

## 자철광 분말을 이용한 하수처리시스템의 질소, 인 제거효율에 관한 연구

조은영\* · 박승민\* · 여인설\* · 문정식\*\* · 박주영\*\* · 김종철\*\* · 김양섭\*\* · 박찬규\*†

### Study on the Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus in Wastewater Treatment System Using Magnetite Powder

Eun-young Jo\*, Seung-Min Park\*, In-seol Yeo\*, Joeng-sik Moon\*\*, Ju-young Park\*\*,  
Jong-cheol Kim\*\*, Yang-seob Kim\*\*, Chan-gyu Park\*†

Key Words : Wastewater treatment(하수처리), Nitrogen removal(질소 제거), Phosphorus removal(인 제거), Magnetite(자철광)

#### ABSTRACT

As water quality regulations have tightened, many studies to improve wastewater treatment efficiency have been performed. In this study, magnetite powder was used to maintain a high concentration of MLSS in lab-scale wastewater treatment system. After magnetite powder injection, MLSS concentration was above 8,000 mg/L and it was 3.2 times higher than control group(2,500 mg/L). In addition, nitrogen removal efficiency and phosphorus removal efficiency comparing with the control group was increased 20.5% and 11%, respectively.

#### 1. 서 론

최근 인구집중화와 도시화에 따른 물사용량이 증가하고 있으며, 수자원의 고갈로 하수 처리수의 재이용 사례가 증가하고 있는 추세이다. 또한, 2005년부터 시작된 노후 하수관거 교체 및 분류식화 사업으로 하수도 보급률이 91.6%로 증가하였으나, 고도처리 인구 보급률은 59.9%로 다소 낮은 현황이다. 이에 고농도 하수처리를 위한 신규 하수종말처리장의 건설 및 기존 활성슬러지 공법의 고도처리 개선이 필요하다.<sup>(1)</sup>

국내의 기존 하수 처리장은 질소와 인을 동시에 처리하는 표준 활성슬러지 공법이나 변법이 주종을 이루고 있으며, 이들의 영양염류 처리 효율은 불안정적인 것으로 알려져 있다. 이러한 영양염류인 질소와 인이 적절하게 처리되지 않은 상태에서 유출하는 경우, 호소나 댐과 같은 곳에서 부영양화가 일어날 수 있다. 따라서 방류수 수질기준이 점차 강화됨에 따라 고도처리공법의 도입이 필요한 실정이다. 현재 질소와

인을 동시에 처리하는 공법으로는 A2/O 공정, UCT 공정, VIP 공정, 5-stage Bardenpho 공정 등이 있다.

하지만 국내의 하수관거의 특성상 대부분이 합류식으로 되어 있어 C/N비가 낮고 유입부하의 변동이 심한 문제가 있다. 따라서 겨울철 낮은 온도에서 안정적인 질소 처리가 어렵기 때문에 국내 실정에 맞지 않아 처리효율이 낮은 문제점이 있다.<sup>(2-7)</sup>

현재 생물학적 질소처리 방법은 두 가지 주요한 연속적인 공정에 의해서 이루어지는데 이는 질산화와 탈질화이다. 질산화는 암모니아와 유기질소를 일정한 조건에서 질산성 질소로 변환시킨다. 질산화를 거친 질산성 질소가 환원되어 질소가스가 되어 대기중으로 배출되는 과정을 탈질화라고 한다. 이러한 연속적인 과정을 거쳐 질소화합물을 무해한 화합물로 변환시켜 처리한다. 기존 하수처리장은 부유성 미생물을 이용한 공법을 사용하고 있는데 이러한 공법에서 효율적인 질소처리를 위해서는 온도, 수리학적체류시간 및 충격

\* 한국산업기술시험원(Korea Testing Laboratory)

\*\* (주)우리엔지니어링(Woori Engineering Co., Ltd.)

† 교신저자, E-mail : parkcg@ktl.re.kr

부하를 고려해야 한다. 또한 질소제거에서 중요한 단계인 질산화 작용을 하는 질산화 미생물의 경우에는 단위 암모니아성 질소 소비 당 세포 합성량이 매우 낮아 미생물 성장에 오랜 시간이 걸리기 때문에 미생물의 손실을 막는 것이 중요하다. 인 제거의 경우에도 PAOs(Phosphate accumulating organism)와 같은 미생물의 활성도가 중요한 인자로 작용하기 때문에 미생물의 손실을 방지하고 최적 운전조건을 유지하여야 한다.<sup>(8)</sup>

하수처리장 생물반응조의 MLSS를 높이기 위한 대표적인 방법으로 멤브레인을 이용한 MBR 공정이 있다. MBR 공정은 막에 의한 고액분리와 생물학적 처리의 결합 공정으로 기존 고도처리 공정의 2차 침전 및 여과 공정이 필요 없어 기존 하수종말처리장의 고도처리 전환 및 중수처리공정에 적용이 확대되고 있다. 또한 고농도 MLSS 유지 및 짧은 수리학적 체류시간으로 인한 작은 부지면적 및 높은 SS 제거율로 엄격한 재이용수 수질 기준을 충족시킬 수 있을 뿐만 아니라 낮은 F/M비와 긴 슬러지 체류시간으로 인하여 기존 활성슬러지법에 비해 슬러지 발생량이 적은 장점이 있다.<sup>(9)</sup> 그러나 막 오염을 방지하기 위한 공기세정 및 화학세정에 의해 고농도 DO가 포함된 내부반송수로 인한 인 방출 저해 및 미생물 활성 저하 등의 문제점이 있으며, 잦은 회복세정과 분리막 교체로 인한 유지관리비가 상승한다는 단점을 가진다.<sup>(10,11)</sup>

자철광 분말을 이용한 하·폐수처리공법은 기존 생물학적 처리공법의 생물반응조 내에 생물학적 floc의 동종핵으로 작용하는 자철광 분말을 투입하여 floc의 비중을 높여 침전효율을 증가시키는 방법이다. 자철광 분말을 생물반응조에 투입하였을 경우, 분말 자체의 자성을 통해 미생물 floc의 형성이 촉진되며, 비중 5.2 정도의 floc을 생성시켜 이차침전지에서의 침전효과를 증대시킨다. 따라서 고농도 MLSS에서 발생하는 핀플러이나 슬러지 벌킹 등의 현상 없이 높은 고액분리 효과를 얻을 수 있다. 따라서 생물반응조 운전 MLSS 농도를 8,000 mg/L 이상의 고농도로 유지할 수 있어 유입수질 부하 대처에 용이하며, 공법개량 및 처리시설 용량 증가 없이도 강화된 방류수질을 준수할 수 있다.

본 연구에서는 자철광 분말을 이용한 하수처리공정의 생물반응조의 MLSS 농도변화를 관찰하고 이를 통한 하수처리 효율 및 질소, 인 제거효율을 확인하고자 한다.

## 2. 연구재료 및 방법

### 2.1 연구 재료

자철광 분말(Magnetite)은 자철광 분말을 뜻하며, 주성분은  $Fe_3O_4$ 가 전체의 약 60 ~ 100%를 차지한다. 입자의 사이즈는 사용용도 및 생산과정에 따라 다양하며, 본 실험에서는 70 ~ 100  $\mu m$  사이즈의 흑색 자철광 분말을 사용하였다. 연



Fig. 1 Magnetite powder

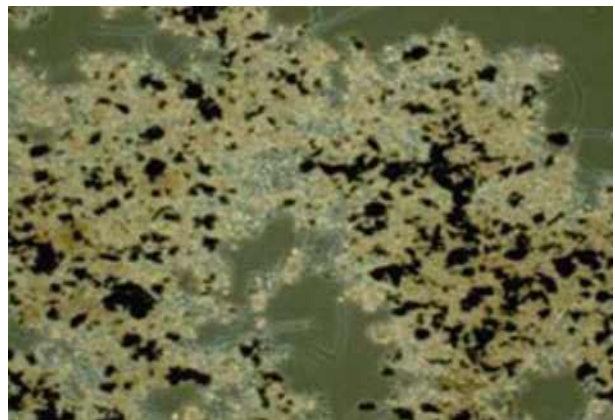


Fig. 2 Flocs formed after magnetite powder injection

구에 사용한 하수는 서울시내 K 하수처리장의 일차침전지 월류수를 이용하였으며, 저류조에 저장 후 완전 교반을 실시하여 생물반응조 유입수로 사용하였다.

### 2.2 분석

자철광 분말을 이용한 하수처리 시스템의 처리 효율을 평가하기 위해 MLSS농도 및 BOD, TN, TP 농도를 분석하였다. 유입수 및 유출수의 성상 분석은 수질오염 공정시험방법에 준하여 실시하였으며, HACH DR 5000을 이용하여 분석하였다.

### 2.3 연구 방법

자철광 분말을 이용한 하수처리 시스템의 lab-scale 실험장치는 혐기조, 무산소조, 호기조로 이루어진 생물 반응조와 침전조로 설계하였다.

생물반응조는 자철광 분말을 투입하는 실험군과 자철광 분말을 투입하지 않는 대조군으로 하여 총 2 set를 제작하였으며, 반응조 재질은 아크릴로 제작 하였다. 혐기조와 무산

Table 1. Operating conditions

		Magnetite injection	Control
HRT (hr)	Anaerobic	1.4	1.4
	Anoxic	2.7	2.7
	Aeration	3.9	3.9
	Total	8.0	8.0
	Sedimentation	2.0	2.0
MLSS (mg/L)	1st term	8,000±200	2,500±200
	2nd term	6,000±200	



Fig. 3 MLSS concentration of experimental and control group

소조에는 교반속도 조절이 가능한 교반기를 설치하였으며, 호기조에는 산기관과 실험용 공기주입장치를 이용하여 공기를 공급하였다. 침전조에는 스크래퍼를 설치하여 원활한 외부반송이 이루어지도록 설계, 제작하였다.

실험실 규모 실험장치의 일 처리용량은 40.5 L/day로 설계하였으며, 전체 반응조 용량은 13.5 L로 제작하였다. 장치 운전조건을 Table 1에 제시하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 MLSS 농도 변화

적정 MLSS 농도를 도출하기 위하여 8,000±200 mg/L, 6,000±200 mg/L의 두가지 조건으로 실험을 진행하였다. 운전초반 MLSS 농도는 8,000±200 mg/L로 유지하였으며, 6,000±200 mg/L로 낮추어 유기물 제거효율의 변화를 관찰하였다. 이때 대조군의 MLSS 농도는 2,500±200 mg/L로 유지하였다. 반응조 내 MLSS 농도를 8,000 mg/L, 6,000 mg/L로 일정하게 유지하기 위하여 슬러지 폐기량에 따라 자철광 분말을 지속적으로 투입하였다(Fig. 3).



(a)



(b)

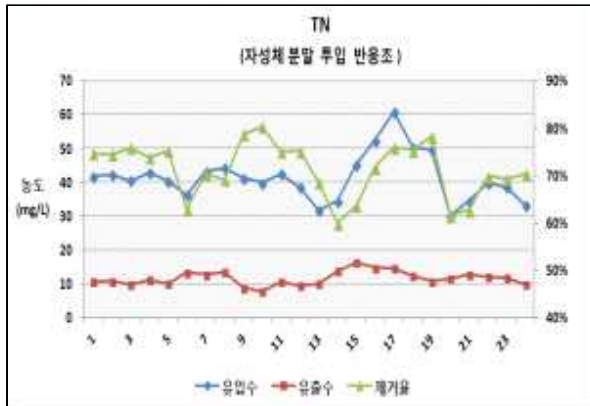
Fig. 4 Concentration and removal efficiency of BOD (a: experimental group, b: control group).

#### 3.2 BOD 제거율

생물반응조의 유기물 제거효율을 평가하기 위하여 운전 기간중의 유입수, 유출수의 BOD 분석을 실시하였다. 운전기간 동안 유입수의 BOD 농도는 평균 176.8 mg/L로 나타났다. 실험군에서 유출수의 평균 BOD 농도는 MLSS 농도를 8,000 mg/L로 운전한 실험1 기간에는 평균 8.5 mg/L, MLSS 농도를 6,000 mg/L로 운전한 실험2 기간에서는 평균 8.3 mg/L로 나타났다. 대조군의 유출수 BOD 농도는 평균 18.8 mg/L로 측정되었다. 실험1, 실험2, 대조군의 평균 BOD 제거율은 96%, 95%, 89%로 나타났다.

실험군의 BOD 제거율은 모든 기간에서 대조군보다 높게 나타났다. 이는 높은 MLSS 농도를 유지함으로써 미생물에 의한 유기물 제거가 활발했던 것으로 판단되며, 자철광 분말 투입으로 인한 높은 고액분리 효과로 미세 입자성 물질의 유출이 감소한 결과로 판단된다.

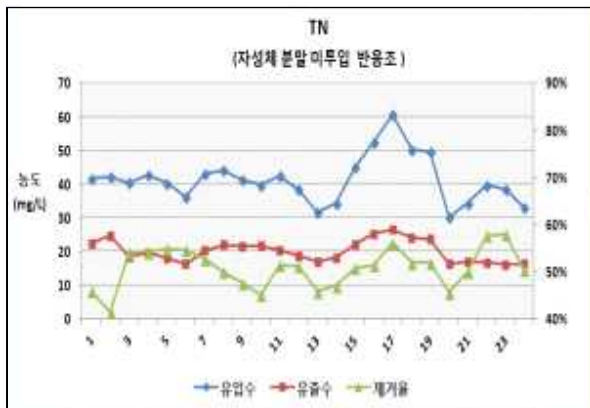
또한 생물반응조 MLSS 농도를 8,000 mg/L로 운전한 실험1 기간과 생물반응조 MLSS 농도를 6,000 mg/L로 운전한 실험2 기간의 BOD 제거효율은 약 1% 정도의 차이를 보여 생



(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 5 Concentration and removal efficiency of TN (a: experimental group, b: control group)

Fig. 6 Concentration and removal efficiency of TP (a: experimental group, b: control group).

물반응조 MLSS 농도가 8,000 mg/L에서 6,000 mg/L로 감소하여도 비슷한 BOD 제거효율을 나타냄을 확인하였다. 운전기간동안 실험군과 대조군의 BOD 제거율 변화 그래프를 Fig. 4에 나타내었다.

### 3.3 TN 제거효율

자철광 분말을 이용한 하수처리 시스템의 질소제거효율을 평가하기 위해 TN 분석을 실시하였으며, 운전기간동안의 TN 농도 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 운전기간 동안 유입수의 TN 농도는 평균 41.4 mg/L로 나타났다. 실험군에서 유출수의 평균 TN 농도는 실험1 기간에는 평균 10.8 mg/L, 실험2 기간에서는 평균 12.6 mg/L로 나타났다. 대조군의 유출수 TN 농도는 평균 20.3 mg/L로 분석되었다.

운전 기간동안 유입수와 유출수의 평균 TN 제거율은 실험1에서 74%, 실험2에서 69%, 대조군에서 51%로 나타났다. 실험군의 TN 제거율은 모든 기간에서 대조군보다 높게 나타나 자철광 분말을 이용한 하수처리공정이 질소제거효율을 증가시킴을 확인하였다. 자철광 분말의 주입을 통한 floc 형성 및 반응조 내 MLSS 농도 증가를 통해 미생물의 유출을

저감하여 질산화 효율 및 총질소 제거효율이 증가한 것으로 판단된다.

생물학적 질소제거는 동화작용과 질산화와 탈질 반응으로 나눌 수 있는데 생물학적 질소제거에서는 질산화 반응이 최우선적으로 이루어져야 한다. 질산화 반응은 독립영양 미생물인 질산화 미생물에 의해 이루어지며 질산화 미생물의 성장속도는 일반적으로 유기물제거에 이용되는 종속영양 미생물보다는 매우 낮기 때문에 미생물의 유지가 매우 중요하다.<sup>8)</sup> 또한 질산화 미생물은 pH, 온도 변화 등 환경요인의 변화에 민감하며 유독성 물질에 약하다는 특징을 가지고 있다.

또한 생물반응조 MLSS 농도를 8,000 mg/L로 운전한 실험1 기간과 생물반응조 MLSS 농도를 6,000 mg/L로 운전한 실험2 기간의 TN 제거효율은 약 5% 정도의 차이를 보여 생물반응조 MLSS 농도가 질소제거 효율에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

### 3.4 TP 제거효율

운전기간 동안 TP 분석을 통해 본 시스템의 인 제거 효율을 평가하고자 하였다. Fig. 6에 운전 기간 동안의 유입수



및 유출수 TP 농도 변화와 제거효율을 나타내었다.

운전기간 동안 유입수의 평균 TP 농도는 5.62 mg/L이었으며, 실험 1 기간의 유출수 TP 농도는 평균 0.14 mg/L, 실험 2 기간의 유출수 평균 TP 농도는 평균 0.09 mg/L로 나타났다. 대조군의 유출수 TP 농도는 평균 1.28 mg/L로 나타났다. 실험 1, 실험 2, 대조군의 평균 TP 제거율은 각 98%, 98%, 77%로 나타났다. 실험군의 TP 제거율은 모든 기간에서 대조군보다 높게 나타났다.

이는 높은 MLSS 농도를 유지함으로써 혐기조에서의 인방출과 호기조에서의 인 과잉섭취가 활발히 일어났기 때문으로 판단되며, 자철광 분말 투입에 따른 높은 고액분리 효과로 미세 입자성 물질의 유출 감소와 원활한 슬러지 인발을 통한 인제거가 일어난 것으로 판단된다.

또한 실험 1 기간과 실험 2 기간의 TP 제거효율은 약 21% 정도의 차이를 보여, 생물반응조 내 MLSS 농도가 높을수록 TP 제거효율이 높아짐을 확인하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 자철광 분말을 이용한 하수처리 공법을 개발하였으며, 연구실 규모 실험을 통해 그 가능성을 평가하였다. 운전기간동안 생물반응조 내 MLSS 농도 변화를 확인하였고 질소, 인 제거효율을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 자철광 분말을 투입한 반응조의 MLSS는 8,000 mg/L으로 증가하였으며, 이는 대조군의 2,500 mg/L 대비 약 3.2배 증가한 값을 나타내었다.
- 2) 자철광 분말 투입 시 BOD 제거효율은 평균 96%로 대조군의 89% 대비 7% 상승하는 결과를 나타내었다. 이는 고농도 MLSS 유지에 따른 미생물의 활성도 증가에 따른 것으로 판단된다.
- 3) 유입수의 평균 총질소 농도는 41.4 mg/L, 유출수의 평균 총질소 농도는 10.8 mg/L로 나타나 약 74%의 질소 제거 효율을 보였다. 이는 대조군의 51% 대비 23% 증가한 결과로, 자철광 분말을 이용한 하수처리 공정이 질소 제거에 효과적인 것을 증명하였다.
- 4) 실험 1과 2 모두에서 약 98%의 총인이 제거되었다. 이때 대조군의 제거율은 77%로 자철광 분말을 이용한 하수처리를 통해 기존 공정 대비 약 20%의 제거율 증진 효과를 확인하였다.
- 5) 본 연구를 통해 자철광 분말을 이용한 하수처리공정의 가능성을 확인하였다. 자철광 분말의 투입과 동시에 MLSS농도가 증가함을 확인하였고, 이를 통해 유기물 제거율 및 총질소, 총인 제거효율이 증가함을 확인하였다.

- 6) 향후 본 공정의 scale-up을 통해 실제 규모 하수처리장에의 적용 가능성 평가 및 운전데이터를 확보할 계획이며, 기존 하수처리공정에 본 공정을 조합한다면 하수처리효율을 증대 및 방류수 수질기준 향상을 위한 대안이 될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 후 기

본 연구는 2013년도 중소기업청 기술혁신개발사업(S2084166)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### References

- (1) 환경부, 2012, 하수도통계.
- (2) 윤영한, 박재로, 안상우, 지재성, 2007, "HASP 공정의 동역학적 질산화와 탈질산화 효율 연구", 대한토목학회논문집, 27(4B), pp. 469~474.
- (3) 조일형, 조정덕, 안상우, 장순웅, 김영규, 2006, "철 석출장치에 의한 폐수 중의 인 제거 특성", 한국환경보건학회지, 32(1), pp. 89~95.
- (4) 최영익, 정병길, 손희중, 성낙창, 2007, "ASBF 생물반응기를 이용한 COD 및 질소 제거특성", 대한환경공학회지, 29(9), pp. 997~1002.
- (5) 권구남, 주현중, 2000, "F/M비 변화에 따른 영양염류 제거에 관한 연구", 산업기술종합연구소논문집, 19, pp. 99~116.
- (6) 김광수, 서규태, 이경호, 2002, "생물학적 질소 및 인의 동시제거를 위한 A2/O 공정의 설계인자에 관한 연구", 대한환경공학회, 24(4), pp. 735~741.
- (7) 신관우, 신민수, 강민구, 김금용, 류홍덕, 이상일 2012, "질소 처리에 있어서 A2/O-BAF 공정 평가", 한국수처리학회지, 20(3), pp. 63~71.
- (8) 이운길, 2006, 동절기 하수처리장에서 효율적인 질소제거를 위한 최적 운전인자 도출에 관한 연구, 서울산업대학교 대학원.
- (9) Yamamoto, K., Hiasa, M., Mahmood, T. and Matsuo, T. 1989, "Direct solid-liquid separation using hollow fiber membrane in an activated sludge aeration tank." Water Science & Technology, 21(4-5), pp. 43~54.
- (10) Jang, N. J., Yeo, Y. H., Hwang, M. H., Vigneswaran, S., Cho, J. W. and Kim, I. S. 2006, The effect of air bubbles from dissolved gases on the membrane fouling in the hollow fiber submerged membrane bio-reactor (SMBR). Environmental Engineering Research, 11(2), pp. 91~98.
- (11) Nagaoka, H., Ueda, S. and Miya, A. 1996, Influence for bacterial extracellular polymers on the membrane separation activated sludge process. Water Science & Technology, 34(9), pp. 165~172.