

다공성 미디어를 충전한 혐기-호기 반응조를 이용한 하수고도처리에 관한 연구

Advanced Wastewater Treatment Using Anoxic-Aerobic Reactor Filled with Porous Media

김 동 하*

Dong-Ha Kim*

국민대학교 공과대학 건설시스템공학부

(2006년 11월 3일 논문 접수; 2007년 1월 10일 최종 수정논문 채택)

Abstract

A biological anoxic-aerobic reactor filled with porous media was operated in lab scale for the advanced wastewater treatment. The experiments were conducted for 6 months with three HRTs (4, 6, 8hr) and temperature of 23~25°C. Some other experimental conditions were as follows; nitrification reactor (MLSS 4,500mg/L, DO 3.3mg/L, 23~28°C), denitrification reactor(MLSS 8,000mg/L, ORP -100mV, Temp. 19~23°C). Average removal efficiencies of SS, BOD₅, COD_{Cr}, T-N, and T-P were 97.8%, 95.5%, 94.5%, 80.2%, and 60.6%, respectively. The reactor filled with porosity media showed stable removal capacity for organics and nutrients. Fast and complete nitrification and denitrification were accomplished. Maintaining high MLSS with porous media in the nitrification and denitrification reactor appears to enhance the nitrogen removal process. For the higher T-P removal, some coagulant addition process will be needed.

Key words: porous media, nitrification, denitrification, advanced wastewater treatment

주제어: 다공성 미디어, 질산화, 탈질, 하수고도처리

1. 서 론

우리나라에 하수처리 보급률이 최근 10년 동안 급속도로 증가하였으며 2002년부터 질소·인의 규제가 시작되었고, 2003년 1월부터 산업체 폐수의 경우에도 질소·인이 규제 대상이 되었다. 2008년 1월부터

는 질소·인의 방류기준이 각각 10mg/L, 2mg/L로 크게 강화될 예정이다.

기존의 활성슬러지공법은 여러 가지 장점에도 불구하고 고도처리 효율이 30% 정도로 크게 미흡할 뿐만 아니라, SS의 완벽한 처리가 어렵기 때문에 특히 bulking 문제 등이 발생할 경우 처리수질이 크게 나빠지는 단점을 지니고 있다(Painter, 1970; Grady,

*Corresponding author Tel: +82-2-910-4647, FAX: +82-2-910-4939, E-mail: kimdh@kookmin.ac.kr (Kim, D.H.)

1980). 이러한 고·액분리의 단점을 해결하기 위하여 최근에는 분리막을 복합시킨 생물·분리막 복합형 처리공법(MBR)이 많이 연구되고 있다. MBR 공법은 처리수의 수질이 획기적으로 향상되는 장점을 지니고 는 있으나, 분리막의 비용이 여전히 고가인 점, 막 Fouling 현상에 의한 장기간 안정적인 운전이 어려운 점 등의 문제점을 지니고 있다(Shin, 1991; Kim, 2002).

본 연구의 반응기에서는 기존의 하수고도처리 공법의 개선방안으로 고효율 처리 및 경제성의 보완을 목적으로 다공성 담체를 사용하였다. 다공성 담체는 고농도의 미생물 유지가 가능하고, 생물막적 처리의 에도 담체에 의한 여과 작용 등이 복합적으로 이루어 지기 때문에 침전지 없이도 우수한 처리 수질을 확보 할 수 있는 장점을 지니고 있다(Yoneyama, 1998; Chen, 2000). 이는 기존의 공정에서 호기조의 과대환 소요부지, 폭기에 따른 동력비와 비효율적인 처리를 고농도의 MLSS 유지와 고정된 다공성 담체에 의한 여과작용으로 SS의 유출을 최소화하여 처리의 효율을 높이고 부지 소요면적을 줄일 수 있으며, 질산화조의 간헐폭기 및 연속폭기 운전을 통하여 효과적인 질소화합물 처리효율의 증대를 가져올 수 있을 것으로 기대된다(Willislage, 1992; Rittmann, 1994).

본 연구는 기존 하수고도처리 공정에서 처리 및 경제성의 비효율적인 문제점에 대한 개선을 목적으로 수행되어졌으며, 고정된 다공성 담체를 사용하여 질소 처리의 효율 증대와 경제적인 부담을 감소시킬 수

있는 생물막(Biofilm)법의 적용으로 실험실 규모의 반응조를 이용한 연구이다.

본 실험에서는 질산화조·탈질조 내에 다공성 담체를 충전하여 상향류의 처리 방법으로 질산화·탈질 반응을 유도하였으며, 고농도 질산화 미생물의 고정화와 다공성 담체 내부 및 담체 사이의 공기를 이용하여 간헐적인 폭기 및 연속폭기에서 반응의 최적 인자 도출과 처리 성능의 최적화 연구를 수행하였다.

2. 실험방법

Fig. 1은 본 연구에 사용된 반응기의 공정도로써 공정 구성은 원수탱크, 탈질조, 질산화조, 침전조로 구성되어 있다. 본 실험장치는 Lab Scale로 제작운전하였으며, 재질은 5mm의 투명 아크릴로 반응기 용적은 탈질조 1.57L, 질산화조 1.57L로 하였다.

원수탱크는 총 부피가 40L로 대상시료에 대하여 펌프(GQ 400)를 이용하여 일정량(Q)을 본 장치로 공급하고 단계별 반응조에서는 자연유하 되도록 유도하였다. 탈질조는 상향류식 반응조로써 탈질반응 후 상징액만을 질산화조로 이송되게 하여 슬러지의 유출을 막아 MLSS 농도를 유지 시켰으며, 5rpm의 교반으로 유체의 채널링 현상을 방지하였다.

질산화조는 내통을 설치하여 상부로 유입된 유입수가 하부로부터 반응부분으로 향하는 상향류 방식을 선택하고 내부에 다공성 담체를 충전하여 본 실험에서 중점이 되는 사항인 다공성 담체에 의한 질산화

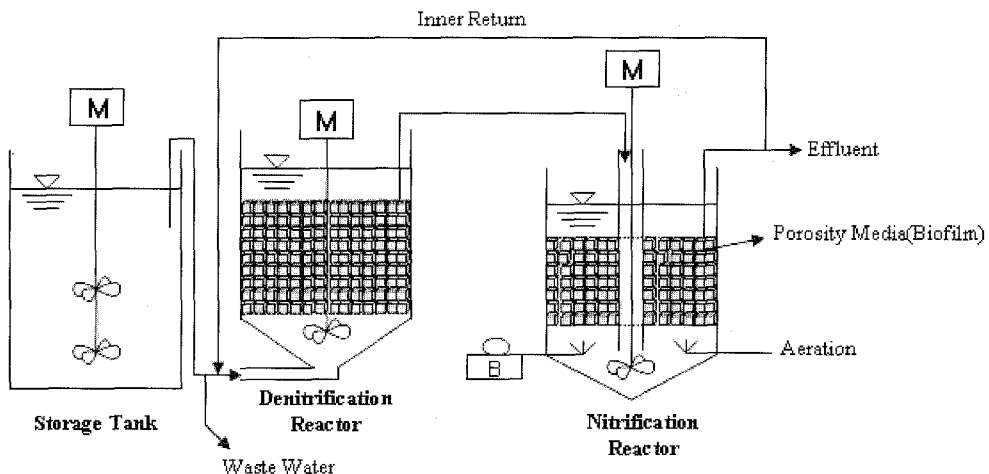


Fig. 1. Schematic diagram of anoxic-aerobic filled(AAF) system.

반응효율의 증대와 경제성의 향상을 관찰하였다. 내부 유입수에 대하여 반응기 하부에 일정량의 교반을 가해 혼합분산처리 되도록 하였다.

충진된 다공성 담체는 질산화조 내부에 Pore size 2.5mm의 다공판을 설치하여 고정하였다. 반응기의 내부 온도(23~28°C) 유지를 위하여 40~50°C의 물을 순환시키고 외부를 단열재로 감싸 원활한 반응을 유도하였다.

본 실험은 다공성 담체를 이용한 하수고도처리 반응기의 개발에 관한 연구로서 연구에 사용한 다공성 담체는 지의 연구에 사용된 다공성 여재(다공성 폴리우레탄)를 사용하였으며, 담체의 제원으로 비중은 $0.035 \pm 0.005(g/cm^3)$ 이며, 공극율 95% 이상이었다. 실험에서의 담체 크기는 Cube 5mm로 정하여 사용하였으며, 겉보기 충전율을 80% 정도로 질산화 반응조 내부에 충전하였다.

연속운전 실험의 공정은 탈질조와 조합을 이루어 구성하였다. 각 공정별 처리 원리는 탈질조에서의 탈질 반응과 함께 유기물 제거를 이루고, 호기조에서의 질산화 반응에 의하여 유입되는 원수 속에 포함된 암모니아성 질소가 질산성 질소로 산화되는 질소제거 공정으로 최종 침전조에서의 고·액분리에 의하여 처리수를 획득하도록 유도하였다. 이러한 연속운전 공정의 구성으로 Table 1과 같은 조건으로 하수성상의 유입원수를 처리하여 처리수의 변화를 관찰하였으며 본 연구의 목적인 다공성 담체를 충전한 하수 고도처리 반응기의 처리효율 및 경제성 향상에 대하여 고찰하였다.

연속운전 실험에서는 회분실험 결과를 토대로 하여 탈질조와 질산화조의 조합으로 공정을 운전하였다. 각 반응조의 초기 MLSS는 전 탈질조의 경우 8,000mg/L, 질산화조는 4,500mg/L로 안정화 시켰으

며, 반응기의 내부 온도는 원활한 반응을 유도하기 위하여 23~28°C를 유지하였고, 내부반송은 일정량(Q)으로 하였다. 이때, 질산화조의 DO 농도는 최대 3.0~3.8mg/L로 유지시켰으며, 전 탈질조의 ORP는 -100mV 이하가 되도록 하였다.

연속운전 조건은 다음과 같이 하였다. 먼저 하수고도처리에서 과다하게 소비되는 폭기 동력비의 감소를 위하여 질산화조에서 간헐폭기로 운전을 하였으며, 최근의 하수고도처리에서의 최소 HRT인 4시간을 기준으로 하여 점차 감소시켜 실험하였다. 이때, 질산화조에는 다공성 담체를 충전하여 생물막을 형성함으로써 효율의 극대화를 가져올 수 있도록 하였다(Run 1, 2).

둘째로 첫 번째 실험에서 처리 효율이 급격히 감소하는 HRT를 시점으로 질산화조에 연속폭기 운전하며 HRT의 변화를 연계하여 처리효율의 비교를 하였다(Run 3). 마지막으로 두 가지의 연속운전 중 최적의 처리 효율을 나타내는 HRT를 선정하고 전 탈질조 및 질산화조에 다공성 담체를 충전한 후 하수 성상의 시료를 사용하여 최종적으로 각 항목별 처리 특성을 고찰하였다(Run 4).

실험에 사용된 모델 폐수의 특성은 Table 2와 같으

Table 2. Characteristics of artificial wastewater

| Item | Range(mg/L) | Average(mg/L) |
|--------------------|-------------|---------------|
| BOD ₅ | 102~134 | 117 |
| COD _{Cr} | 111.0~352.0 | 240 |
| T-N | 16.2~38.9 | 22.2 |
| NH ₃ -N | 11.1~27.5 | 20.0 |
| T-P | 4.2~5.5 | 4.9 |
| PO ₄ -P | 3.9~5.5 | 4.9 |
| pH | 6.8~7.5 | 7.2 |
| SS | 100~128 | 114 |

Table 1. Experimental condition

| Run No | Aeration at N* | HRT(N/DN* ; hr) | Media compaction | Temp(°C) |
|--------|-------------------------------|-----------------|--------------------------|----------|
| Run 1 | Intermittent (1hr on/1hr off) | 8(4/4) | Aerobic tank only | 20~25 |
| Run 2 | | 6(3/3) | | 20~25 |
| Run 3 | Continuous | 6(3/3) | Aerobic and anoxic tanks | 20~25 |
| Run 4 | | 4(2/2) | | 20~25 |
| Run 5 | | 6(3/3) | | 20~25 |

N*: Nitrification

DN*: Denitrification

며, 모든 분석은 Standard Methods(1998)에 준하여 실험하였다.

3. 실험결과

3.1. 질산화조의 간헐폭기 운전결과

본 실험(Run 1)에서는 각 반응조(질산화조/탈질조)의 HRT를 4시간으로 운전하며 유기물과 질소화합물의 제거를 유도한 결과는 다음과 같다. 유기물의 경우에는 유입수의 COD_{Cr} 농도 120~148mg/L에서 유출수 농도 12~20mg/L로 평균처리율 84.6%를 나타내었다. 이는 전 탈질조에서 탈질에 필요한 유기물의 소비로 인하여 높은 처리율을 나타낸 것으로 판단된다.

질소화합물의 제거특성은 초기 유입수의 T-N 농도 22.6~32.7mg/L에서 유출수 농도 4.8~9.6mg/L로 평균처리율 77.8%를 나타내었다. 이는 원활한 질산화 및 탈질 반응으로 인하여 안정적인 질소화합물 제거를 이룰 수 있었다고 사료된다(Fig. 2).

Run 2 실험에서는 각 반응조의 반응시간을 감소시키고자 HRT를 각각 3시간으로 설정하여 유기물과 질소화합물의 제거를 유도하였다. 그 결과, 유기물의 경우에는 유입수의 COD_{Cr} 농도 104~128mg/L에서 유출수 농도 16~28mg/L로 평균처리율 81.2%를 나타내었다.

질소화합물의 제거특성은 초기 유입수의 T-N 농도 16.5~27.1mg/L에서 유출수 농도 11.2~18.7mg/L로 평균처리율 39.9%를 나타내었다(Fig. 4). 이는 HRT가 단축되어 유기물의 처리에서는 높은 제거율을 나타내었으나 질산화조에 다량의 유기물이 유입되어 질산화 반응의 억제와 더불어 탈질 반응이 영향을 받아 질소화합물의 제거율이 급격히 감소되었다고 판단된다.

3.2. 질산화조의 연속폭기 운전결과

본 실험에서는 질산화조의 간헐폭기 운전에서 처리 효율이 급격하게 감소된 HRT 6시간에서부터 연속폭기로 전환 후 연계하여 반응시간의 단축과 함께 유기물 및 질소화합물의 처리 효율을 비교하였다(Run 3).

본 실험에서는 각 반응조의 HRT를 3시간으로 운

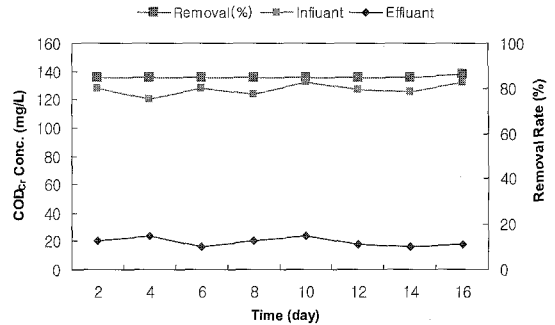


Fig. 2. Organic materials' conc. change with time at Run 1.

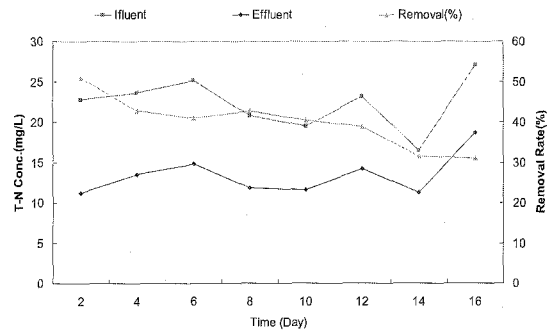


Fig. 3. T-N conc. change with time at Run 2.

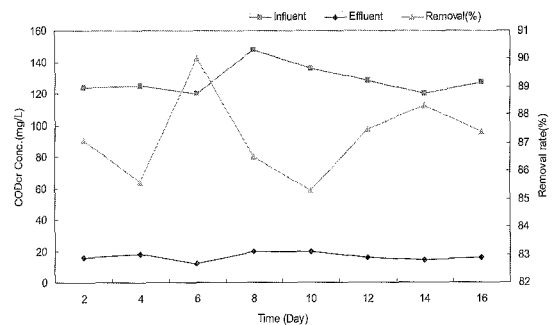


Fig. 4. Organic materials' conc. change with time at Run 3.

전하여 유기물과 질소화합물의 제거를 유도하였다. 그 결과 유기물의 경우에는 유입수의 COD_{Cr} 농도 120~148mg/L에서 유출수 농도 14~20mg/L로 평균처리율은 87.2%를 나타내었다. 질소화합물의 제거특성은 Fig. 5와 같이 초기 유입수의 T-N 농도 18.5~29.2mg/L에서 유출수 농도 4.6~6.6mg/L로 평균처리율 77.1%를 나타내었다.

이 HRT가 단축되었음에도 불구하고 연속폭기

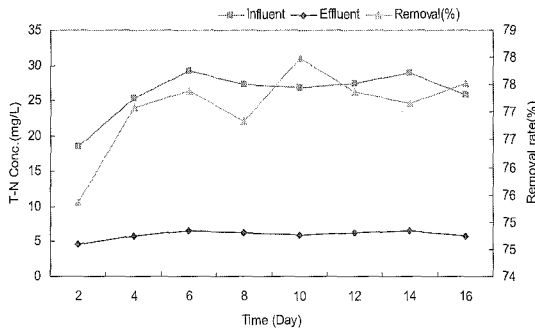


Fig. 5. T-N conc. change with time at Run 3.

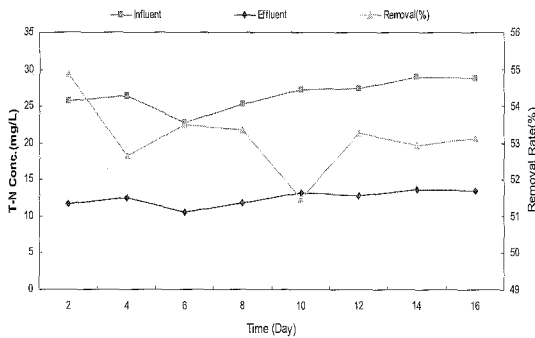


Fig. 6. T-N conc. change with time at Run 4.

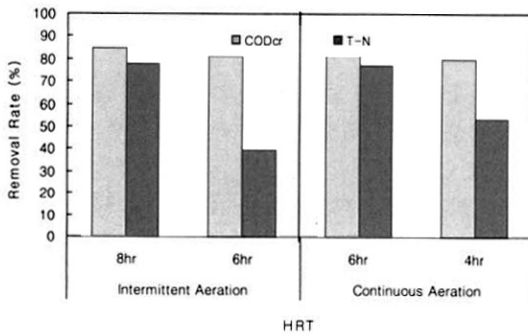


Fig. 7. COD and T-N removal rates for intermittent and continuous aeration.

에 의한 원활한 질산화 반응이 유도되어 전 탈질조에서 탈질 반응 또한 적절하게 이루어져 유물기의 처리에서도 높은 제거율을 나타내었다고 판단된다.

Run 3에서의 유기물 및 질소화합물의 원활한 제거 특성을 보여 각 반응조의 HRT를 2시간으로 운전하며 반응시간의 감소시키고자 하였다(Run 4).

유기물의 경우에는 유입수 COD_{Cr} 농도 125~136

mg/L에서 유출수 농도 22~32mg/L로 평균처리율 79.8%를 보였다. 질소화합물의 제거특성을 보면, Fig. 6과 같이 유입수의 T-N 농도 22.8~28.9mg/L에서 유출수 농도 10.6~13.6mg/L로 평균처리율 53.1%를 나타내었다. 이는 질산화조에서 연속폭기로 운전을 하였지만 질산화 반응시간의 감소로 인하여 충분한 반응이 이루어지지 않아 질소화합물의 제거가 급격히 감소되었다고 판단되며, 유기물의 경우 또한 감소된 처리 효율을 나타내고 있다.

3.3. 질산화조의 간헐 및 연속폭기 운전결과 비교

3.1과 3.2의 결과 비교로 연속운전을 위하여 구성된 반응기 중 질산화조에 다공성 담체를 충전하고 간헐 및 연속폭기 운전에서 HRT 변화에 따른 결과를 있었다. 질산화조의 간헐폭기 운전의 경우, HRT 8시간(탈질 4hr/질산화 4hr)에서 유기물 84.6%, T-N 77.8%의 제거율을 나타냈으며, HRT 6시간(탈질 3hr/질산화 3hr)에서는 유기물 81.1%, T-N 39.9%로 제거되었다.

질산화조의 연속폭기 운전의 경우, HRT 6시간에서 유기물 87.2%, T-N 77.1%의 제거율이 나타났으며, HRT 4시간(탈질조 2hr, 질산화조 2hr)에서는 유기물 79.8%, T-N 53.2%가 제거되었다. Fig. 7은 각 조건의 HRT 변화에 따른 운전 결과를 비교하여 나타낸 것이다.

Fig. 8은 SS의 제거특성을 보여주는 것으로써 유입수의 SS 성분은 Starch Soluble을 사용하여 100~128 mg/L로 조절하였으며, 유출수의 SS농도는 0~5mg/L로 평균처리율 97.8%를 나타내어 높은 처리특성을 보였다. 이는 다공성 담체를 충전한 반응기에서 입자성 물질이 담체에 의한 여과 작용으로 SS 제거효과가 높게 나타난 것이라고 판단된다.

Fig. 9는 질소화합물에 대한 제거특성을 나타내고 있으며, 유입수 T-N의 농도는 20.8~28.8mg/L이었으며, NH₃-N의 경우는 19.7~27.9mg/L이고, 각각의 평균 농도는 24.7mg/L, 23.8mg/L이었다. 유출수의 T-N 및 NH₃-N의 평균 농도는 4.9mg/L, 0.96mg/L로서 각각 80.2%, 96%의 평균 처리효율을 나타내었다. 이는 적절한 HRT와 함께 다공성 담체의 충전에 의하여 형성된 생물막의 고농도 미생물로 질소화합물의 질산화 및 탈질 효율이 좋게 나타난 결과라 판단

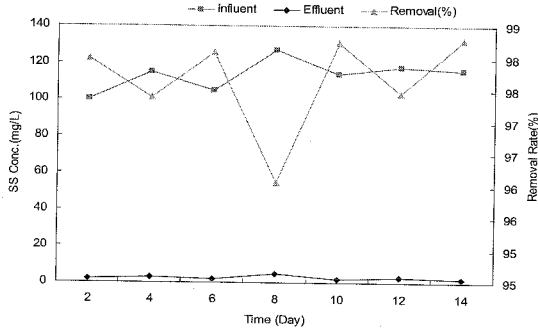


Fig. 8. SS conc. change with time at Run 3.

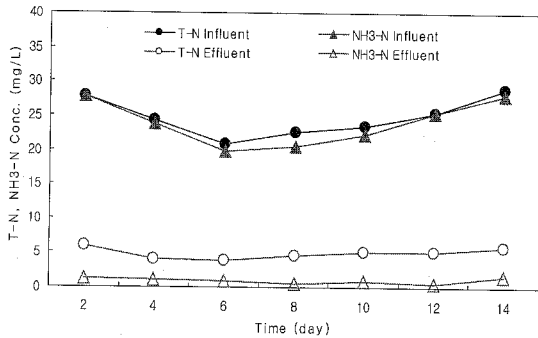


Fig. 9. Nitrogen Compounds conc. change with time.

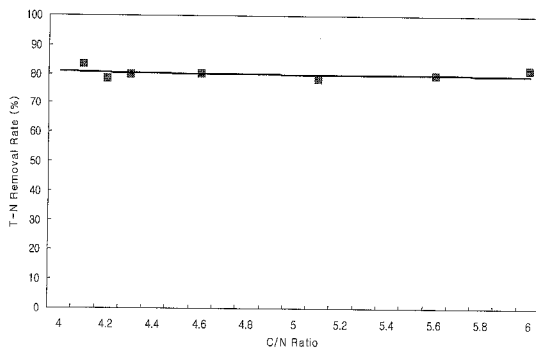


Fig. 10. Effect of influent C/N ratio on T-N removal.

된다.

Fig. 10은 유입수의 C/N(BOD₅/T-N)비에 따른 T-N의 제거효율의 변화를 나타낸 것이다. 유입수 C/N비가 4~6의 범위에서 T-N의 제거율은 큰 차이를 보이지 않고 있는데, 이는 다공성 담체가 충전된 본 반응기에서 높은 MLSS를 유지하며 질산화 및 탈질 반응이 안정적으로 이루어지기 때문이라고 사료된다.

유입수 T-P의 평균농도는 4.9mg/L이며, 유출수의 평균농도는 2.0mg/L로 평균처리율 60.6%를 나타내었다. 이는 반응기 내부에 충전된 다공성 담체에 의하여 인을 다량 함유한 슬러지의 유출이 감소되어 나타난 것으로 판단된다. 본 실험이 인 화합물의 제거에는 큰 비중을 두지 않은 점을 감안하였을 때, 향후 지속적인 연구로 인화합물 또한 효과적인 처리를 나타낼 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 다공성 담체(Porosity Media)를 이용한 하수고도처리 반응기를 개발하며, 그 처리특성을 파악하기 위하여 다공성 담체를 사용하였을 경우의 특성과 공정의 HRT 변화에 따른 유기물, 질소화합물의 제거특성을 검토하였으며, 최종적으로 최적의 HRT를 선정 후 고형물, 유기물, 질소화합물, 인화합물의 제거특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 질산화조의 간헐폭기 운전결과, Run I의 경우에는 유기물 평균처리율 84.6%, 질소화합물 평균처리율 77.8%로 비교적 안정적인 처리율을 나타냈으나, Run II의 경우, 유기물 81.2%, 질소화합물 39.9%로 질소화합물의 제거율이 급격하게 감소되었다. 이는 질산화를 이루기 위한 반응시간이 감소되었기 때문이라고 판단된다.

2. 질산화조의 연속폭기 운전결과, Run III에서는 유기물 평균처리율 87.2%, 질소화합물 평균처리율 77.1%로 안정적이었으며, Run IV의 경우에는 유기물 79.8%, 질소화합물 53.1%로 질소화합물의 제거율이 급격하게 낮아져, 최적의 운전 HRT를 질산화조의 연속폭기 시 HRT 6시간으로 정하였다.

3. 하수 성상의 시료를 조제하여 질산화조의 연속폭기에서 HRT 6시간으로 운전하며 항목별 처리특성을 고찰한 결과, SS 97.8%, BOD₅ 95.5%, COD_{Cr} 94.5%, T-N 80.2%, T-P 60.6%의 평균처리효율을 얻었다. 이와 같은 결과는 하수고도처리 반응기로서 다공성 담체를 반응기에 충전하여 고농도 MLSS를 유지시켜 얻을 수 있었다고 판단된다.

본 연구는 다공성 담체를 이용하여 하수고도처리 반응기의 개발에 관한 연구로써 소규모 하수처리에 적합한 저비용·고효율의 공정으로 기대할 수 있으며, 향후 잉여 슬러지의 처리 및 기타 조작 인자에 대한 연구와 더불어 실증 플랜트의 적용성은 지속적인 연구로 입증해야 할 것이다.

참고문헌

1. Chen, J.J., et al., "Full scale case studies of a simplified aerated filter(BAF) for organics and nitrogen removal", *Wat. Sci. Tech.*, **41**(4-5), pp. 1-4, 2000.
2. Dong-ha Kim, "Advanced wastewater treatment using a high MLSS membrane bioreactor with intermittent aeration", *Advances in Asian Environ. Eng.*, **4**(2), pp. 25-32, 2002.
3. Shin, et al., "Enhanced nutrient removal by porous biomass carrier sequencing batch reactor", *Wat. Sci. Tech.*, **23**, pp. 719-726, 1991.
4. Yoneyama, Y., et al., "Development of reject water treatment system from centralized sludge treatment process (return to a wastewater treatment plant in the proximity)", *Environ. Eng. Res., Japan*, **35**, pp. 339-349, 1998.
5. APHA, AWWA, WEA "Standard Method for The Examination of Water and Wastewater", 20th, 1998.
6. Willis-Lage, C.L., et al., "Biological nutrient removal using a low strength waste", WEF 65th Annual conference & exposition proceeding, New Orleans, Sep. 20-24, pp. 123-124, 1992.
7. Rittmann B.E., Regan J.M. and Stahl D.A., "Nitrification as a Source of Soluble Organic Substrate in Biological Treatment", *Water Sci. Tech.*, **30**(6), pp. 1-8, 1994
8. Painter, H.A., "A Review of Literature on Inorganic nitrogen Metabolism in Microorganism", *Water Res.*, **4**, pp. 393-450, 1970.
9. C.P. Leslie Grady, Jr., Henry C. Lim, "Biological Wastewater Treatment", Marcel Dekker, Inc., pp. 787-831, 1980.
10. Paker, D.S., et. al., "Process Design Manual for Nitrogen Control", pp. 50-79, U.S. EPA. Technology Transfer, 1975.