

## 고농도 니켈을 함유한 산업하수의 질산화율 분석 및 개선 방안

임지열·길경익<sup>†</sup>

서울과학기술대학교 건설시스템공학과

### Analysis and improvement measures of nitrification using industrial wastewater with high Nickel concentration

Jiyeol Im·Kyungik Gil<sup>†</sup>

Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea

(Received : 14 March 2017, Revised: 09 November 2017, Accepted: 09 November 2017)

#### 요약

산업하수 내 함유된 고농도 중금속(니켈)은 하수처리장 질산화율 감소의 원인으로 지목되고 있다. 본 연구에서는 고농도 니켈을 함유한 산업하수의 질산화율 분석 및 개선 방안을 도출하고자 실험실 규모 반응조 운전을 실시하였다. 운전 결과를 고농도 니켈을 함유한 경우 질산화율은 20% 내외로 낮은 범위를 보였지만, 저농도 니켈이 유입되었을 경우 질산화율이 향상(70% 이상)되었다. 질산화율의 차이를 보인 주요 원인은 니켈이 반응조 내 미생물의 활성을 감소시킨 것으로 AUR과 SNR 분석을 통해 나타났다. 또한 고농도 니켈이 유입될 경우, 체류시간 증가와 더불어 질산화율이 증가하였다. 즉, 고농도 중금속(니켈)을 함유한 하수의 경우 미생물 관리 및 체류시간 증가를 통해 안정적인 질산화율을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 하수처리장, 질산화, 산업단지하수, 중금속, 니켈

#### Abstract

The heavy metal such as Nickel (Ni) in industrial wastewater is one of the major reasons of decreasing nitrification efficiency in municipal wastewater treatment plants (MWTPs). In this study, laboratory scale reactors were operated in order to analyse of nitrification efficiency and improvement measures. As a result, nitrification efficiency during high Ni concentration (0.295 mg/L) was about 20%. However nitrification efficiency during low Ni concentration (0.114 mg/L) was over 70%. The changes of the micro-organism activity according to Ni concentration was investigated as being the major reason behind the gap of nitrification efficiency through analysing AUR and SNR. Increasing the HRT in high Ni concentration also increased the nitrification efficiency. Thus, maintenance of microorganisms and increasing the HRT in nitrification reactors suggests that measures taken to treat wastewater is positively correlated with high concentration of heavy metal.

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

## 1. 서론

산업단지지역에서 발생하는 하수는 산업단지 내 위치한 공장에서 발생하는 중금속과 같은 미량오염물질을 함유하고 있어 일반 도시하수와 그 중금속성상에서 차이를 보이는 경우가 있다(Park and Lee, 2015). 이와 같은 중금속 물질은 하수처리장 생물처리공정으로 유입될 경우 미생물에 저해 현상을 유발하여 생물학적 처리 효율 감소의 문제를 유발하기도 한다(Lee et al., 2011; Li et al., 2016). 일부 산업단지하수를 처리하는 하수처리장에서는 중금속으로 인한 생물학적 처리 효율의 저

해로 인해 방류수 수질기준을 만족시키지 못하는 문제가 발생하고 있으며, 이를 극복하기 위한 방안이 연구되고 있다. 하수 내 중금속을 제거하는 방안으로 화학적 및 물리학적 방법의 전처리가 효과적이라는 연구결과가 다수의 연구진을 통해 발표되었다(Lee et al., 2011; Li et al., 2016; Park and Lee, 2015). 따라서 다수의 산업단지하수를 처리하는 하수처리장에서는 생물 공정에서 중금속의 영향을 방지하기 위해 물리·화학적 방법을 전처리로 활용하고 있다. 하지만 질산화공정의 경우 중금속에 대해 민감해 전처리 공정에서 불완전하게 처리된 중금속이 유입될 경우 질산화에 영향을 미칠 수 있는 연구결과가 발표되었다(You et al., 2009a; You et al., 2009b). 즉, 고농도의 중금속이 함유된 산업단지 하수를 처리하는 하수처리장에서는 중금속으로 인한 질산화 저해 방지 방안을 고려할 필요가 있는 것이다(Park and Lee, 2015; Shin, 2013; Cho

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

and Kang, 2008).

질산화를 저해하는 중금속 물질로 니켈 (Nickel, Ni), 크롬 (Chromium, Cr) 및 구리 (Copper, Cu) 등이 제시되고 있다. 그 중 니켈의 경우 질산화균의 성장 및 활성도에 영향을 미치는 중금속 물질로 산업단지하수를 처리하는 하수처리장에서 질산화 저해의 주요 중금속 물질로 보고되고 있다(Kim et al., 2009; Kim, 2012; 원성연 등, 1999). 또한 니켈 저해 범위에 대해서는 0.25 mg/L에서 *Nitrosomonas*의 성장에 독성을 미치며(Skinner and walker, 1961), 3 mg/L 에서는 질산화 반응에 100% 저해를 미친다는 연구 결과가 발표되었다(Beckman, 1972). 특히 *Nitrobacter* 보다는 *Nitrosomonas*에 더욱 독성이 큰 것으로 알려져 있다(Julastuti et al., 2003). 따라서 안정적인 고효율의 질산화를 위해서는 니켈과 같은 질산화 저해 물질을 적절하게 관리할 필요가 있다.

본 연구의 연구 대상 처리장은 현재 alum과 고분자 응집제를 이용한 응집·침전 공정을 생물처리공정의 전처리 공정으로 활용하고 있지만, 질산화율이 낮아 질소 처리에 어려움을 겪고 있는 실정이다. 이로 인해 방류수 수질기준을 만족시키지 못하여, 효율적인 하수처리장 운영 및 수계 수질 보호가 원활하게 이루어지지 않고 있다. 본 연구는 연구대상 하수처리장 하수를 이용한 실험실 규모 반응조 운전 결과를 분석하여, 질산화를 분석 및 개선 방안 도출하고자 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 연구 대상 시료

실험에 사용된 유입수는 경기도에 위치한 산업폐수를 처리하는 A 하수처리장의 1차처리수(1차처리수는 A 하수처리장 유입 하수를 하수처리장 자체에서 응집처리를 거친 시료, A MWTP with high Ni), 1차 추가 응집처리를 거친 A 하수처리장 응집처리수 (A 하수처리장의 1차처리수에 실험실에서 추가적인 응집처리를 거친 시료, A MWTP with low Ni) 그리고 일반 도시하수가 유입되는 서울 B 하수처리장 하수 (B MWTP)를 이용하여 운전을 실시하였다. 세 가지 종류의 시료의 암모니아성 질소는 A 하수처리장 응집처리수가 가장 높았으며, 다른 두 시료는 유사한 농도를 보였다. 또한 A 하수처리장 1차처리수와 B 하수처리장 하수는 질산화에 필요한 알칼리도가 충분히 존재하여 별도의 알칼리도 보충을 실시하지 않았으나, A 하수처리장 응

집처리수의 경우 알칼리도가 부족한 것으로 나타나  $\text{Na}(\text{H})\text{CO}_3$ 를 이용하여 알칼리도를 보충하였다. 그리고 본 연구에서 주목한 니켈의 농도는 A 하수처리장 1차처리수는 0.296 mg/L, A 하수처리장 응집처리수는 0.114 mg/L 그리고 B 하수처리장 하수에서는 검출되지 않았다. Table 2에서는 본 실험에 사용된 A 하수처리장 1차처리수, A 하수처리장 응집처리수 그리고 B 하수처리장 하수의 특성을 보여주고 있다. 실험실 반응조는 원형 아크릴통을 이용하여 제작하였으며, 반응조 내부에 자석바를 하부에 자석교반기를 이용하여 교반을 실시하였다. 산소공급기와 에어스톤을 활용하여 반응기 내부에 산소를 지속적으로 공급하였다. 또한 HRT와 SRT조절을 위한 유입·유출은 운전 조건에 맞추어 일정시간에 실시하였다. 운전 온도는 실내 온도인 20°C 조건으로 운전하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 실험실 규모 반응조 운전

실험실에서 운전한 반응조 조건은 period 1과 period 2로 구분할 수 있다. Period 1은 A 하수처리장 1차처리수와 B 하수처리장 하수를 이용하여 운전한 구간으로 A 하수처리장 1차처리수와 일반도시하수의 질산화율을 비교하기 위함이었다. Period 1의 운전 결과를 바탕으로 A 하수처리장의 낮은 질산화율의 원인을 규명하기 위한 구간이다. 또한 period 1은 period 1 - long과 period 1 - short으로 분류할 수 있는데, 이는 반응조의 HRT(Hydraulic retention time, 수리학적 체류시간)과 SRT(Solid retention time, 미생물 체류시간)의 차이로 구분하였다. Period 2는 니켈 농도에 대한 영향을 파악하기 위한 운전 구간으로 period 1의 유입수와 비교하여 니켈의 농도가 낮은 A하수처리장 응집처리수를 유입수로 하였다. 또한 A 하수처리장 1차처리수를 체류시간을 길게 운전한 반응조를 구성하였다. 또한 각 반응조의 미생물은 A 하수처리장 포기조 및 실험실에서 안정적으로 배양된 미생물을 활용하였다. 각 period 별 운전 조건은 아래의 Table 2와 Table 3에서 요약하였다.

Fig. 1와 Fig. 2에서는 period 1 - long과 period 1 - short 조건의 각 반응조 별 운전 결과를 확인할 수 있다. 운전 결과를 살펴보면, Fig. 1 (a)와 (c)에서는 암모니아성 질소의 제거가 원활하게 이루어지지 않음을 확인 할 수 있으며, 운전 후반부인 (운전 6일 경) 유출수 내 암모니아성 질소

Table 1. Characteristics of influent wastewaters

Parameters	COD	BOD	TN	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	Alk	Ni
A MWTP with high Ni	539.2	328.1	33.7	24.5	0.1	1.4	290	0.295
B MWTP	163.8	130.5	35.0	26.8	0.1	0.7	195	ND
A MWTP with low Ni	608.4	384.2	42.3	33.8	0.1	0.2	188	0.114

\* COD, BOC, TN,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$  and Ni : mg/L

\* ALK(Alkalinity) : mg/L as  $\text{CaCO}_3$

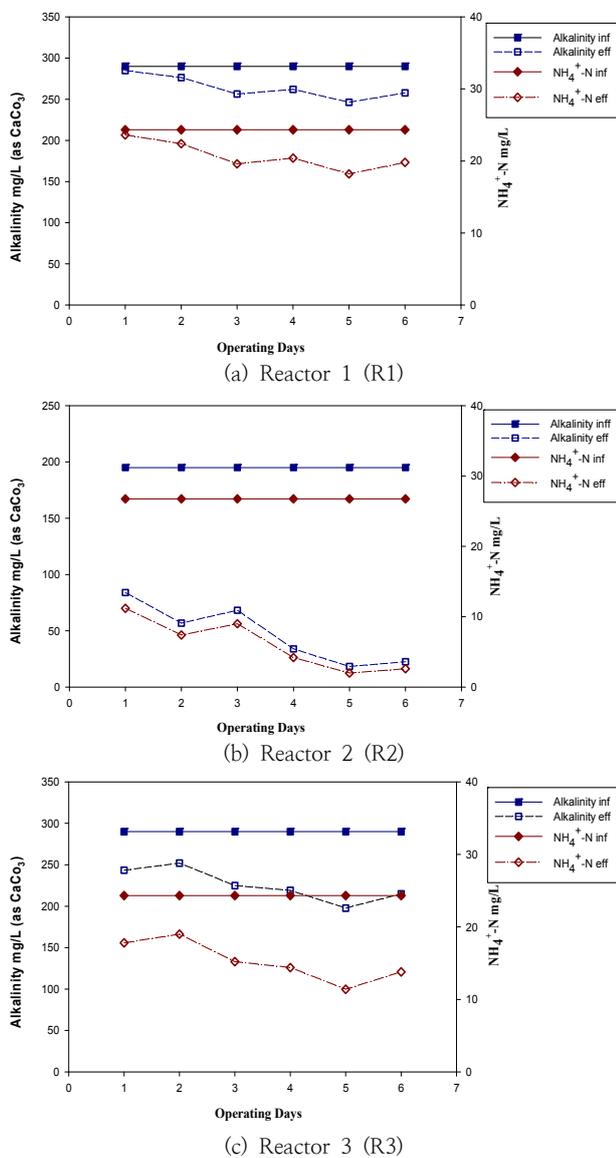
\* ND: Not detected

**Table 2.** Operation condition of laboratory scale reactors during period 1

	Reactor 1 (R1)	Reactor 2 (R2)	Reactor 3 (R3)
Influent	A MWTP with high Ni	B MWTP	A MWTP with high Ni
Ni (mg/L)	0.295 mg/L	ND	0.295 mg/L
Sludge (MLSS)	A MWTP	A MWTP	Laboratory
Short retention time (HRT / SRT)	7 hr / 7 day		
Long retention time (HRT / SRT)	10 hr / 10 day		

**Table 3.** Operation condition of laboratory scale reactors during period 2

	Reactor 1 (R1)	Reactor 2 (R2)	Reactor 3 (R3)
Influent	A MWTP with low Ni	A MWTP with low Ni	A MWTP with high Ni
Ni (mg/L)	0.114 mg/L	0.114 mg/L	0.295 mg/L
Sludge (MLSS)	A MWTP	Laboratory	A MWTP
Retention time (HRT / SRT)	10 hr / 10 day		24 hr / 10day



**Fig. 1.** Operational result of laboratory scale reactors during period 1 - long

농도는 약 14 ~ 20 mg/L로 검출되었다. 하지만, Fig. 1 (b)는 유출수 내 암모니아성 질소 농도가 2 ~ 3 mg/L까지 낮아진 것을 확인할 수 있다. 암모니아성 질소 제거와 더불어 알칼리도도 감소하였고, 유출수 내 질산성 질소가 검출되었으므로, 질산화 반응에 의해 암모니아성 질소가 제거된 것으로 생각할 수 있다. Fig. 1 (b)에서 질산화 반응이 유도된 원인이 본 연구에서 제한조건으로 선정된 니켈의 영향이 아닌 긴 체류시간에 영향을 받아 유도된 것인지 검증하기 위해 Fig. 2에서는 체류시간을 줄여 운전을 실시하였다. 일반적으로 질산화에 관여하는 독립영양세균(Autotrophic bacteria)는 유기물 산화에 관여하는 종속영양세균(Heterotrophic bacteria)에 비해 필요로 하는 체류시간이 길다. 이는 두 미생물군 간의 성장속도 및 산소에 대한 우점도에 영향을 받기 때문이다. Fig. 2의 체류시간을 줄여 운전한 조건에도 이와 유사한 결과를 나타내었다. 특히, 체류시간을 줄였음에도 불구하고 (a)와 (c)에서는 암모니아성 질소의 제거가 거의 발생하지 않고, (b)에서는 안정적인 암모니아성 질소의 제거가 발생한 것으로 미루어봐 period - 1의 운전 결과가 차이를 보인 원인은 유입수 내 니켈에 의한 것으로 해석할 수 있다.

Fig. 3에서는 앞 절에서 질산화 반응 저해 원인으로 지목한 니켈의 제거를 통해 안정적인 질산화 반응유도 가능성을 파악하기 위한 반응조 운전 결과를 보여준다. 운전 결과를 살펴보면, (a) Reactor 1에서는 운전 10일 후에도 유출수 내 암모니아성 질소 농도 약 22 mg/L로 검출되어 암모니아성 질소 제거가 원활하게 이루어지지 않은 것으로 판단된다. 하지만, (b) Reactor 2에서는 운전 7일 경 이후 유출수 내 암모니아성 질소 농도가 약 6 ~ 8 mg/L 정도로 낮아진 것을 확인할 수 있다. 반응조 운전 결과 암모니아성 질소와 더불어 알칼리도의 감소도 발생하였으므로, 제거된 암모니아성 질소는 질산화에 의한 것으로 판단할 수 있다. (c) Reactor 3에서는 체류시간을 증가시켜 고농도의 니켈이 존재하는 하수에서 체류시간을 증가시켜 운전한 결과를

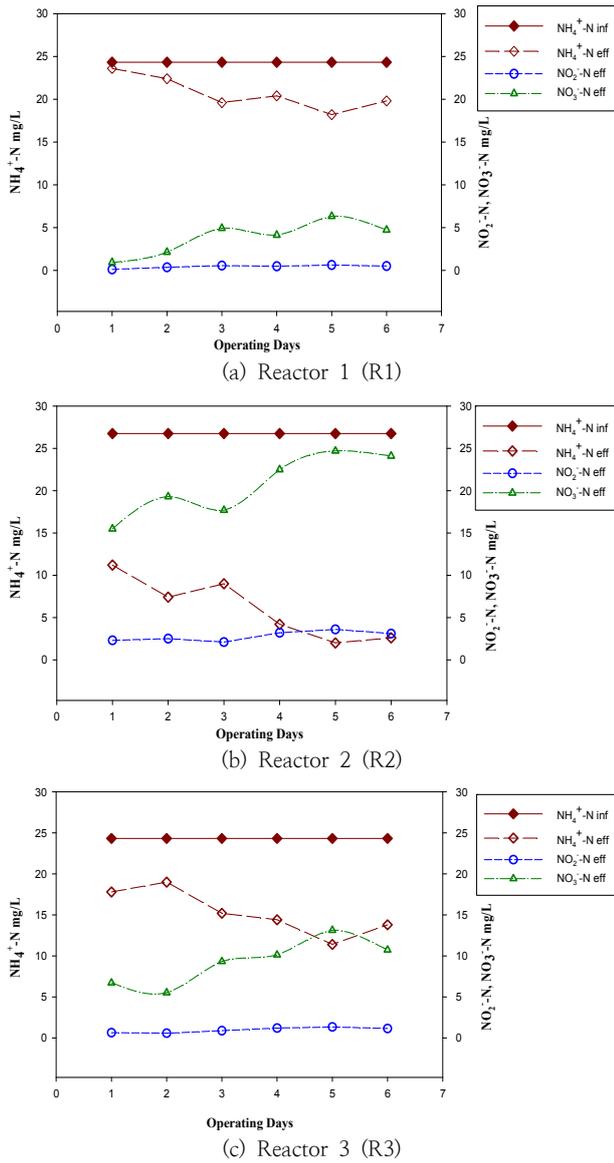


Fig. 2. Operational result of laboratory scale reactors during period 1 - short

보여주고 있다. 운전 초기부터 유출수 내 암모니아성 질소 농도는 약 10 mg/L 정도로 검출되었으며, 운전 종료 시 약 3 mg/L 정도로 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. 암모니아성 질소 제거와 더불어 알칼리도의 제거도 발생하였으므로, 제거된 암모니아성 질소는 질산화에 의한 것으로 판단된다.

### 3.2 질산화효율

Fig. 4는 운전 기간 전체에 대한 box plot을 활용하여 암모니아성 질소 제거율을 분석하였다. Fig. 4 (a) period 1 - long, Reactor 2는 암모니아성 질소 제거율이 지속적으로 증가하여 운전 종료 시 약 90%에 가까운 암모니아성 질소 제거율을 보였다. 하지만, Reactor 1과 Reactor 3에서는 운전초기와 비교하여 다소 증가하였지만, Reactor 1 약 25%, Reactor 3 약 30% 정도의 암모니아성 질소 제거율을

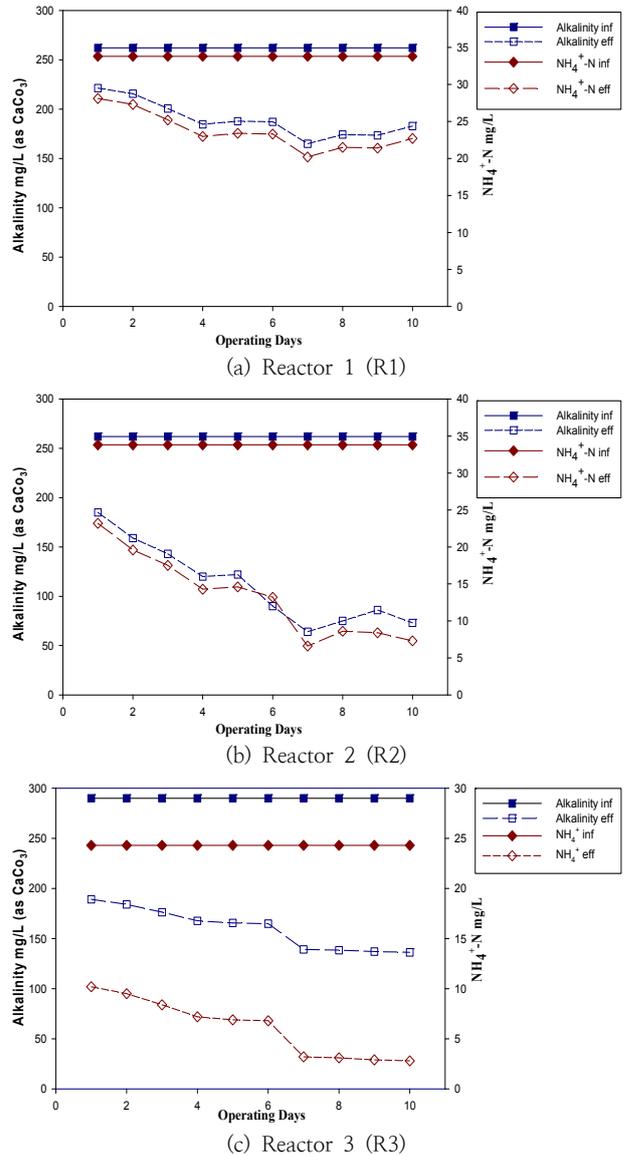


Fig. 3. Operational result of laboratory scale reactors during period 2

보였다. 전체적인 운전기간 동안 Reactor 2에서는 Reactor 1 & Reactor 3에 비해 높은 암모니아성 질소 제거율을 보였다. 하지만, Reactor 3에서 암모니아성 질소 제거율의 경우 약 40% 정도에 지나지 않아 추가적인 암모니아성 질소 제거가 이루어져야할 것으로 판단된다. Fig. 4 (b)에서는 운전 초기(약 4일 경), Reactor 1 ~ Reactor 3 모두 유사한 암모니아성 질소 효율을 보이는 것으로 나타났으며, 5일 이후 Reactor 2에서는 암모니아성 질소 제거율이 급증한

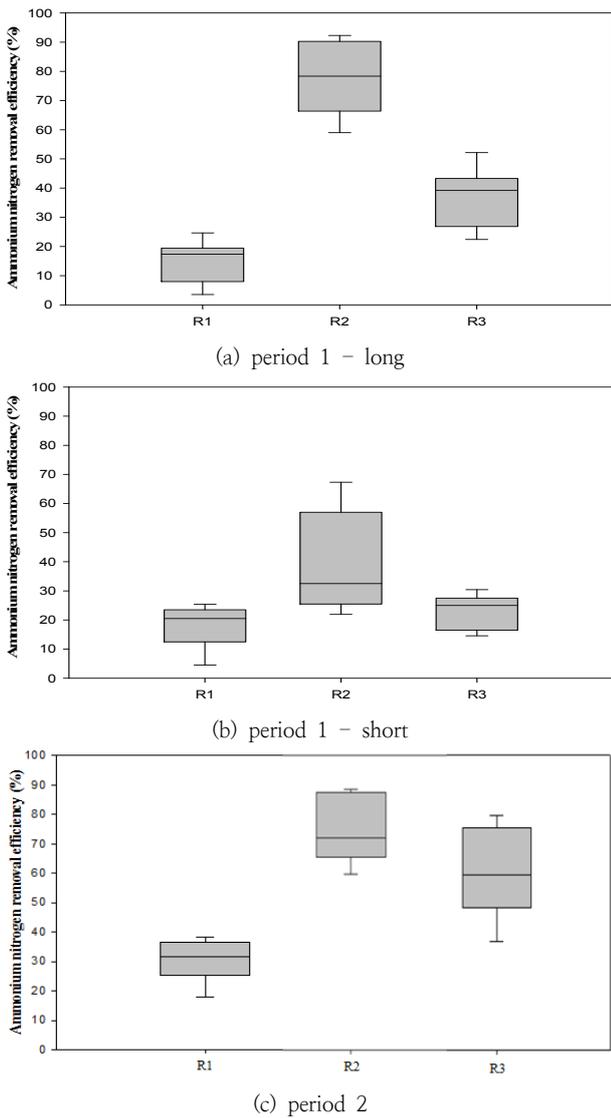


Fig. 4. Ammonium nitrogen removal efficiency in laboratory scale reactors

것을 확인할 수 있는 반면, Reactor 1 & Reactor 3에서는 운전초기와 비교하여 다소 증가하였지만, 약 25 ~ 30% 정도의 암모니아성 질소 제거율을 보였다. Reactor 2에서는 암모니아성 질소 제거율이 운전 종료 시인 8일까지 지속적으로 증가하였으며, 운전 종료 시 약 70%의 암모니아성 질소 제거율을 보였다. Reactor 2에서는 Reactor 1 & Reactor 3에 비해 높은 암모니아성 질소 제거율을 보였다. 또한 Reactor 1 & Reactor 3를 비교한 결과 Reactor 3에서 다소 높은 암모니아성 질소 제거율을 보였으나 그 차이가 미비하여 두 reactor에서 암모니아성 질소 제거율은 유사했던 것으로 판단된다. Fig. 4 (c)에서는 Reactor 1과 Reactor 2의 암모니아성 질소 제거율은 앞선 period 1과 비교하여 향상되었으며, 운전 10일 경 Reactor 1은 약 30%정도 그리고 Reactor 2는 약 80% 정도의 암모니아성 질소 제거율을 보였다. period 2 동안 암모니아성 질소 제거율을 분석한 Fig. 4을 통해 각 reactor에서 암모니아성

질소 제거율을 확인할 수 있다. Reactor 3는 Reactor 1에 비해 높은 암모니아성 질소 제거율을 보였다. Reactor 1의 경우 암모니아성 질소 제거율의 경우 약 30% 정도에 지나지 않아 추가적인 암모니아성 질소 제거율을 향상시키기 위한 방안이 고려되어야 할 것으로 판단된다. 하지만, Reactor 2의 경우 약 80%까지 암모니아성 질소 제거효율이 증가함을 확인할 수 있었다. Reactor 3의 경우 운전 기간 동안 전반적으로 70% 정도의 암모니아성 질소 제거율을 보였으므로, 안정적인 암모니아성 질소 제거율을 확보한 것을 확인하였다.

### 3.3 니켈의 영향

Fig. 5에서는 니켈 농도에 따른 암모니아성 질소 제거율의 변화를 파악할 수 있다. Fig. 5의 High Ni과 Low Ni의 운전상 가장 큰 차이점은 유입수 내 니켈 농도의 차이이다. High Ni의 경우 기존 문헌에서 언급한 니켈의 질산화 저해 농도 0.25 mg/L 이상으로 0.295 mg/L로 유입되었으며, Low Ni의 경우에는 니켈 저해 농도 이하인 0.114 mg/L로 유입되었다(Skinner and walker, 1961). Fig. 5 (a)와 (b)에서 모두 확인할 수 있듯이, Low Ni 유입수 조건에서는 High Ni 조건에 비해 암모니아성 질소 제거율이 증가한 것을 확인할 수 있다. 특히 Fig. 5 (b) 실험실 MLSS를 이용하여 Low Ni 조건의 유입수가 유입된 경우에는 그래프 상 median 값이 약 60%이지만, 최대 암모니아성 질소 제거율이 약 80%에 도달하였다. 이는 유입수 내 니켈 농도가 암모니아성 질소 제거율에 영향을 준다는 것을 직접적으로

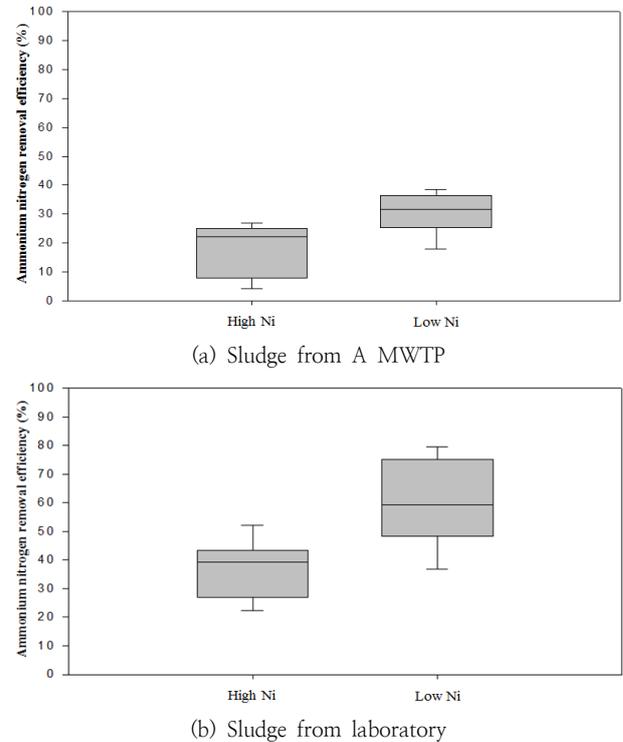


Fig. 5. Comparison of ammonium nitrogen removal efficiency according to Ni concentration

보여준다. 또한 A하수처리장 미생물로 운전을 실시한 Fig. 5 (a)와 실험실 보유 미생물로 운전한 Fig. 5 (b)의 암모니아성 질소 향상 폭을 비교하였을 때, 실험실 보유 미생물의 증가율이 높은 것으로 나타났는데, 이는 A하수처리장 미생물이 장기간 니켈에 노출되어 활성이 감소한 것으로 판단된다.

3.4 체류시간 영향

Fig. 6은 고농도 니켈이 유입된 조건에서 HRT에 암모니아성 질소 제거율을 분석한 그래프이다. 실험조건은 A MWTP의 MLSS와 고농도 니켈을 함유한 유입수로 운전한 구간의 운전 결과를 바탕으로 분석을 실시하였다. HRT 6시간, 10시간 그리고 24시간의 조건으로 운전을 실시하였으며, SRT는 10일로 동일하게 운전을 실시하였다. Fig. 6에서도 확인할 수 있듯이, HRT 6시간과 HRT 10시간까지는 암모니아성 질소 제거율 20% 내외의 낮은 효율을 보였으나, 24시간으로 증가시켰을 경우에는 효율이 급격히 증가한 것(암모니아성 제거 효율 70%이상)을 확인할 수 있다. 즉 HRT 6시간 ~ HRT 24시간 조건에서 암모니아성 질소의 제거는 가능할 것으로 판단되지만, 그 효율에는 큰 차이를 보인다고 할 수 있다. 이와 같이 효율에 큰 차이를 보이는 대표적인 원인으로 미생물의 암모니아성 질소의 제거 속도와 관련 있을 것으로 예측할 수 있으며, 고농도 니켈로 인해 반응조 내 미생물의 활성이 영향을 받았을 것으로 예측할 수 있다. 즉, 고농도 니켈이 유입되었을 경우 체류시간을 길게하여 운전할 경우 안정적인 질산화를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 체류시간을 증가시켰을 때 암모니아성 질소 제거율이 증가한 이유로는 고농도 니켈로 인해 활성이 감소한 반응조 내 미생물이 질소 제거를 위한 충분한 시간을 확보하였기 때문으로 판단된다.

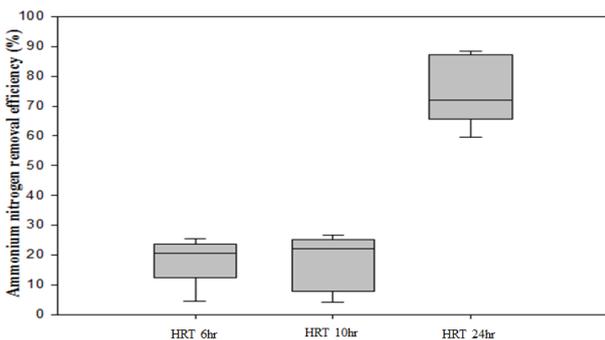
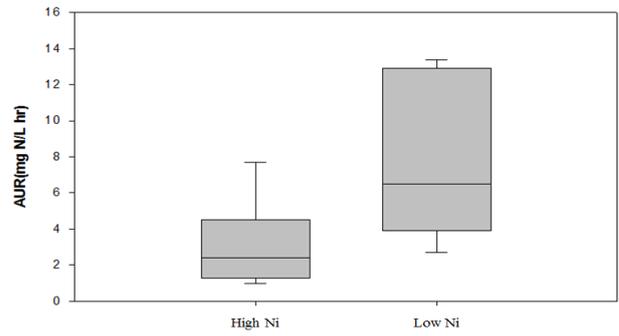


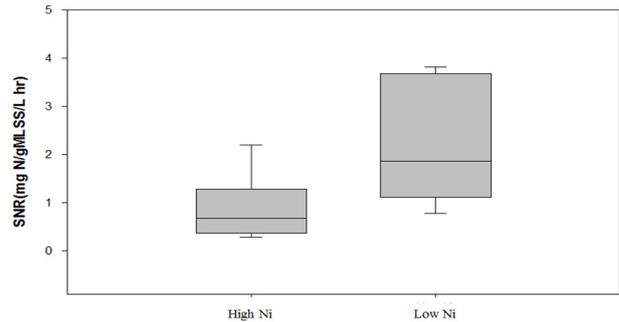
Fig. 6. Comparison of ammonium nitrogen removal efficiency according to HRT

3.5 니켈 농도에 따른 미생물 활성

Fig. 7은 앞 절에서 언급한 바 있는 니켈로 인한 반응조 내 미생물의 활성 변화를 분석한 결과를 보여주고 있다. 각 운전 조건에서 batch test를 실시하여 미생물의 ammonium nitrogen uptake rate(AUR)과 specific ammonium nitrogen uptake rate(SNR)을 분석하였다. 분석항목인 AUR은 단위



(a) Ammonium nitrogen uptake rate (AUR)



(b) Specific ammonium nitrogen uptake rate (SNR)

Fig. 7. Comparison of AUR and SNR according to Ni concentration

시간 당 반응조에서 제거되는 질소의 양을 나타내며, SNR은 AUR에 MLSS까지 고려하여 단위 미생물이 단위 시간에 제거한 질소의 양을 나타낸다. 두 값은 모두 반응조 내 미생물의 활성을 나타내는 지표로 활용될 수 있다. 분석 결과를 살펴보면, 고농도 니켈이 유입되었을 경우 AUR은 1.0 ~ 10.2 mg N/L·hr (median: 2.4 mg N/L·hr)와 SNR 0.3 ~ 2.9 mg N/g MLSS/L·hr (median: 0.7 mg N/g MLSS/L·hr)의 범위를 보인 것으로 나타났다. 반면 저농도 니켈이 유입되었을 경우에는 각각 2.3 ~ 13.8 mg N/L·hr (median: 5.1 mg N/L·hr)와 0.7 ~ 3.8 mg N/g MLSS/L·hr (median: 1.9 mg N/g MLSS/L·hr)의 범위를 보였다. 실험 결과에서도 나타났듯이, 저농도 니켈이 유입될 경우 고농도 니켈이 유입된 조건에 비해 AUR과 SNR median 값 기준으로 2배 이상의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이는 앞서 니켈 농도 및 고농도 니켈 유입 시 체류시간에 따라 암모니아성 질소 제거율이 변화한 원인으로 언급한 바 있는 미생물의 활성 차이를 증명하고 있는 결과라 할 수 있다. 즉, 유입수 내 고농도 니켈은 생물반응조 내 미생물의 활성에 영향을 미쳐 이와 같은 암모니아성 질소 제거 효율의 차이를 보인 것이라 할 수 있다.

4. 결 론

실험실 규모 반응조 운전을 통해 검단하수처리장의 질산화를 및 향상 방안에 대해 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 니켈 농도에 따른 질산화를 변화는 뚜렷하게 나타났

다. 두 유입수의 오염물질 성상은 유사하였으며, 그 중 가장 큰 차이는 니켈 농도의 차이로 볼 수 있다. 문헌에서 언급하는 니켈 저해 농도 이상 유입된 운전 기간에는 질산화율은 약 20 ~ 40%였으나, 니켈 저해 농도 이하로 유입된 운전 기간에는 40 ~ 80%까지 질산화율이 증가한 것으로 나타났다. 따라서 유입수 내 니켈의 제거는 질산화를 향상시키는 방안으로 제안될 수 있다.

2) 동일한 운전 조건에서 체류시간만 변화를 준 실험 결과 체류시간이 증가할수록 암모니아성 질소 제거율이 높은 것을 확인할 수 있다. 특히 체류시간 (HRT) 24시간으로 운전하였을 경우, 70% 이상의 고효율의 암모니아성 질소 제거 효율을 얻을 수 있었다. 이와 같은 결과는 통해 체류시간 (HRT & SRT)를 증가시키는 것은 고농도의 니켈이 함유된 하수를 처리하는 하수처리장 질산화를 향상 방안으로 제시될 수 있을 것으로 판단된다.

3) 동일한 운전조건으로 운전한 니켈에 노출된 A 하수처리장 미생물과 니켈에 노출되지 않은 실험실 보유 미생물의 효율 분석 결과 모든 조건에서 실험실 보유 미생물의 효율이 높게 나타났다. 또한 활성도를 나타내는 지표인 AUR과 SNR 분석 결과, A 하수처리장 미생물이 실험실 보유 미생물과 비교하였을 때 다소 낮음을 확인하였으며, 이는 고농도의 니켈에 장기간 노출되어 활성이 감소하였던 것으로 판단된다.

## 사 사

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2017R1D1A1B06035481)

## References

- A. Zhu., B. Chen., L. Zhang. and P. Westerhoff (2015) Improved analysis of dissolved organic nitrogen in water via electro dialysis pretreatment, *Anal. Chem.*, 87. pp. 2353-2359.
- F. A. Skinner and N. Walker (1961) Growth of *Nitrosomonas europaea* in batch and continuous culture, *Archiv For Mikrobiologie*, 38, pp. 339-349.
- Jo, JH, Kang, MR (2008) Determination of the optimum flocculant mixing ratio for paper making wastewater treatment, *J. of Korea Technical Association of the Pulp and Paper Industry*, 40(1), pp. 41-46. [Korean Literature]
- Kim, MS, Hwang, HM, Park, JW (2009) Research of the toxic estimation and treatment method of wastewater including nickel, *J. of Korean Society of Environmental Engineers*, 31(11), pp. 983-988. [Korean Literature]
- 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, Kunkuk University Master's Thesis [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, *J. of Korean Society on Water Environment*, 27(4), pp. 461-466. [Korean Literature]
- M. Awobamise., K. Jones, E. Khan, and S. Murthy (2007) Long-term biodegradability of dissolved organic nitrogen. *Proceedings of the Water Environment Federation 80th Annual Technical Exhibition and Conference*, San Diego, October 2007
- Park, CK, Jo, EY, Kim, YH, Park, SJ (2013) 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]
- 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]
- Shin, DH (2013) A study on removal of low NBD COD, Daejun University Master's Thesis [Korean Literature]
- S. R. Juliatuti., J. Baeyens, and C. Creemers (2003) Inhibition of nitrification by heavymetals and organic compounds: The ISO 9509 test. *Environmental Engineering Science*, 20, pp. 79-90.
- S. P. Seitzinger and R. W. Sanders (1997) Contribution of dissolved organic nitrogen from rivers to estuarine eutrophication, *Marine ecology progress series*, 159. pp. 1-12.
- S. J. You., Y. P. Tsai., and R. Y. Huang (2009a) Effects of heavy metals on the specific ammonia and nitrate uptake rates in activated sludge. *Environmental Engineering Science*, 26, pp. 1207-1215.
- S. J. You., Y. P. Tsai., and R. Y. Huang (2009b) Effect of heavy metals on nitrification performance in different activated sludge processes. *J. of Hazardous Materials*, 165, pp. 987-994.
- Won, SY (1999) Effect of temperature and free ammonia concentration on nitrification of enriched nitrifiers, *J. of Korean Society of Environmental Engineers*, 21(9), pp. 1613-1620. [Korean Literature]
- X. Li., V. Kapoor., C. Impelliteri., K. Chandran. and J. W. Santo Domingo (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.