

중금속과 체류시간이 산업단지하수 질산화에 미치는 영향

임지열·길경익[†]

서울과학기술대학교 건설시스템공학과

Analysis on effect of heavy metal and Retention time to nitrification using industrial wastewater

Jiyeol Im·Kyungik Gil[†]

Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea
(Received : 14 August 2018, Revised: 06 November 2018, Accepted: 06 November 2018)

요약

산업단지 인근에 위치한 하수처리장은 유입되는 산업폐수 내 중금속으로 인해 질산화 효율이 감소하는 문제점이 있다. 본 연구에서는 실험실 규모 반응조 운전 결과를 바탕으로 산업폐수가 유입되는 하수처리장의 질산화 효율 개선을 위해 중금속과 체류시간이 질산화에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 운전 결과를 바탕으로 질산화를 향상 위한 하수처리장 운전 방법을 제시하고자 한다. 실험실 반응조 운전 결과 체류시간 0.5일 이상으로 운전 할 경우 60% 이상의 질산화율을 확보할 수 있을 것으로 나타났다. 하지만, 동일한 조건에서 일반 도시하수처리장 시료를 이용하는 경우보다 낮은 효율을 보이는 것으로 조사되었다. 이와 같은 결과를 보인 원인으로 산업 폐수 내 함유된 중금속의 영향으로 질산화 미생물의 활성(SNR 기준)을 분석하였다. S 하수처리장과 일반 하수처리장 시료(A MWTP)를 이용한 반응조의 SNR은 각각 0.13 ~ 0.21 mg NH₄/gMLSS/hr과 0.74 mg NH₄/gMLSS/hr의 범위를 보였다. 이는 S 하수처리장 시료를 유입수로 하는 반응조 내 미생물의 활성이 낮음을 확인 할 수 있다. 따라서 산업폐수가 유입되는 하수처리장에서 질산화 효율 개선을 위해 체류시간 증가 및 전처리를 통한 중금속 처리가 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 하수처리장, 질산화, 산업단지하수, 중금속, 미생물 활성도

Abstract

The Municipal Wastewater Treatment Plant(MWTP), located industrial estate, has a problem of decreasing nitrification efficiency. In this research, it was analyzed that effect of heavy metals and retention time to nitrification based on operational result of laboratory scale reactors. And suggest improving MWTP operation method for increasing nitrification efficiency based on findings. According to operational result, laboratory scale reactor shows over 60% nitrification efficiency over hydraulic retention time(HRT) 0.5 day. However, the nitrification efficiency of S MWTP(high heavy metal concentration) sample was lower than that of A MWTP(low heavy metal concentration) sample in same operational condition. The main reason was heavy metals in industrial wastewater. This heavy metals was acted as inhibitor to nitrifier in reactors. So, activity of nitrifier was analyzed based on specific nitrification rate(SNR). The SNR of S MWTP sample shows 0.13 ~ 0.21 mg NH₄/gMLSS/hr and that of A MWTP sample shows 0.74 mg NH₄/gMLSS/hr. As a result, the activity of nitrifier of S MWTP was lower than that of A MWPT. In other words, retrofit methods for improving nitrification efficiency in MWTPs located industrial estate were that to increase retention time in biological treatment process or to pretreat heavy metal before being injected biological treatment process.

Key words : Municipal wastewater treatment plant, Nitrification, Industrial wastewater, Heavy metal, SNR

1. 서 론

하수처리장은 시민들의 건강하고 쾌적한 삶을 위하여 반드시

필요한 사회 기반 시설이며, 그 중요성은 이루 말할 수 없다. 특히, 우리나라를 비롯한 전 세계 국가들에서는 하수처리장 법적 방류수 수질 기준을 제정하여, 방류수를 규제하고 있는 실정이다. 현재 우리나라의 경우 「하수도법」, 「물환경보전법」, 「폐기물관리법」 등과 같은 법령을 통해 하수처리장 방류수 수질 기준 항목으로 유기물, 부유물질, 질소, 인, 대장균군 및 생태독성이며, 방류수 수질 기준을 초과할 경우 과징금 부과 및 행정 처분과

[†] To whom correspondence should be addressed.
Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea
E-mail: kgil@seoultech.ac.kr

같은 형태로 하수처리장에 그 책임을 지게 한다. 이에 정부, 지자체 및 하수처리장 운영기관에서는 방류수 수질 기준을 만족시키기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 그러나 이러한 노력에도 불구하고 환경부의 발표에 의하면, 다수의 하수처리장에서 방류수 수질기준을 초과하여 배출하고 있다. 2017년 원주지방환경청에서 조사를 실시한 155개소 대구·경북 하수처리장 중 23개소(약 15%)에서 방류수 수질 기준을 초과한 것으로 조사되었다. 또한 방류수 수질 기준을 초과한 하수처리장 대부분은 소규모 하수처리장 및 산업 폐수와 같은 연계처리수가 유입되는 시설인 것으로 발표되었다. 소규모 하수처리장 방류수 수질 기준 초과와 주요 원인은 시설의 노후화로 인한 운영적 문제점이었으며, 이는 정부 사업화를 통해 시설 개선 및 운영 지도 점검 등을 통해 대비할 수 있을 것이다. 하지만, 산업폐수와 같은 연계처리수 유입하수처리장의 경우는 유입 하수 특성(고농도 중금속 함유)에 따른 문제로 정부에서도 「산업폐수 연계처리 지침」을 통해 하수처리장 내 고농도 중금속이 유입되는 것을 관리하고 있다. 하지만, 여전히 산업폐수가 유입되는 하수처리장은 방류수 수질 기준 준수에 어려움이 있는 실정이다.

산업폐수 내 중금속이 하수처리장 운영에 영향을 미치는 근본적인 이유는 하수처리장 내 오염물질 제거가 생물학적 처리를 기반으로 하고 있다는 것이다(Lee et al., 2011; Li et al., 2016). 중금속 물질이 생물학적 처리 공정에서 독성 및 저해 물질로 작용한다는 것은 이미 다수의 연구진에 의해 일반적인 사실로 밝혀졌다. 특히, 질소처리와 관련된 질산화균은 중금속 농도에 민감하여 질소 처리를 위해 중금속 관리에 각별한 노력을 기울여야 할 것이라는 연구 결과가 발표되기도 하였다(Park and Lee, 2015; Shin et al., 2013; Cho and Kang, 2008). 질산화에 저해를 미치는 주요 원인 중금속 물질은 Nickel(Ni), Cooper(Cu) 및 Chromium(Cr) 등으로 조사되었다. 이와 같은 중금속 물질은 질산화균의 성장 및 활성도 영향을 주며 그 중 Ni의 영향이 큰 것으로 보고되고 있다(Kim et al., 2009; Kim, 2012; 원성연 등, 1999). 이에 Ni의 저해 범위에 대해서도 연구가 수행되었으며, Skinner and walker는 0.25 mg/L, Beckman은 3 mg/L를 제시하였다. 또한 Juliastuti 등은 암모니아성 질소 산화에 관여하는 암모늄 산화균이 아질산염 산화균보다 Ni에 대해 민감하다는 연구 결과를 발표하기도 하였다(Skinner and Walker, 1961; Beckman, 1972; Juliastuti et al., 2003). 암모늄 산화균이 Ni에 대해 민감하다는 것은 암모니아성 질소 산화 자체가 일어나지 않는다는 것이며, 이는 후속공정인 탈질반응에도 영향을 미쳐 질소 제거가 이루어지지 않는다는 것을 의미한다. 앞 서 언급한 중금속 영향에 관한 선행연구는 대부분 실험실 규모에서 이루어

진 연구이며, 그 이유는 하수처리장에서 유입 하수 내 중금속 농도를 제어하여 분석을 실시하는 것은 현실적인 문제로 인해 많은 어려움이 있기 때문이다.

본 연구에서는 하수처리장 유입 하수 내 중금속 농도에 따른 효율을 분석하기 위하여 경기도에 위치한 S 하수처리장 질산화 반응조(호기 반응조)를 실험실 규모로 모사하여 구축하였다. S 하수처리장을 연구 대상 시설로 선택한 이유는 연구 대상 하수처리장에서 전반적으로 질소 제거가 원활하게 이루어지지 않는 문제점이 있기 때문이다. 또한 유입 하수의 중금속 농도의 차이를 확인하기 위하여 산업단지가 가동하는 주중과 주말 샘플을 채취하여 실험실 규모 반응조 운전을 실시하였으며, 운전 결과를 바탕으로 중금속이 질산화에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 중금속으로 인해 질소 제거에 어려움이 있는 하수처리장의 적합한 운전 개선 방안을 도출하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 연구대상 시설

연구 대상 하수처리장은 경기도 S 하수처리장으로 인근 산업단지에서 발생하는 폐수를 연계처리하고 있는 특징을 가진다. 연구 대상 시설의 용량은 70,000 m³/day이며, 유입 하수량은 평균 63,000 m³/day으로 설계 용량의 약 90%의 용량이 활용되고 있다. 또한 연구 대상 하수처리장은 DensaDeg[®] - Biofor[®]을 기반으로 하고 있으며, 2007년부터 약 10년간 운영되고 있다. DensaDeg[®] 공법은 고농도 부하에도 적용할 수 있는 고속 응집침전 공법으로 물리·화학적 처리 기술로 구분할 수 있으며, Biofor[®]는 이 후 상향류식 생물여과 공법으로 그 특징을 정리 할 수 있다.

실험에 사용된 유입수는 두 가지로 S 하수처리장의 주말 BIOFOR DN 유출수(BIOFOR DN (weekend))와 주중 BIOFOR DN 유출수(BIOFOR DN (weekday))를 이용하였다. BIOFOR DN로 표기한 이유는 실험에 사용한 유입수가 S 하수처리장에서 질산화(Nitrification) 반응조로 유입되는 탈질(Denitrification) 반응조 유출수이기 때문이다. 하수처리장 유입 하수는 시간에 따라 발생량 및 농도가 변화하기 때문에 특정 시간에 샘플링을 할 경우 전반적인 특징을 확인할 수 없기에 24시간 동안 2시간 간격으로 채취하여 혼합 성상 분석 및 반응조 유입수로 활용하였다. Table 1에서는 BIOFOR DN (weekend)와 BIOFOR DN (weekday)의 성상을 정리하였다. Table 1를 통해 확인 할 수 있듯이, BIOFOR DN (weekday)의 농도가 BIOFOR DN (weekend)와 비교하여 다소 농도가

Table 1. Characteristics of influent used this research.

Parameter	COD	BOD	TN	Alk	NH ₄ ⁺ -N	Cr	Cd	Zn	Ni	Cu
BIOFOR DN (weekend)	47.3	121.8	14.7	342	11.4	ND	ND	1.14	0.22	0.04
BIOFOR DN (weekday)	68.8	132.5	35.3	444	17.3	ND	ND	2.11	0.32	0.14
A MWTP	78.5	110.4	42.3	288	33.8	ND	ND	ND	ND	ND

* COD, BOD, TN, NH₄⁺-N, and Ni : mg/L

* ALK(Alkalinity) : mg/L as CaCO₃

* ND: Not detected

높은 것으로 나타났다. 특히, 중금속의 경우 BIOFOR DN (weekend) Zn 1.14 mg/L, Ni 0.22 mg/L, Cu 0.04 mg/L였으며, BIOFOR DN (weekday) Zn 2.11 mg/L, Ni 0.32 mg/L, Cu 0.14 mg/L로 분석되었다. Table 1에서도 확인 할 수 있듯이, 주중과 주말로 구분하여 시료를 채취하였으며 하수처리장 유입하수의 경우 공장 운영 여부로 인해 오염물질 및 중금속의 농도에서 차이를 보이는 것으로 분석되었다.

Fig. 1은 실험실 반응조의 모식도를 보여주고 있다. 반응조 용량은 3L로 원형 아크릴통을 이용하여 제작하였으며, 반응조 내 자석바와 하부에 자석교반기를 이용하여 혼합을 실시하여 완전 혼합 상태를 유지하였다. 또한 산소공급기와 에어스톤을 활용하여 반응기 내부에 지속적으로 산소를 공급하여 질산화에 필요한 산소가 부족함이 없도록 하였다. 그 외 외부에 항온수조를 이용하여 운전온도를 조절할 수 있도록 하였다. 또한 S 하수처리장 공정을 모사하기 위해 S 하수처리장 질산화 공정의 담체를 실험실 반응조에 투입하였다. 연구 기간 동안 S 하수처리장에서 담체 교체 작업이 이루어져 이를 고려하기 위해 교체 전·후의 담체를 운전 조건에 반영하였다. 또한 산업폐수가 유입되지 않는 A 하수처리장 질산화조 유입수를 대상으로 하는 반응조를 운전하였다. 즉, 본 연구를 위해 3개의 실험실 규모 반응조를 운전하였으며, Reator 1과 Reactor 2는 공통적으로 BIOFOR DN (weekend)와 BIOFOR DN (weekday)를 유입수로 하지만, 각 각 교체 전과 교체 후의 여재를 이용하여 운전을 실시하였다는 차이가 있다. 또한 Reator 2와 Reactor 3는

공통적으로 교체 후의 여재를 이용했으나 그 유입수가 다르다는 것으로 정리 할 수 있다. Table 2는 이와 같은 반응조 실험 조건을 정리하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 반응조 운전 결과

Fig. 2 ~ Fig. 4에서는 실험실 반응조(reactor 1 ~ reactor 3)의 운전 결과를 정리하였다. Fig. 2 ~ Fig. 4의 (a)는 운전기간 동안 상대적으로 긴 HRT(2일, 1일 및 0.5일)로 운전한 결과를 Fig. 2 ~ Fig. 4의 (b)는 상대적으로 짧은 HRT(60분, 20분 및 10분)로 운전한 결과를 정리하였다. 여기서 최소 HRT를 10분으로 결정한 것은 S 하수처리장 질산화 공정에서 실제로 운전중인 HRT이기 때문이다. Fig. 2 (a) BIOFOR DN (weekend) 운전 결과를 살펴보면, 반응조 유입수 암모니아성 질소 농도 약 12 mg/L로 유입되었으며, 상대적으로 긴 HRT로 운전한 2일 ~ 0.5일 조건에서 유출수 내 암모니아성 질소 농도는 약 3 mg/L로 검출되었다. 이어서 유입수를 BIOFOR DN (weekday)로 변경하여 운전을 실시하였다. BIOFOR DN (weekday)의 유입 암모니아성 질소 농도는 16 mg/L 정도를 보였으며, HRT 2일과 1일 조건에서 유출수 내 암모니아성 질소 농도는 약 4 mg/L로 검출되었다. 또한 상대적으로 짧은 HRT로 운전한 Fig. 2 (b)의 경우, BIOFOR DN (weekend)와 BIOFOR DN (weekday) 모두 유입수와 유출수 내 암모니아성 질소 농도 차이는 1 mg/L 이내로 정도로 안정적인 질산화가 이루어지지 않았음을 확인하였다. Fig. 3 (a)에서 BIOFOR DN (weekend)를 유입수로 이용한 경우, 유출수 내 암모니아성 질소농도는 4 ~ 6 mg/L의 범위를 보였다. 이어서 BIOFOR DN (weekday)를 유입수로 운전을 실시한 조건에서 유출수 내 암모니아성 질소 농도는 6 ~ 7 mg/L로 전반적인 운전 결과는 Fig. 2의 Reactor 1의 결과와 유사한 것으로 분석되었다. 단, 유출수 내 암모니아성 질소의 농도는 다소 높게 검출되었는데, 이는 여재 교체로 인한 영향으로 판단된다. 이는 3.3절에서 각 반응조의 SNR (Specific Nitrification rate)분석을 통해 확인 할 수 있으며, 자세한 사항은 3.3절에서 다시

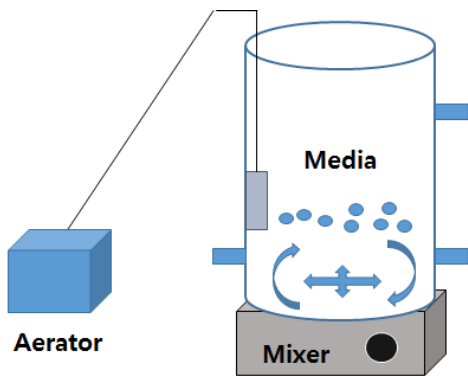


Fig. 1. Schematic diagram of laboratory scale reactors

Table 2. Operational conditions of laboratory scale reactors in this research.

Parameter	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3
Reactor type	Batch (Attached growth)		
Volume	3 L		
MLVSS	4,000 mg/L		
Temperature	20 °C		
DO	Over 2.0 mg/L (during overall operation days)		
pH	6.5 ~ 7.5 (during overall operation days)		
Influent	BIOFOR DN (weekend & weekday)	BIOFOR DN (weekend & weekday)	A MWTP in Seoul
Media	Before change	After change	After change
HRT	10Min ~ 2d	10Min ~ 2d	10Min ~ 2d

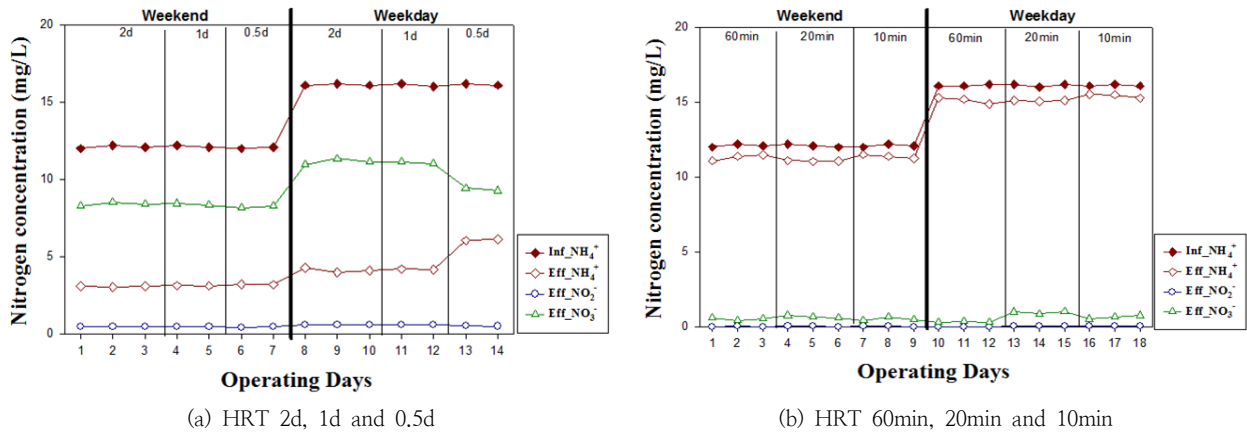


Fig. 2. Operational results of laboratory scale Reactor 1

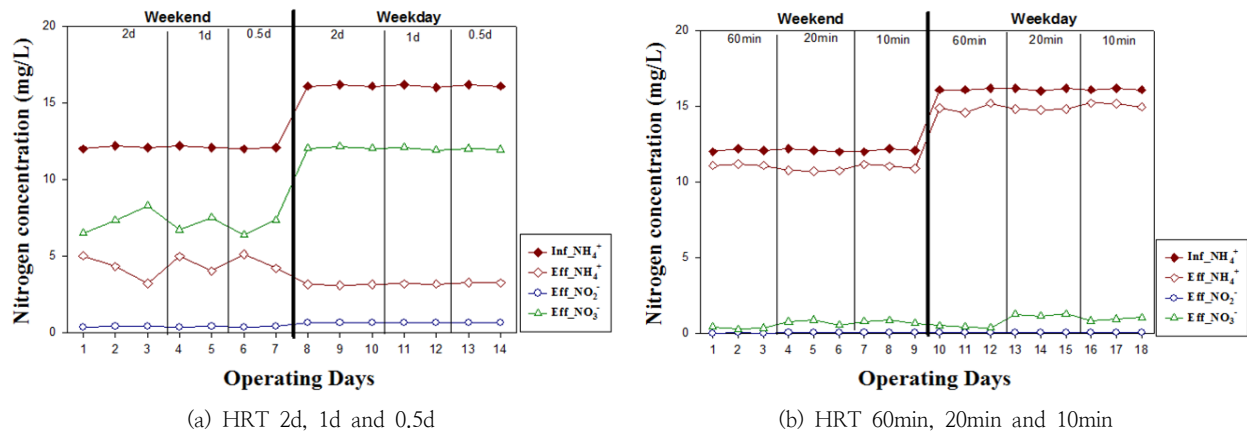


Fig. 3. Operational results of laboratory scale Reactor 2

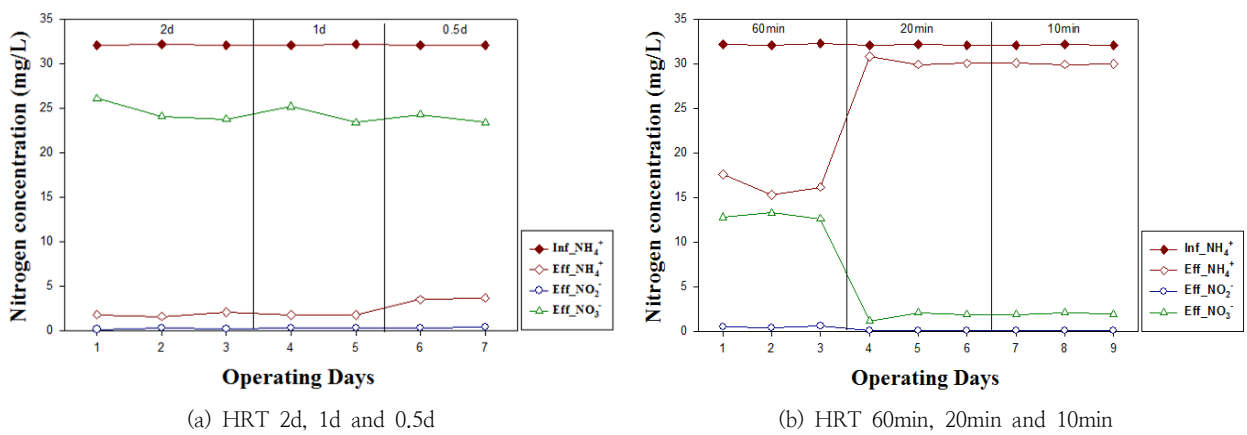


Fig. 4. Operational results of laboratory scale Reactor 3

언급하도록 하였다. Fig. 4는 BIOFOR DN (weekend)와 BIOFOR DN (weekday)와 대조군으로 산업폐수를 연계처리하지 않는 A 하수처리장의 시료를 대상으로 운전을 실시하였다. Reactor 3 유입수 내 암모니아성 질소 농도는 Fig. 4를 통해서도 확인 할 수 있듯이, BIOFOR DN (weekend)와 BIOFOR DN (weekday)와 비교하여 약 2 ~ 2.5배 이상 높은 것으로 검출되었다. 반면, 유출수 내 암모니아성 질소 농도는

Fig. 4 (a) HRT 0.5일 이상 조건에서 3 ~ 5 mg/L로 Fig. 2와 Fig. 3와 유사한 수준으로 검출되었다. 또한 Fig. 4 (b)를 통해서 HRT 60분 조건에서도 유출수 내 암모니아성 질소가 15 ~ 18 mg/L으로 검출됨을 확인할 수 있으며, 20분 이하의 경우 안정적인 질산화가 이루어지지 않았음을 확인 할 수 있다. Table 3에서는 Reactor 1 ~ 3의 질산화율을 운전 조건 별로 요약하였다.

Table 3. Summary of ammonium nitrogen removal efficiency in laboratory scale reactors

	Reactor 1		Reactor 2		Reactor 3
	BIOFOR DN (Weekend)	BIOFOR DN (Weekday)	BIOFOR DN (Weekend)	BIOFOR DN (Weekday)	
HRT 2 day	75 %	74 %	73 %	80 %	94 %
HRT 1 day	74 %	74 %	66 %	80 %	93 %
HRT 0.5 day	74 %	62 %	65 %	79 %	89 %
HRT 60 min	6 %	8 %	8 %	9 %	62 %
HRT 20 min	6 %	10 %	4 %	8 %	4 %
HRT 10 min	5 %	9 %	3 %	7 %	3 %

3.2 유입수 영향 (중금속 농도 영향)

Fig. 5는 유입수를 BIOFOR DN (weekend), BIOFOR DN (weekday) 및 A MWTP로 구분하여 체류시간 별 질산화율을 정리하였다. 실험에 사용된 유입수의 대표적인 차이점은 중금속 농도로 함유된 중금속 농도에 따라 BIOFOR DN (weekend): middle, BIOFOR DN (weekday): high 및 A MWTP: low(ND)로 구분하였다. 아래의 Fig. 5를 통해 중금속 농도에 의한 질산화율을 확인 할 수 있다. Fig. 5 (a) ~ (c) 0.5일 이상의 조건에서는 세 유입수 모두에서 질산화율이 약 60% 이상의 값을 보였다. 또한 Fig. 5 (d) HRT 60분에서 질산화율은 A MWTP를 이용하여 운전한 Reactor 3를 제외하고 급격히 감소한 것을 확인 할 수 있다. 이후 HRT 20분 이하의 운전조건에서는 세 가지 유입수 모두 낮은 효율을 보였다. 중금속 농도가 낮은 A 하수처리장 시료의 질산화율은 S 하수처리장 시료보다 질산화율이 약 20% 이상을 높은 것과 HRT 60분 조건에서도 약 60%의 질산화율을 보인 것이 유입수 종류에 따른 주요 특징으로 볼

수 있다. 여기서 주목할 부분은 동일한 조건에서 A 하수처리장 시료가 S 하수처리장 시료보다 약 2배정도 높은 암모니아성 질소가 제거되었다는 것(농도 기준)과 또한 60분 조건에서도 질산화를 통해 암모니아성 질소가 제거되었다는 것이다. 이는 S 하수처리장 시료가 A 하수처리장 시료와 비교하여 상대적으로 질산화의 어려움이 있다는 것을 보여주는 결과라 할 수 있다. 이러한 결과는 A 하수처리장으로 유입되는 산업폐수 내 중금속의 영향으로 판단된다. 다른 특징의 하나로 BIOFOR DN (weekend)와 BIOFOR DN (weekday)의 질산화율이 유사 또는 BIOFOR DN (weekday)가 높은 것을 들 수 있다. BIOFOR DN (weekend)의 경우 산업단지 내 공장들이 운영을 하지 않는 경우가 많아 상대적으로 중금속 농도가 낮게 유입된 특징을 보여, 질산화율에 영향을 미칠 것으로 예측되었다. 하지만, 실제 운전 결과는 예측 결과와 다른 결과를 보였는데, 이와 같은 결과는 두가지 원인에 의한 것으로 판단된다. 첫 째, 하수처리장 내 주중에 유입된 잔존 중금속의 영향에 의한 것 둘 째, 이미 미생물의

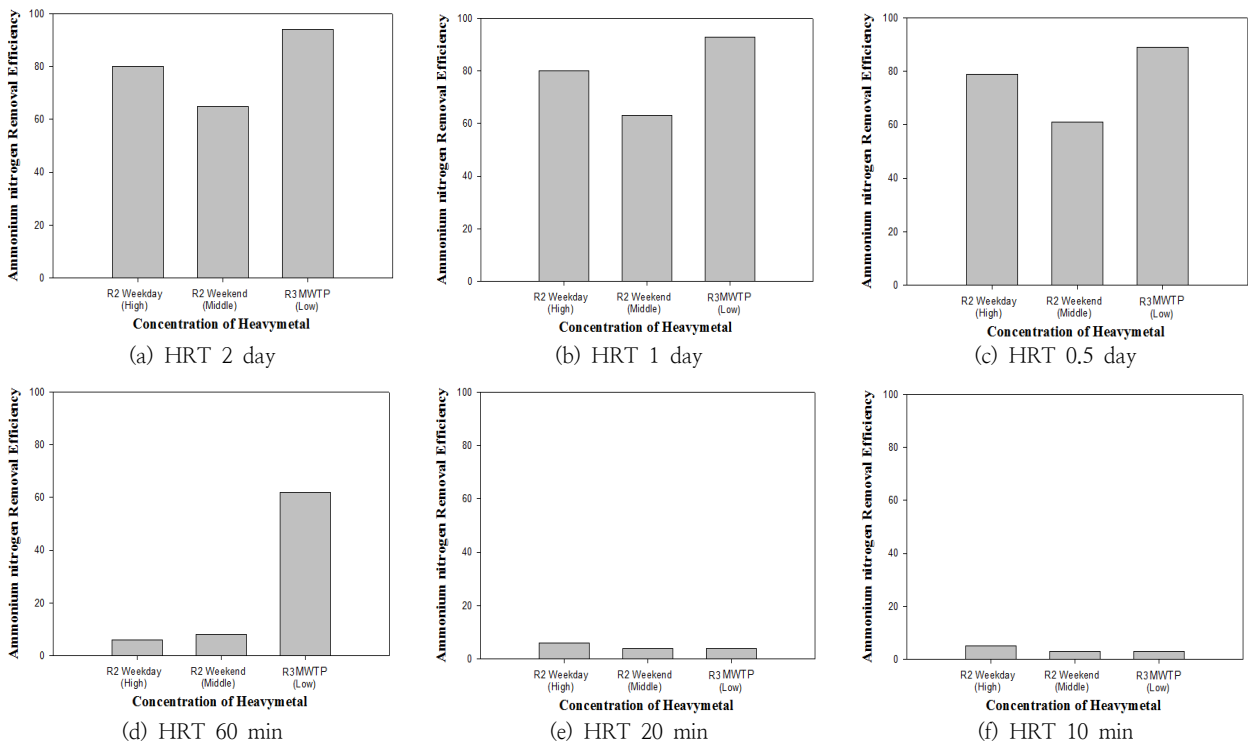


Fig. 5. Comparison of ammonium nitrogen removal efficiency according to change of influent

활성이 중금속 유입으로 인해 낮아졌다는 것이다. 이 부분의 원인을 파악하기 위하여 질산화 미생물의 활성도 분석을 실시하였다.

3.3 운전 조건 별 질산화 미생물 활성 변화

각 유입수 별 질산화율이 차이를 보인 원인을 파악하기 위해 Batch-test를 통한 질산화 미생물 활성도 분석을 실시하였다. Fig. 6은 Reactor 1 ~ 3의 Track study결과를 보여주고 있다. Fig. 6의 (a) Reactor 1 - BIOFOR DN (weekend), (b) Reactor 1 - BIOFOR DN (weekday) 그리고 (d) Reactor 2 - BIOFOR DN (weekday)의 경우는 암모니아성 질소 변화가 다소 선형적인 감소 형태를 보인 반면, (c) Reactor 2 - BIOFOR DN (weekend)와 (e) Reactor 3의 경우는 변곡점이 나타나는 감소형태를 보였다. 특히 (e) Reactor 3의 경우에는 변곡점이 가장 두드러지게 나타난 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 이유를 보인 원인으로서는 (e) Reactor 3의 경우, 유입수 내 중금속이 함유되지 않아 미생물의 활성이 감소하지 않아 암모니아성 질소 처리 속도가 영향을 받지 않았기 때문으로 판단된다.

Fig. 6의 Track study 결과를 바탕으로 질산화 미생물의 활성을 나타내는 specific ammonium nitrogen uptake rate(SNR)를 분석을 실시하였다. 분석 결과는 Table 4에서 확인할 수 있다. Table 4를 통해서도 확인할 수 있듯이, 전체 반응에 대한 SNR값은 Reactor 3가 가장 큰 것으로 나타났다. 그리고 Reactor 1과 Reactor 2의 SNR값은 Reactor 2가 다소 높은 것으로 조사되었다. weekend와 weekday를 비교해보았을 때는 weekday의 SNR값이 높은 것으로 나타나 이는 S 하수처리장 내 질산화 미생물이 중금속의 영향으로 활성이 감소된 것으로 판단된다. 이를 하수처리장 설계 시 사용되는 국내·외

Table 4. SNR in laboratory scale reactors

SNR (mg NH ₄ /gMLSS/hr)	Reactor		
	Range	median	Overall
Reactor 1 - BIOFOR DN (weekend)	0.03 ~ 0.23	0.07	0.13
Reactor 1 - BIOFOR DN (weekday)	0.03 ~ 0.20	0.10	0.17
Reactor 2 - BIOFOR DN (weekend)	0.03 ~ 0.30	0.10	0.19
Reactor 2 - BIOFOR DN (weekday)	0.20 ~ 0.80	0.10	0.21
Reactor 3	0.03 ~ 1.13	0.42	0.74

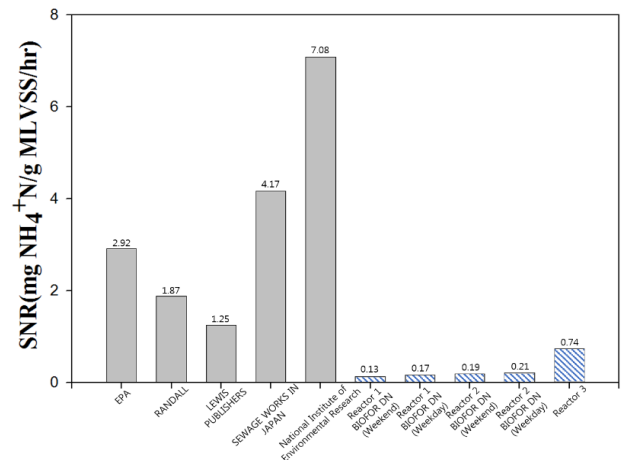


Fig. 7. Comparison of SNR with various manual for design of MWTP

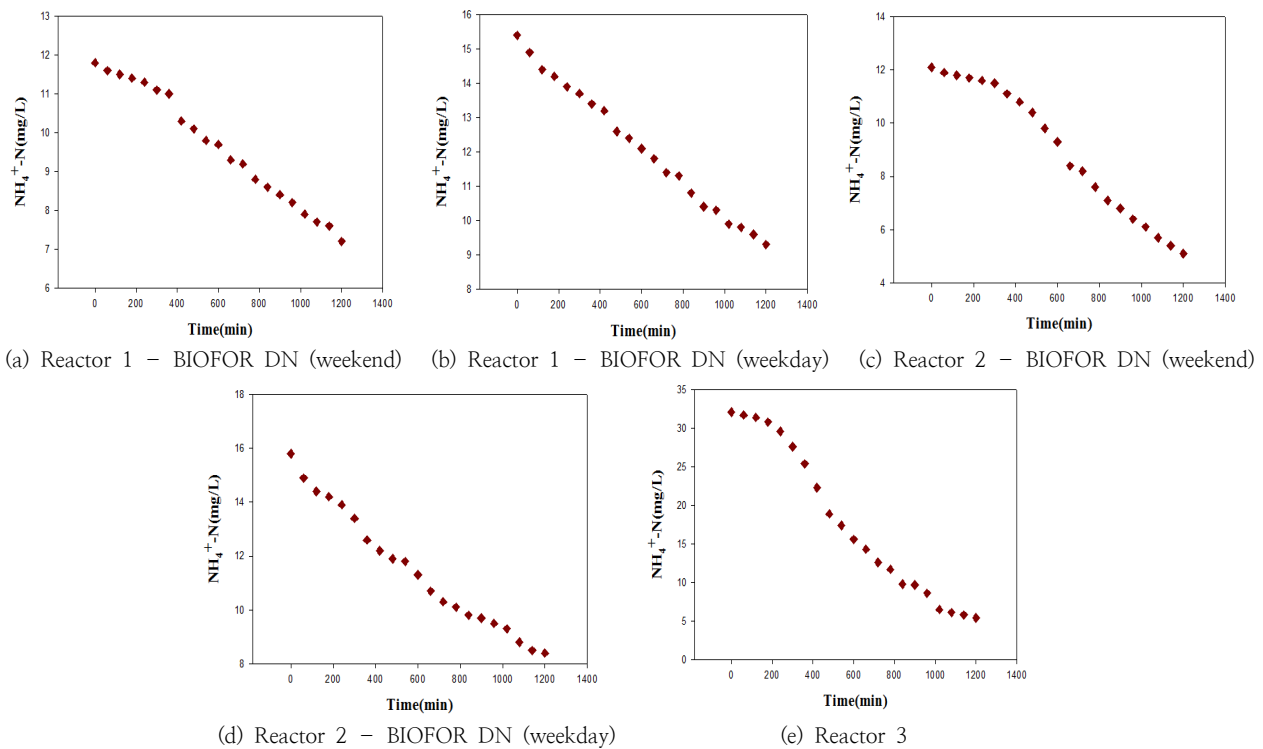
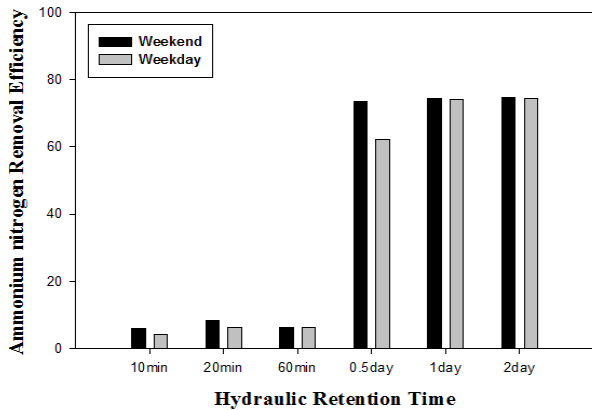


Fig. 6. Track study result of laboratory scale reactors

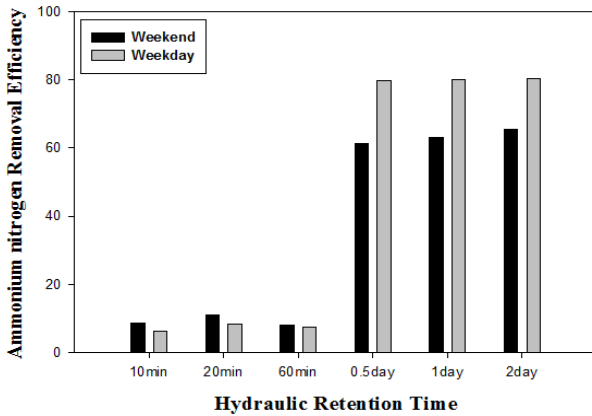
매뉴얼의 SNR 값과 비교한 결과는 Fig. 7에서 확인 할 수 있다. Fig. 7에서 확인 할 수 있듯이 S 하수처리장 담체를 이용하여 운전한 SNR값은 상당히 낮은 수치이며, 이는 중금속으로 인해 미생물의 활성이 감소하였다는 것을 확인 할 수 있다.

3.4 체류시간의 영향

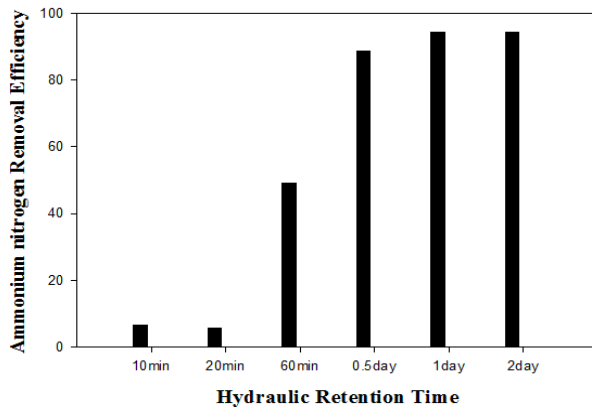
Fig. 8은 각 반응조에서 체류시간에 따른 질산화를 정리하였다. S 하수처리장 시료를 이용한 (a) Reactor 1과 (b) Reactor 2의 경우 중금속이 유입되에도 불구하고 약 0.5일 이상의 HRT를 유지할 경우 약 60% 이상의 질산화를 기대할 수 있을 것으로 판단되며, 그 이하로 운전될 경우 안정적인 질산화를



(a) Reactor 1



(b) Reactor 2



(c) Reactor 3

Fig. 8. Ammonium nitrogen removal efficiency according to HRT

기대할 수 없을 것이다. (c) Reactor 3의 경우, 0.5일 이상의 HRT를 유지할 경우 약 90%이상의 질산화를 그리고 60분의 체류시간으로도 50%의 질산화를 기대할 수 있을 것으로 보인다. Fig. 8의 분석 결과 S 하수처리장과 같이 산업폐수의 연계처리로 인해 중금속이 유입되는 하수처리장의 경우 생물반응조의 체류시간 증가를 통해 안정적인 제거 효율을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

1) 산업폐수가 유입되는 S 하수처리장의 질산화 공정을 모사한 실험실 규모 반응조 운전 결과 현재 S 하수처리장 질산화 반응조 운전 체류시간인 10분 ~ 20분의 경우 10% 이하의 낮은 질산화를 보였다. 이는 하수처리장 전반에 걸쳐 질소 제거가 원활하게 이루어지지 않는 원인일 가능성이 있다. 하지만, 동일한 조건에서 상대적으로 긴 체류시간(0.5일 이상)으로 운전한 운전 조건에서는 질산화를 60% 이상을 보이는 것으로 나타났다. 반면 중금속 유입이 미비한 A 하수처리장 시료를 이용한 반응조에서는 체류시간 0.5일 이상에서 약 90%의 질산화를 보였으며, 체류시간 60분 조건에서도 약 50%의 질산화를 보였다.

2) S 하수처리장의 중금속 영향 분석 결과 주중 시료와 주말 시료의 질산화율은 유사하거나 주중 질산화율이 약 10% 정도의 높은 것으로 나타났다. 그 원인은 하수처리장 내 잔존하는 중금속의 영향과 중금속으로 인해 질산화 반응조 내 미생물의 활성이 이미 낮아진 것으로 판단된다.

3) SNR을 기반으로 실험실 반응조 질산화 미생물 활성 분석 결과 중금속이 함유된 S 하수처리장 시료를 이용한 반응조의 활성이 약 3~4배 정도 낮은 것으로 분석되었다. 또한 국내외 하수처리장 설계 시 활용되는 매뉴얼 상의 SNR과 비교하여도 매우 낮은 것으로 나타났다. 이와 같은 질산화 미생물 활성도 차이는 앞서 언급한 각 반응조의 질산화에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

4) S 하수처리장과 같이 산업폐수가 유입되는 하수처리장에서 중금속의 영향으로 인해 질산화 미생물의 활성이 감소된 경우, 안정적인 질소 제거 효율을 확보하기 위해 체류시간을 증가시키는 방안을 고려할 필요가 있을 것이다. 또한 체류시간 확보하기 위한 시설 용량 확보 및 개조 공사가 어려울 경우 전처리를 통해 유입 하수 내 중금속 농도를 관리하는 방안이 필요할 것이다.

사 사

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

Cho, JH, Kang, MR (2008). Determination of the Optimum Flocculant Mixing Ratio for Paper Making Wastewater

- Treatment. *J. of Korea TAPPI*, 40(1), pp. 41–46. [Korean Literature]
- F, A, Skinner, N, Walker (1961) Growth of *Nitrosomonas europaea* in batch and continuous culture, *Archiv For Mikrobiologie*, 38(4), pp. 339–349. [<https://doi.org/10.1007/bf00446615>]
- Juliastuti, S R, Baeyens, J, Creemers, C (2003) Inhibition of nitrification by heavy metals and organic compounds: The ISO 9509 test. *Environmental Engineering Science*, 20(2), pp. 79–90. [<https://doi.org/10.1089/109287503763336511>]
- Kim, HJ (2012). *Wastewater Treatment Facility Operation Plan According to Industrial Complex Characteristics – Focused on plans for the water quality change of the industrial complex in B region*. Master's Thesis, Konkuk University. Seoul, Korea. [Korean Literature]
- Kim, MS, Hwang, HM, Park, JW (2009). Research of the Toxic Estimation and Treatment Method of Wastewater Including Nickel, *Korean Society of Environmental Engineers*, 31(11), pp. 983–988. [Korean Literature]
- Lee, BC, Ahn, JH, Lee, JH, Bae, WK (2011). Advanced Biological Treatment of Industrial Wastewater using Food Waste Leachate as an External Carbon Source: Full-Scale Experiment. *J. of Korean Society on Water Quality*, 27(4), pp. 461–466. [Korean Literature]
- Li, X, Kapoor, V, Impelliteri, C, Chandran, K, Santo Domingo, JW (2016) Measuring nitrification inhibition by metals in wastewater treatment systems: Current state of science and fundamental research needs. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 46(3), pp. 249–289. [<https://doi.org/10.1080/10643389.2015.1085234>]
- M, Awobamise, K, Jones, E, Khan, S, Murthy (2007) Long-term biodegradability of dissolved organic nitrogen. *Proceedings of the Waste Environment Federation*, 2007(13), pp. 5340–5341. [<https://doi.org/10.2175/193864707787969081>]
- Park, CG, Jo, EY, Kim, YH, Park, SJ (2014). Study on a Small-scale Wastewater Treatment System using Biological Aerated Filter. *The KSFM J. of Fluid Machinery*, 17(3), pp. 41–45. [Korean Literature] [<https://doi.org/10.5293/kfma.2014.17.3.041>]
- Park, SJ, Lee, SH (2015). A Study on the Biological Treatment of Acid Pickling Wastewater Containing a High Concentration of Nitrate Nitrogen. *J. of Korean Society on Water Environment*, 31(3), pp. 253–261. [Korean Literature] [<https://doi.org/10.15681/kswe.2015.31.3.253>]
- Seitzinger, S P, Sanders, R W (1997) Contribution of dissolved organic nitrogen from rivers to estuarine eutrophication. *Marine Ecology Progress Series*, 159, pp. 1–12. [<https://doi.org/10.3354/meps159001>]
- Shen, DH, Hua, Y, Lim, BS (2013). Application of Coagulants for Industrial Wastewater Treatment Containing NBD COD. *J. of The Institute of Environmental Studies*, 17, pp. 71–78. [Korean Literature]
- Weon, SY, Kim, MS, Lee, SI (1999). Effect of Temperature and Free Ammonia Concentration on Nitrification of Enriched Nitrifiers. *Korean Society of Environmental Engineers*, 21(9), pp. 1613–1620. [Korean Literature]
- You, SJ, Tsai, YP, Huang, RY (2009) Effect of heavy metals on nitrification performance in different activated sludge processes. *J. of Hazardous Materials*, 165(1–3), pp. 987–994. [<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.10.112>]
- You, SJ, Tsai, YP, Huang, RY (2009) Effects of heavy metals on the specific ammonia and nitrate uptake rates in activated sludge. *Environmental Engineering Science*, 26(7), pp. 1207–1215. [<https://doi.org/10.1089/ees.2008.0186>]
- Zhu, A, Chen, B, Zhang, L, Westerhoff P (2015) Improved Analysis of Dissolved Organic Nitrogen in Water via Electrodialysis Pretreatment. *Analytical chemistry*, 87(4), pp. 2353–2359. [<https://doi.org/10.1021/ac504224r>]