량은 Table 1과 같다.

2.2. 여재제원

실험에서 사용된 집축여재로는 비중이 물보다 가볍고 플라스틱의 원료인 Polypropylene (PP)을 사용하였으며, 약 3 mm의 직경의 입상형 발포 프로필렌의 중합체로 반응조 부피의 60% (v/v)를 충전하였다. 실험에 사용된 여재의 제원은 Table 2에 나타내었다.

2.3. 유입수 및 분석방법

본 연구에서 사용된 합성폐수는 여과장치가 활성슬러지 공정 후단부에 위치되는 것을 가정하여 일반적으로 활성슬러지 유출수의 농도와 유사하게 설정하여 반응기에 유입되었으며 합성폐수의 농도는 Table 3에 나타낸 바와 같다. 운전기간동안 유입 및 유출수를 일일 2회 주기적으로 채취하였으며 SS, COD_{mn}, T-N, T-P 등의 분석은 수질오염공정시험법에 준하여 실험하였다.

2.4. 실험방법

여재 순환주기에 따른 오염물질의 제거특성을 분석하기

Table 2. Specifications of polypropylene media

Structure	Characteristics
Average media size (mm)	3.0
Media shape	rounded granular
Media density (kg/m ³)	0.89~0.92
Media material	lightweight plastic
Heat-resistant	120℃

Table 3. Characteristics of synthetic wastewater used in this study

Parameter	Concentration (mg/L)
COD _{mn}	18 ± 0.3
SS	20 ± 0.5
T-N	2.0 ± 0.2
T-P	0.1 ± 0.1

위해 식 (1), (2)와 같이 0차 반응식을 이용하였다. 이를 토대로 일정시간마다 측정된 반응조 내의 유입수 농도 및 유출수의 농도 값을 나타내었으며, 제거율 또한 산출하였다.

$$C_e = \frac{V_{org} \cdot C_{org} + V_{out} \cdot C_{out}}{V_{org} + V_{out}} \quad (1)$$

$$C_{out} = C_e - k \cdot t \quad (2)$$

여기서 C_e 는 반응조 내의 유입수 농도(mg/L), C_{org} 는 초기 유입수의 농도(mg/L), C_{out} 은 유출수의 농도(mg/L), V_{org} 는 총 부피(L), V_{out} 은 유출수의 부피(L), k 는 반응속도 상수, t 는 수리학적 체류시간(min)을 각각 나타낸다. 식 (1), (2)를 이용하여 산출된 C_e , C_{out} 의 값은 SIGMA PLOT 2002 (SPSS Science, UK) software을 이용하여 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 여재순환형 여과장치의 운전가능성 평가

본 연구에서 사용하는 자기세정형 여과장치는 역세척 없이 연속적인 오수의 여과작업을 수행하는 특징을 가지고 있어서 안정적 여과기능의 확보를 위해서는 내부에 장착된 스크루에 의한 여재의 순환이 원활히 진행되고, 하단 스크러 버암과 여재의 순환으로 입상성 물질이 적체되지 않고 하단부로 침전 하강되는 작용이 원활하게 수행되어야 한다.

위에 열거한 기능들을 확인하기 위해 Fig. 2의 그림과 같

Fig. 2. Self-cleaning filtration unit : (a) initial step of the operation of the unit, (b) operation of the unit with circulation of media by the screw, (c) operation of the unit without circulation of the media.

이 반응기 내부에 장착된 스크루와 스크리버 암을 10 rpm으로 회전시키면서 오수를 하단부에 유입하였다(Fig. 2(a)). 일정 시간 운전을 연속적으로 진행하였을 때 Fig. 2(b)에서 확인되는 바와 같이 여재 하단부에서 입자성 물질과 과도하게 자란 미생물 막이 탈리하여 반응기 하단부로 중력되었고, 반응기 내 여재는 상부에서부터 하부로 연속 순환되었으며 여재는 폐색현상 없이 순환되며 여재층을 형성하는 것을 볼 수 있었다.

비교실험을 위해 여재의 순환이 없이 오수의 유입이 연속적으로 진행되었을 경우, Fig. 2(c)에서 나타나는 바와 같이 입자성 물질과 미생물막의 형성으로 반응기 내부 여재 사이의 공극에 막힘 현상이 나타나는 것을 육안으로 뚜렷이 확인할 수 있었고 부작된 입자성물질로 인해 여재의 비중이 점차 높아지게 되고 결국 여재층이 붕괴되어 여재층이 전체적으로 붕괴되는 현상을 관찰할 수 있었다.

이는 반응기 내부의 장치된 스크루에 의한 여재순환없이 오수가 연속적으로 유입되었을 때 여재 사이의 공극에서 입자성 물질 및 미생물막이 형성되며 반응기의 폐색현상이 도래하게 되고, 결국 부가적인 역세척 공정이 반드시 필요하다는 것을 나타내고 있다. 또한 여재순환을 시키지 않아서 여재층이 붕괴된 상태에서 내부 스크루를 회전하여 여재를 순환하였을 때 여재에서 입자들은 탈리되어 여재층이 복원되는 것을 확인하였고, 탈리된 입자성 물질은 중력 침전에 의해 서서히 가라 앉아 하단부로 이동하게 됨을 관찰할 수 있었다.

3.2. 여재순환에 따른 수질의 변화 특성

여과장치에서 여재의 순환 없이 오수를 유입하는 경우 폐색으로 인한 여재층의 유지가 어렵다는 것을 확인하고 여재의 순환을 유지하면서 오수를 유입하여 유입과 유출수의 SS, COD_{mn}, T-N 그리고 T-P 등을 측정하면서 오염물질 농도 변화를 살펴보았다.

실험기간은 총 90일 동안 진행되었으며 실험시작부터 58일 동안은 여재를 순환시키며 오수를 유입하였으며 그 이후 32일 동안은 여재를 순환시켜주지 않고 실험을 진행하였다. 스크루의 회전에 의해 여재가 여재층의 상부에서 하부로 이동되면서 한 바퀴 완전히 순환하는 시간을 여재순환주기(MCT)로 볼 때 여재순환주기는 1시간으로 설정하였으며, 먼저 여재순환 유무에 따른 SS의 실험결과를 Fig. 3에 나타내었다. 초기 약 9일 동안은 반응기가 장치되고 적응되는 기간으로 처리효율이 서서히 증가하는 양상을 나타내다가 정상상태가 된 약 13일 이후부터 유입수 및 유출수 평균 농도는 각각 25.2 mg/L 및 7.8 mg/L로 처리효율이 평균 69.05%였으며, 체류시간에 따른 최대처리효율은 96%이었다. 운전 시작 후 58일차부터 여재순환을 하지 않은 상태로 오수의 유입이 진행되었으며 약 90일 후 여재의 물리적 붕괴가 관찰되었을 뿐 아니라 유출수의 SS 농도는 약 9.2 mg/L로 유출수의 농도가 상승하며 제거효율이 약 63.5%로 여재를 순환시켰을 경우 순환시키지 않았을 때보다 처리효

Fig. 3. The removal characteristics of SS according to media circulation : (a) initial step of the operation of the unit, (b) operation of the unit with circulation of media by the screw, (c) operation of the unit without circulation of the media.

Fig. 4. The removal characteristics of COD_{mn} according to media circulation : (a) initial step of the operation of the unit, (b) operation of the unit with circulation of media by the screw, (c) operation of the unit without circulation of the media.

율이 약 52.4% 높아지는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4는 여재순환여부에 따른 COD_{mn}의 유입 및 유출수의 변화양상을 나타낸 그래프로, 여재순환을 하였을 경우의 평균 유입 COD_{mn}가 18.1 mg/L, 유출수의 농도는 5.6 mg/L로 제거율이 약 69.1%로 다소 높게 관찰되었으며, 체류시간에 따른 최대처리효율은 72%이었다. 여재순환을 하지 않은 시점인 58일 이후의 경우에는 평균 유출수의 농도가 9.1 mg/L로 제거효율이 약 50.3%로 여재를 순환시켰을 경우 순환시키지 않았을 때보다 처리효율이 약 43.1% 높아지는 것을 알 수 있었다. 제거율이 낮게 나타났다. 이는 앞선 SS의 실험과 동일한 양상을 나타내고 있다. PP 여재층에서 유기물질의 분해는 미생물이 여재에 부착 성장하여 유기물질을 분해시키기 때문인 것으로 사료된다. 접촉여재의 필터에서 미생물막에 의한 유기물질의 분해는 이전 연구에서 이미 보고된 바 있다.²¹⁾

Fig. 5. The removal characteristics of T-N according to media circulation : (a) initial step of the operation of the unit, (b) operation of the unit with circulation of media by the screw, (c) operation of the unit without circulation of the media.

Fig. 6. The removal characteristics of T-P according to media circulation : (a) initial step of the operation of the unit, (b) operation of the unit with circulation of media by the screw, (c) operation of the unit without circulation of the media.

Fig. 5에 나타난 바와 같이 T-N의 경우 여재가 순환이 되고 있는 시점에서의 유입수의 평균농도는 1.9 mg/L, 유출수의 농도 1.7 mg/L로 처리효율은 약 10.5%로 관찰되었다. 이와 반대로 여재를 순환시켜 주지 않았을 경우의 실험결과 평균 유출수의 농도는 1.8 mg/L로 제거율은 약 5.3%로 나타났다. 이는 여과기능을 하는 여과장치의 특성상 생물학적 질소제거에 필요한 혐기와 호기의 조합으로 구성된 반응기 운영조건을 갖추고 있지 않아 낮은 제거효율을 나타낸 것으로 판단되었다.²²⁾

Fig. 6은 여재순환여부에 따른 T-P의 제거양상으로 평균 유입수 및 유출수의 농도는 각각 0.2 mg/L, 0.08 mg/L로 분석되어 약 58.1%의 처리효율을 나타냈으며, 체류시간에 따른 최대처리효율은 65%이었다. 반면, 여재를 순환시켜 주지 않았을 경우의 실험결과 T-P의 평균 유출수는 0.14 mg/L이었으며 제거효율은 약 29.8%로 여재를 순환시켰을 경우

순환시키지 않았을 때보다 처리효율이 약 118.12% 높아지는 것을 알 수 있었다. T-P 또한 앞선 실험결과와 동일하게 여재순환이 없는 경우 처리효율이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 알루미늄, 철 및 칼슘과 같은 화합물질을 첨가하여 슬러지의 발생을 최소화시키면서 인의 제거효율을 높이기 위해서는 선행연구결과²³⁻²⁷⁾에 따라 응집제를 반응조에 직접 투입할 경우 보다 높은 인의 제거를 기대할 수 있을 것으로 판단되었다.

3.3. 여재 순환주기에 따른 오염물질의 제거특성

여재순환주기를 2, 8, 32 hr로 각각 변화시켜 각 순환주기에 따른 오염물질의 제거율을 비교해 보았다. 여기서 여재순환주기가 길어지는 것은 여재층에서 스크루에 의한 여재의 이송이 느리다는 것을 의미한다.

Fig. 7은 여재순환주기에 따른 SS의 변화특성을 나타낸 그림이며, 0차반응식을 이용하여 산정하였다. 약 12일간 운전한 그래프이며, 실험에서 반응조로 유입되는 SS의 초기 유입수는 약 20 mg/L이었다. 여재순환주기 별 평균 유출수 농도는 각각 12, 9 그리고 3 mg/L로 측정되었다. 또한, 고농도에 대한 처리효율을 비교하고자 6일 후에 유입수의 농도를 약 50 mg/L로 유입시켰다. 이때 유출수의 농도값은 27, 11, 2 mg/L로 나타내었다. 따라서 여재순환주기가 길어질수록 처리효율이 최대 96% 제거되었음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 여재의 순환주기가 느리게 진행될수록 여재의 공극률과 여재층의 높이에 따라, 또는 생물막 형성을 통한 미생물의 생물학적 제거에 의해 높은 처리효율을 가진다고 보고된 기존의 연구와²⁸⁾ 동일한 양상을 보인다고 할 수 있다.

Fig. 8은 CODmn의 여재순환주기변화에 따른 각각의 처리수 농도를 나타낸 것이다. 초기 유입수 농도는 약 18 mg/L이며, 여재순환주기별 처리수의 유기물 농도를 살펴본 결과 14.9, 6.3, 5 mg/L로 여재의 이송이 느리게 진행될수록 유출

Fig. 7. Variation of SS concentration by Media Circulation Time (MCT) ; legend on the graph represents experimental results, line on the graph represents theoretical values calculate Eq. (2). $R^2 = 0.80$.

Fig. 8. Variation of CODmn concentration by Media Circulation Time (MCT) ; legend on the graph represents experimental results, line on the graph represents theoretical values calculate Eq. (2). $R^2 = 0.94$.

Fig. 9. Variation of T-N concentration by Media Circulation Time (MCT) ; legend on the graph represents experimental results, line on the graph represents theoretical values calculate Eq. (2). $R^2 = 0.91$.

수의 농도가 점점 더 낮아지는 것을 확인하였다. 제거효율 또한 32 hr으로 순환하였을 경우 최대 72%로 SS에서 관찰된 결과와 동일한 양상을 나타낸다. 특히 Moore²⁹⁾의 연구에 의하면 충진 여재에 따른 공극률은 부유물질 차단 및 부착 미생물의 성장에 중요한 설계인자로 작용된다. 이에 적당한 여재의 크기로는 2~6 mm라고 알려져 있다. 본 실험에 사용된 여과장치는 2~3 mm 크기인 PP여재를 사용하였기 때문에 유기물 탈질에 효과적으로 이용된 것으로 판단된다.

Fig. 9에서는 여재순환주기에 따른 처리수의 질소 농도를 나타내었다. 반응조로 유입되는 유입농도는 평균 2.0 mg/L이며, 주기에 따른 유출수의 평균농도는 1.71 mg/L로 나타나 본 여과장치에 의한 T-N의 제거는 아주 미미한 것으로 나타났다. 이전 실험(Fig. 5)에서 지적된바와 같이 이는 체류시간이 길어짐에 따라 유기물 제거효율이 높아지고 폭기조 및 질화조 내에서 질산화반응이 활발히 일어나는 이전

Fig. 10. Variation of T-P concentration by Media Circulation Time (MCT) ; legend on the graph represents experimental results, line on the graph represents theoretical values calculate Eq. (2). $R^2 = 0.79$.

연구에서 보고된 바와는²¹⁾ 달리 본 여과장치에서 질소제거를 위한 혐기와 호기의 조합이 잘 구성되어 있지 않은 관계로 T-N 제거율이 다른 오염물질에 비해 현저히 낮은 것으로 판단된다.

Fig. 10은 여재순환주기에 따른 인의 유출농도를 나타낸 그래프이며, 0차반응식을 이용하여 산정하였다. 초기 유입 T-P의 농도는 약 0.1 mg/L로 유출수의 농도는 각각 0.08, 0.06 그리고 0.05 mg/L로 나타나 여재의 순환주기가 길어질수록 낮은 유출수의 농도를 보임을 확인하였다. 6일 후 T-P의 유입농도가 평균 0.07 mg/L로 상승함에 따라 유출수의 농도 또한 각각 0.05, 0.04 그리고 0.02 mg/L로 나타났다. 따라서 제거율 또한 앞선 실험들과 비슷한 양상으로 여재순환주기가 길어질수록 제거율이 최대 65%까지 나타난 것으로 확인하였다.

전반적으로 부유물질, 유기물, 질소 및 인 처리율에 있어 여재순환주기가 길어짐에 따라 유출농도가 낮아지고, 제거율은 높아졌다. 이는 본 연구에 적용된 공정이 부착성장 미생물을 이용한 처리공정인 것으로 사료되어지며, 이는 부착성장 미생물을 이용하여 높은 처리효율을 보인 여러 문헌과 같은 양상을 따르고 있다.^{30,31)}

4. 결론

본 연구에서는 오수처리 후단부에 장착되는 모래여과탑 또는 막분리 공정을 대체할 수 있는 여재순환형 여과장치를 이용하여 오염물질의 안정적 처리의 가능성을 살펴보고자 수행된 실험으로, 본 실험을 통하여 나타난 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 자기세정여과장치는 반응조에 물보다 비중이 작은 PP여재를 사용하여 부유여과층을 형성하도록 구성하였으며,

내부 스크루를 이용하여 반응기 상단부의 여재를 하단부로 이송하고 손실수두를 줄여주기 위해 스크러버 암을 장치하였을 때 역세척공정없이 원활하게 여과기능을 수행함을 확인하였다. 그러나 여재의 순환과 스크러버 암의 회전이 없을 경우 여재 사이의 공극에 막힘 현상이 나타나 반응기 내 폐색현상이 도래됨을 알 수 있었다.

2) 스크루 및 스크러버 암의 회전이 있을 경우에 따른 유입수 및 유출수의 SS, COD_{mn}, T-N, T-P를 측정 한 결과, SS의 최대 처리유입수 농도는 약 25.2 mg/L, 유출수의 농도는 평균 7.8 mg/L로 처리효율은 약 69.1%로 나타났다. COD_{mn}의 유입수 농도는 약 18.1 mg/L일 때 유출수는 약 5.6 mg/L로 처리효율은 평균 69.1%로 나타났고, T-N의 실험결과 유입수의 농도는 1.9 mg/L일 때, 유출수는 1.7 mg/L로 약 5.8%의 제거효율을 보였다. 그리고 T-P의 유입수 농도는 0.2 mg/L, 유출수 평균 0.08 mg/L로 약 58.1%로 제거효율이 나타났다.

3) 비교실험을 위해 여재층에서 여재의 회전없이 여과장치가 운전되었을 때 유입수 및 유출수의 SS, COD_{mn}, T-N, T-P를 실험한 결과, SS의 유입수 농도는 약 25.2 mg/L일 때 유출수의 농도는 평균 9.2 mg/L로 처리효율은 평균 63.5%로 나타났다. COD_{mn}의 유입수 농도는 약 18.1 mg/L일 때 유출수는 평균 9.1 mg/L로 처리효율은 평균 50.3%로 나타났고, T-N의 실험결과 유입수의 농도는 1.9 mg/L일 경우 유출수는 평균 1.8 mg/L로 약 5.8%의 제거효율을 보였다. 그리고 T-P의 유입수 농도는 0.2 mg/L, 유출수 평균 0.14 mg/L로 29.8%로 제거효율이 나타났다. 따라서 기존의 여과장치와 같이 여재층이 고정되어 있는 상태보다 여재층에서 여재의 순환이 일어날 때 훨씬 더 높은 제거효율을 확보할 수 있음을 알 수 있었다.

4) 각 실험항목의 최대 처리효율은 SS, COD_{mn}, 그리고 T-P순으로 96%, 72%, 65%를 보였으며, 여재를 순환시켰을 경우 순환시키지 않았을 때 보다 각각 52.38%, 43.14%, 118.12%의 처리효율이 개선되는 효과가 나타났으며, 이를 통해 여재의 순환이 제거효율 증가에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

5) 여재순환형 여과장치를 이용하였을 때 여재순환주기에 따른 유기물 및 부유물질의 제거특성을 알아보기 위해 2, 8 또는 32 hr로 변화시켜 SS, COD_{mn}, T-N, T-P의 실험을 분석한 결과, 순환주기가 길수록(여재의 이송속도가 낮을수록) 안정된 처리수질이 나타났으며, 고액분리 및 탈리가 잘 진행되어 유기물 및 부유물질의 제거에 도움이 된 것으로 판단되었다. 반면, T-N의 경우 다른 실험에 비해 낮은 제거율을 보여 추후 질소제거를 위해서는 혐기와 호기의 종합이 가능한 공정과 연계처리가 반드시 필요한 것으로 판단되었다.

본 연구결과 스크루에 의해 여재층을 구성하는 여재를 강제적으로 상부에서 하부로 순환하여 여재를 낮은속도로 이동하게 하였을 때 역세척 공정없이 안정적으로 오수처리를 할 수 있다고 판단되었다. 이러한 처리는 여재의 이동에 따

른 마찰에 의해 여재공극사이에 붙은 입자성 물질이 탈리되어 하부로 침강하여 고액분리가 원활하게 수행되는 것으로 판단하였으며, 일부 유기물질의 처리가 진행되는 것으로 보아 여재 표면에 미생물막이 형성되어 미생물에 의한 유기물질의 분해가 진행됨을 알 수 있었다. 반면, 보다 현장성 있는 연구가 되기 위해서는 응집제가 투입 되었을 때 오염물질의 거동 또는 응집체에 과다 투입에 의한 여과층의 폐색 여부 등 수반될 수 있는 문제점들을 살펴볼 수 있는 후속연구가 필요하다고 판단된다.

Acknowledgement

본 논문은 경기도 기술개발사업의 사업비지원(D141443#)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

KSEE

References

- Kim, Y. G. and Cho, I. H., "A study on the removal of nitrogen and phosphorus of municipal wastewater with biological coated media," *Korean J. Environ. Health*, **32**(1), 27~35 (2006).
- Lee, S. K., Park, J. M. Lee, S. H. and Han, J. O., "Advanced Biological Sewage Treatment using the Rotating Type of Synthetic Waste Polyethylene Porous Media," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **23**(5), 849~856(2001).
- Hyun, K. S. and Choi, J. W., "Configuration Condition and Characteristics Comparision of Filter Packed Media in Anaerobic and Aerobic Biofilm process om an Advanced Wastewater Treatment," *Water and Waste Water Treat.*, **11**(4), 61~63(2003).
- Jung, Y. J., Min, K. S., Lee, J. K. and Lim, K. H., "Evaluation of sewage treatment with surface modified waste-tire media using batch activated sludge system," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **25**(6), 682~687(2003).
- Park, K. H. and Kwon, Y. D., "A Study on the Characteristics of Precess for the Sewage Treatment in Korea," *J. Korea Soc. Environ. Anal.*, **15**(1), 9~14(2012).
- Seon, Y. H., "A study on removal of organics, nitrogen and phosphorus of domestic wastewater in pilot-scale upflow packed bed column reactor," *Korean J. Biotechnol. Bioeng.*, **22**(4), 191~196(2007).
- Suh, Y. D., "Industy-wastewater Treatment by a High-efficiency PE-Media," *J. Korea Soc. Environ. Admin.*, **18**(4), 169~178 (2012).
- Wang, J., Shi, H. and Oian, Y., "Wastewater Treatment in a Hybrid Biological Reactor (HBR): Effect of Organic Loading Rates," *Proc. Biochem.*, **36**, 297~303(2000).
- Jun, B. H., Miyanaga, K., Tanji, Y. and Unno, H., "Removal of Nitrogenous and Carbonaceous Substances by a Porous Carrier-Membrane Hybrid Process for Wastewater Treat-

- ment," *Biochem. Eng. J.*, **14**, 37~44(2003).
10. Ryu, H. D., Min, K. K., Lee, J. H., Choi, K. K., Lim, H. E., Kim, C. H. and Lee, S. I., "Development of BNR (Biological Nutrient Removal) Process Using Expanded Polystyrene (EPS) Media," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **28**(1), 1~6 (2006).
11. Kim, A. R., Kim, H. C., Seo, D. C., Park, J. H., Kim, S. H., Lee, S. T., Jeong, T. U., Choi, J. H., Kim, H., Cho, J. S. and Heo, J. S., "Selection of optimum filter media in small-scale livestock wastewater treatment apparatus by natural purification method," *Korean J. Soil Sci. Fert.*, **44**, 285~292(2011).
12. Zouboulis, A., Traskas, G. and Samaras, P., "Comparison of single and dual media filtration in a full-scale drinking water treatment plant," *Desalination*, **213**, 334~342(2007).
13. Chaudhary, D. A., Vigneswaran, S., Ngo, H. H., Shim, W. G. and Moon, H., "Granular Activated Carbon (GAC) Biofilter for Low strength wastewater treatment," *Korean Soc. Environ. Eng.*, **8**(4), 184~192(2003).
14. Pastorelli, A., Canziani, R., Pedrazzi, L. and Rozzi, A., "Phosphorus and Nitrogen Removal in Moving-Bed Sequencing Batch Biofilm Reactors," *Water Sci. Technol.*, **40**(4-5), 169~176(1999).
15. Canziani, R., Vismara, R., Basilico D. and Zinni, L., "Nitrogen Removal in Fixed-Bed Submerged Biofilters without Backwashing," *Water Sci. Technol.*, **40**(4-5), 145~152(1999).
16. Jung, M. K., Park, I. G., Park, M. S., Yune, Y. J., Hwang, H. J. and Ryu, D. H., "Primary Treatment of First Flushing and Sewage from Combined Sewer Using High Rate Up-flow Filtration System," *J. Korean Soc. Water Qual.*, 298~299(2012).
17. Park, C. G., Jo, E. Y., Kim, Y. H. and Park, S. J., "Study on a Small-scale Wastewater Treatment System using Biological Aerated Filter," *J. Fluid Machinery*, **17**(3), 41~45 (2014).
18. Koo, Y. M., Kim, J. Y., Kim, B. R. and Seo, D. G., "Removal of Suspended Solids from Stormwater Runoff Using a Fabric Filter System," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **37**(3), 165~174(2015).
19. Abdel, M. N. and Kamel, H., "Purification of Stormwater Using Sand Filter," *J. Water Resour. Protect*, **5**(11), 1007~1012(2013).
20. Ok, S. B. and Jeong, S. W., "Treatment of Dyeing Wastewater Using Ceramic Fixed Media," *J. Korea Soc. Environ. Anal.*, **5**(4), 236~241(2002).
21. Randall, C., Barnard, J. and Stensel, H., "Design and retrofit of wastewater treatment plants for biological nutrient removal," *Technomic Pub. Co.*, pp. 25~179(1992).
22. Kim, J. K., Kim, K. R., Kang, H. S., Won, I. S., Kim, K. Y. and Lee, S. I., "Nitrogen Removal Characteristics in Dyna-Flow Biofilter System Using Sewage Wastewater of Low C/N Ratio," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **34**(3), 198~194(2012).
23. Hwang, E. J. and Cheon, H. C., "High-Rate Phosphorous Removal by PAC (Poly Aluminum Chloride) Coagulation of A₂O Effluent," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **31**(9), 673~678(2009).
24. Ma, J., Li, D., Zhang, W. and Lei, C., "Simultaneous removal of phosphate and phenanthrene by alum aided with low amounts of surfactant modified bentonite," *J. Chem.*, **85** (2), 288~293(2010).
25. Georgantas, D. A. and Grigoropoulou, H. P., "Orthophosphate and metaphosphate ion removal from aqueous solution using alum and aluminum hydroxide," *J. Colloid Interface Sci.*, **315** (1), 70~79(2007).
26. Yan, L., Xu, Y., Yu, H., Xin, X., Wei, Q. and Du, B., "Adsorption of phosphate from aqueous solution by hydroxyaluminum, hydroxyiron and hydroxyironaluminum pillared bentonites," *J. Hazard. Mater.*, **179**(1/3), 244~250(2010).
27. Kim, J. S., An, M. K., Kim, K. Y., Ryu, H. D. and Lee, S. I., "Effect of Alum Addition on the Biological Treatment Performance of Attached Growth Process," *J. Water Sci. Technol.*, **19**(1), 27~34(2011).
28. Ding, Y. W., Wang, L., Wang, B. Z. and Wang, A., "Removal of Nitrogen and Phosphorus in a Combined A²/O-BAF System with a Short Aerobic SRT," *J. Environ. Sci.*, **18**(6), 1082~1087(2006).
29. Moore, R., Quarmby, J. and Stephenson, T., "The Effect of Media Size on the Performance of Biological Aerated Filters," *Water Res.*, **35**(10), 2514~2522(2001).
30. U.S. EPA, Nutrient control design manual state of technology, review report(2009).
31. Nurdan, B. and Ayse, F., "Concentrated Wastewater Treatment Studies Using an Anaerobic Hybrid Reactor," *Proc. Biochem.*, **38**, 771~775(2002).