

부유 성장식 생물학적 폐수처리에 미치는 아연의 영향

Effect of Zinc on the Suspended Growth Biological Wastewater Treatment

서정범[†] · 황창민

Jeong-Beom Seo[†] · Chang-Min Hwang

안양대학교 환경에너지공학과

Department of Environmental & Energy Engineering, Anyang University

(Received April 1, 2015; Revised April 22, 2015; Accepted April 28, 2015)

Abstract : This study was performed to examine the effect of zinc on the biodegradability, nitrification, denitrification and oxygen uptake rate (OUR) using batch reactor and continuous flow stirred tank reactor (CSTR) of anaerobic/anoxic/oxic (A²/O). The results of this study can be summarized as follows. In the case of the effect of zinc on organic treatment, zinc had no effect up to 12 mg/L with batch reactor but biodegradability was lowered when it was above 3.0 mg/L with CSTR. Concerning the case on nitrification and removal of nitrogen, nitrification rate was lowered when zinc was above 6.0 mg/L with batch reactor and removal rate of nitrogen was lowered when zinc was above 3.0 mg/L with CSTR. Removal rate of phosphorus was lowered when it was above 6.0 mg/L zinc with batch reactor and above 3.0 mg/L zinc with CSTR. In the case of OUR, it decreased as microbial activity was affected when zinc concentration was above 3.0 mg/L in CSTR.

Key Words : Zinc Effect, Biodegradability, Nitrification, Denitrification, Oxygen Uptake Rate

요약 : 본 연구에서는 회분식 실험 및 A²/O 공법의 연속식 실험으로 아연이 생분해, 산소 소모율, 질산화 및 탈질에 미치는 영향을 검토하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다. 아연 영향 실험 결과 유기물 분해는 회분식 실험의 경우 아연 농도 12 mg/L까지 영향을 미치지 않았으며, 연속식 실험의 경우 아연 농도 3.0 mg/L 이상일 때 생분해성이 낮아졌다. 질산화 및 질소 제거의 경우 회분식은 아연 농도 6.0 mg/L 이상일 때 질산화율이 낮아졌으며, 연속식의 경우 아연 농도 3.0 mg/L 이상일 때는 질소 제거율이 낮아졌다. 인 제거의 경우 회분식은 아연 농도 6.0 mg/L, 연속식은 아연 농도 3.0 mg/L 이상일 때 인 제거율이 낮아지는 것으로 나타났다. 산소 소모율의 경우 연속식의 아연 농도가 3.0 mg/L 이상이면 미생물 활성에 영향을 주어 산소 소모율이 낮아졌다.

주제어 : 아연 영향, 생분해성, 질산화, 탈질, 산소 소모율

1. 서론

도시의 팽창 및 산업 발달로 인하여 유해물질에 의한 토양, 지하수 및 하천의 오염은 심각한 환경문제를 야기시키고 있다. 이러한 환경 문제는 인류의 생존을 위협하고 있으며 경제가 지속적으로 발전하면서 산업체의 생산 활동이 증가하여 산업폐수 발생량 증가와 함께 오염물질의 다양화를 유발하였다. 여러 업종의 산업폐수에 함유된 난분해성 물질과 독성물질들은 자가 처리시설에서 처리되어 배출허용기준 이내로 배출하는 것이 원칙이나 이를 상회하여 주변 수계로 방류될 경우, 수생 생태계와 수질에 크게 영향을 미치게 된다. 발생폐수는 배출 업체별로 자가 처리를 거쳐 방류되거나 전처리 후 공단 내의 일반 하수와 함께 하수종말처리장 또는 중·소규모 하수종말처리장으로 유입되어 처리된다.

현재 국내의 하수처리는 표준 활성슬러지 공법에서 영양염류 제거(biological nutrient removal, BNR) 공법으로 변화하였다. BNR 공법으로 운전되고 있는 공단 주변의 하수종말처리장은 중금속과 독성물질이 포함된 공단폐수의 유입으로 정상적인 운전이 어려움을 겪고 있다. 산업폐수에는 다

양한 종류의 독성 유기물과 높은 농도의 중금속 및 고농도의 질소를 함유하고 있어 생물학적 고도처리 공정에 심각한 문제를 유발할 수 있다. 이러한 독성 유기물과 유해 중금속의 유입은 활성슬러지 공정에서 미생물의 플록 해체를 유발하며, 반응조 내의 미생물 다양성을 감소시킬 수 있다고 보고되고 있다.¹⁾ 반응조 내 미생물의 다양성이 감소되면 환경변화에 대한 적응성이 떨어지게 되므로 안정적인 공정 운전이 어렵게 된다. 일반적으로 유기물 제거와 관련된 중속영양 미생물의 중금속에 대한 저해효과는 질산화균과 같은 독립영양균 보다 적다고 알려져 있으며,²⁾ 중금속 중에서도 구리와 아연은 비교적 큰 영향을 미친다고 알려졌다.^{1,3,4)} 키쿠라이빈로우⁵⁾ 등은 아연이 활성슬러지에 영향을 미치는 한계 농도를 5~13 mg/L라고 보고하였고, Zhou⁶⁾ 등은 아연 농도 5 mg/L에서 생물 막에 영향을 주었다고 보고하였다. 공장폐수에는 고농도의 중금속이 함유되는 경우가 있는데, 공단 주변에서는 이들 공장폐수가 생활하수와 혼합되어 하수종말처리장으로 유입되고 있다.

중금속과 유해물질을 함유한 폐수가 생물학적 처리시스템 내에 유입 시, 생물학적 처리공정의 처리효율을 저하시키고 독성을 나타낸다. 즉 하수처리장 유입수 내 오염물질 항목

[†] Corresponding author E-mail: jbseo@anyang.ac.kr Tel: 031-467-0892 Fax: 031-467-0789

중 구리, 아연 및 납과 같은 중금속 성분들은 미생물 효소와 반응하여 물질대사의 억제 및 방해로 초래한다.⁷⁾ Adams⁸⁾ 등은 암모니아성 질소 및 아질산염을 기질로 이용하는 질산화균은 유기물의 분해로부터 성장하는 미생물보다 성장속도가 느리기 때문에 효율적인 질산화 반응을 위해서는 비교적 긴 STR가 요구된다고 하였다. 질산화균의 질산화 반응에 미치는 중금속의 저해효과는 여러 연구자들에 의해 보고되었는데,⁹⁻¹¹⁾ 아연 농도 1~3 mg/L 이상에서 질산화 반응에 크게 피해를 주는 것으로 보고한바 있다.

따라서 본 연구에서는 회분식 실험으로 아연이 생분해, 산소 소모율 및 질산화 등에 미치는 영향을 평가하고, 연속식 실험으로 Anaerobic/Anoxic/Oxic (A²/O)공법에 대하여 아연 농도 변화에 따른 생분해, 산소 소모율 및 질소 제거에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험장치

본 연구에 사용된 활성슬러지 회분 반응조를 Fig. 1에 나타내었으며, 연속 흐름 완전혼합 반응조(CSTR)를 Fig. 2에 나타내었다. 회분 반응조의 재질은 아크릴이며 유효용적은 27 L로 4개의 반응조가 사용되었다. 산소 공급은 폭기기와 산기석을 이용하여 용존산소 농도를 2.0~3.5 mg/L로 유지하였다.

연속흐름 BNR 반응조는 아크릴로 2개의 반응조를 동일

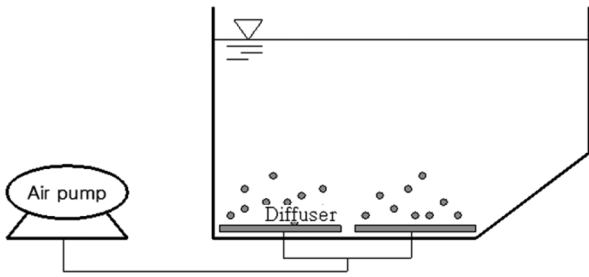


Fig. 1. Schematic diagram of activated sludge batch reactor.

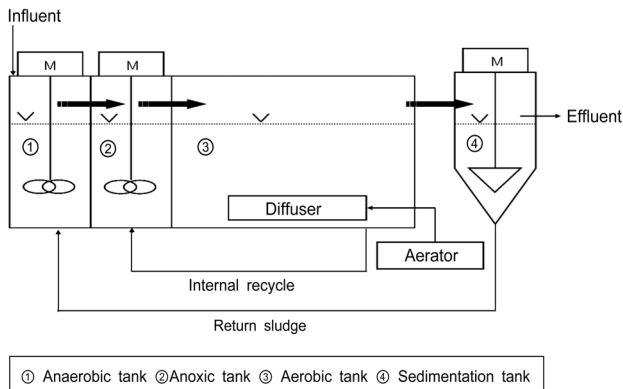


Fig 2. Schematic diagram of CSTR.

한 크기로 제작하였으며 BNR 공정 중 A²/O 공정을 기본으로 하여 혐기조, 무산소조, 호기조 및 최종침전조로 구성하였다. 혐기조, 무산소조, 호기조 및 최종침전조의 유효용적은 각각 1.2 L, 1.2 L, 3.6 L 및 2 L로 하였으며, Hydraulic retention time (HRT)은 각각 1.6 h, 1.6 h, 4.8 h 및 2 h로 하였고, 혐기조와 무산소조는 부유고형물이 침전되지 않도록 각각 30 rpm으로 교반시켰으며, 최종침전조의 회전속도는 1 rpm으로 하였다. 원수의 주입과 내부반송은 Master flux tubing pump (Model CP-90601)를 사용하였다.

2.2. 실험방법

회분식 실험에 사용된 폐수는 S하수종말처리장으로 유입되는 생활하수이며, 회분식 실험을 위한 미생물 슬러지는 A하수종말처리장의 폭기조 슬러지를 채취하여 MLSS 농도가 약 2,000 mg/L가 되도록 적정량을 반응조에 유입시켰다. 그리고 반응조의 나머지는 폐수로 채웠다. 각각의 조건 변화 실험에서 회분반응기의 시료 채취 시간은 1, 2, 4, 6, 8, 12 및 24시간 경과 후이며 BOD는 6, 12 및 24시간 경과 후에만 분석하였다.

아연에 대한 영향 농도를 알아보기 위한 회분식 실험에서는 1,000 mg/L 표준용액을 이용하여 각각 0.25 mg/L, 0.5 mg/L, 0.75 mg/L, 3 mg/L, 6 mg/L, 9 mg/L 및 12 mg/L가 되도록 하였다. 조건 변화에 따른 모든 회분식 실험에서 산소 소모율을 측정하였는데, 산소 소모율은 실험 개시 6시간 후의 폭기액을 채취하여 DO 소모 속도를 구하고 이 값을 MLSS 농도로 나누어서 계산하였다.

연속 흐름 완전혼합 반응기에 유입되는 폐수는 합성폐수를 이용하였으며 미생물 슬러지는 A하수종말처리장의 반송슬러지를 채취하여 합성폐수에 적응시킨 후 실험에 이용하였다. 탄소원으로는 monosodium glutamate, glucose, beef extract, yeast extract와 BACTO™ peptone을 사용하였으며, 기타 미량 원소인 나트륨, 칼슘, 마그네슘 및 철 등을 공급하였다. 인공폐수를 필요한 농도로 희석하여 사용하였다. A²/O 공정은 폭기조의 폭기량, HRT 등이 같은 조건에서 2개의 반응조가 이용되었는데, 내부 반송율은 유입수의 200%, 외부 반송율은 유입수의 50%, MLSS는 2,000±200 mg/L가 유지되도록 운전하였다.

각각의 반응조에 아연 농도를 달리하여 운전하였다. 아연은 각각 1,000 mg/L 표준용액을 이용하여 1.0 mg/L, 2.0 mg/L, 3.0 mg/L 및 4.0 mg/L가 되도록 희석하였다. 각 조건의 변화에 따른 유기물, 질소, 인, SS 및 산소 소모율 등을 측정하였다. 시료의 분석은 수질오염공정시험법¹²⁾ 및 Standard methods¹³⁾에 따라 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 회분 반응기(Batch reactor) 실험

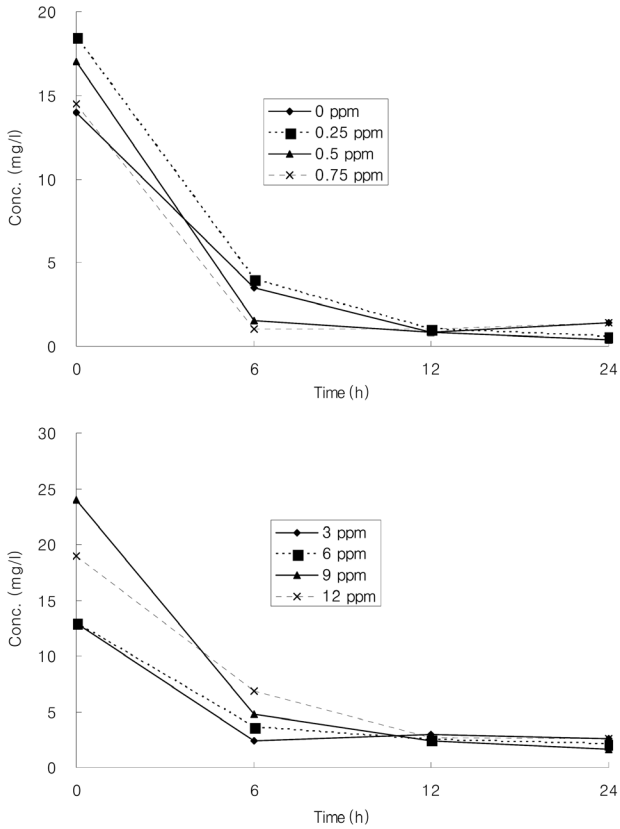


Fig. 3. BOD variation of batch reactor.

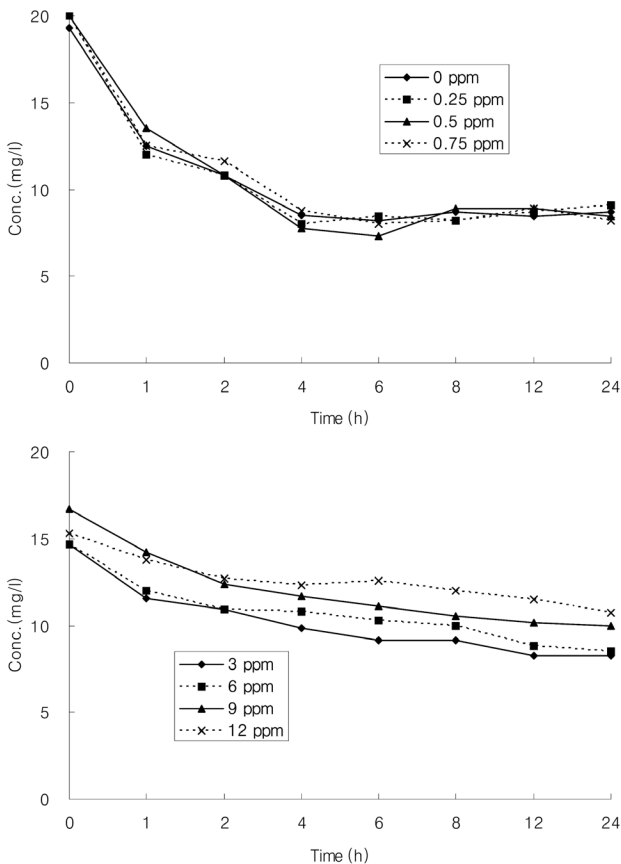


Fig. 4. COD variation of batch reactor.

BOD 실험 결과를 Fig. 3에 나타내었는데, 아연 0.75 mg/L 까지의 낮은 농도에서는 유기물 분해에 영향을 미치지 않아서 6시간 경과 후의 처리수 BOD 농도가 모두 4 mg/L 이하의 낮은 농도를 나타내었으며, 24시간 경과 후에는 아연 농도 0.75 mg/L까지 아연 농도에 관계없이 모두 1.4 mg/L 이하를 나타내었다. 아연 농도를 3 mg/L, 6 mg/L, 9 mg/L 및 12 mg/L로 변화시켜도 유기물 분해에는 큰 영향을 미치지 않았다.

COD 실험 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 아연 농도를 0 mg/L, 0.25 mg/L, 0.5 mg/L 및 0.75 mg/L로 변화시켜도 COD 제거에는 영향을 미치지 않았으며, 6시간 경과 후의 COD 농도가 8.4 mg/L 이하였고, 그 이상의 시간이 경과하여도 COD 농도에는 큰 변화가 없었다. 아연 농도를 3 mg/L, 6 mg/L, 9 mg/L 및 12 mg/L로 변화시켜도 큰 영향을 미치지 않았다.

NH₃-N, (NO₂+NO₃)-N의 실험 결과를 Fig. 5 및 6에 나타내었는데, 4시간 경과 후의 NH₃-N은 아연 0.75 mg/L까지는 모든 회분반응기에서 0값을 나타내었다. (NO₂+NO₃)-N은 NH₃-N과 반대 경향으로 4시간 경과 후에 농도가 5.1~6.7 mg/L의 범위로 크게 높아졌으며 그 이후에는 큰 변화가 없었다. 따라서 아연 0.75 mg/L까지는 질산화에 영향을 미치지 않았으며 반응초기의 NH₃-N가 4시간이 경과하면 대부분 질산화가 일어남을 알 수 있었다.

아연 농도를 3 mg/L, 6 mg/L, 9 mg/L 및 12 mg/L로 높임에 따라 (NO₂+NO₃)-N의 경우 6시간 경과 후 아연 3 mg/L

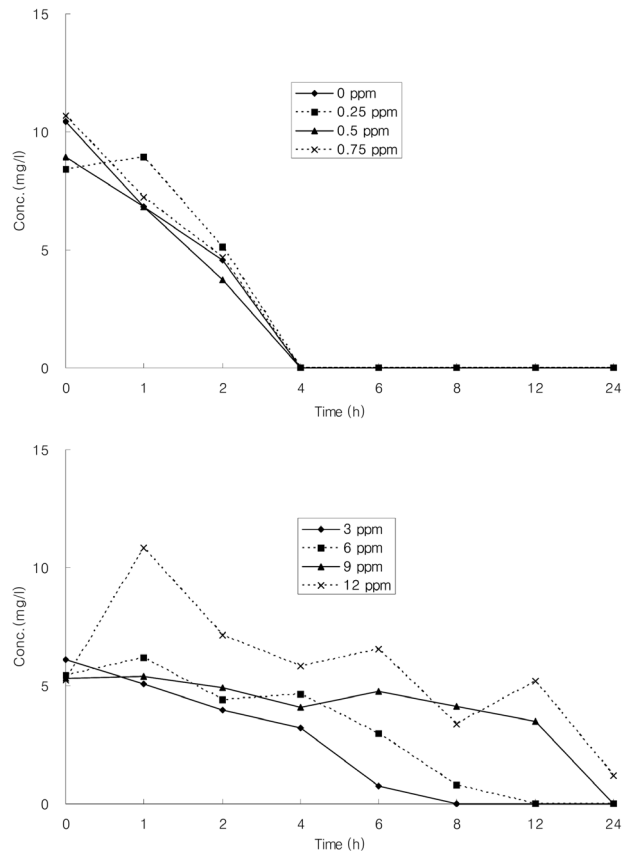


Fig. 5. NH₃-N variation of batch reactor.

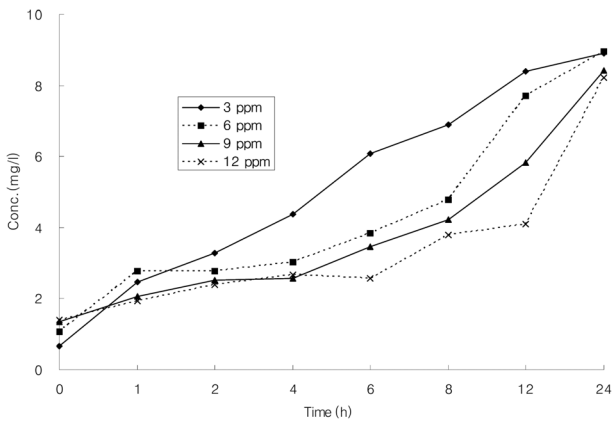
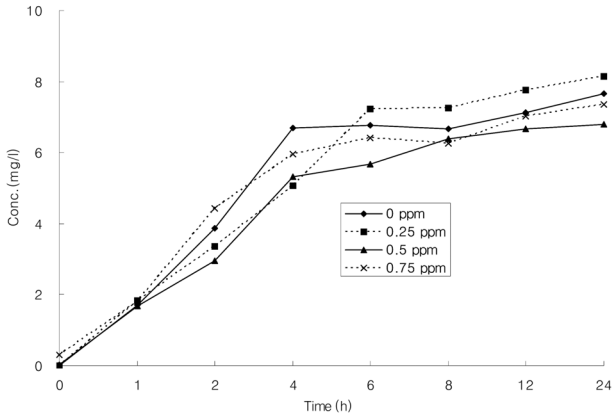


Fig. 6. (NO₂+NO₃)-N variation of batch reactor.

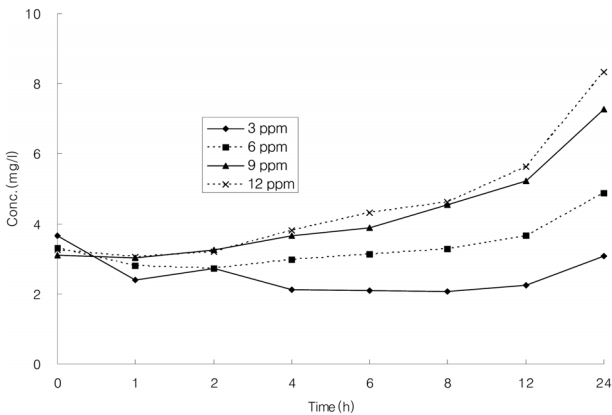
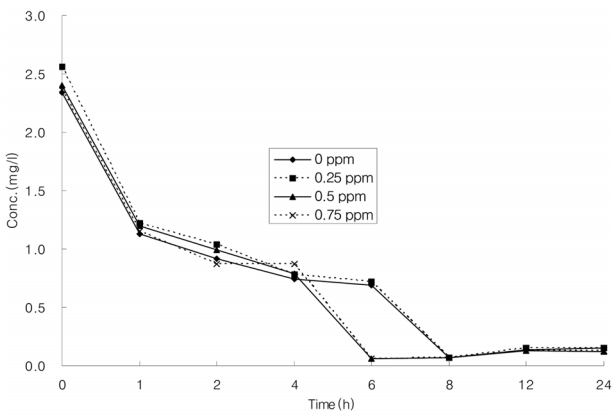


Fig. 7. T-P variation of batch reactor.

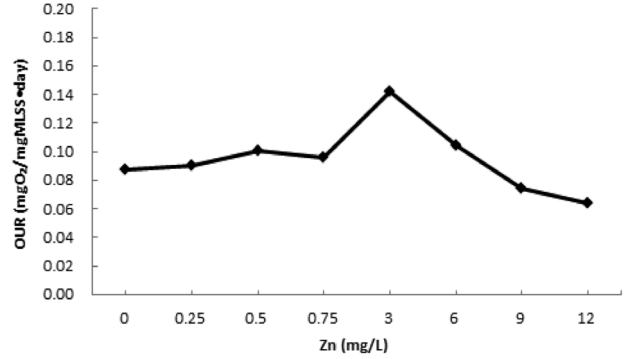


Fig. 8. Result of the OUR test (Batch reactor).

인 경우에는 6.1 mg/L로 높아져 비교적 질산화가 잘 일어났다. 아연 농도가 6 mg/L, 9 mg/L 및 12 mg/L로 높아짐에 따라 6시간 경과 후의 NH₃-N의 농도도 높았으며, (NO₂+NO₃)-N 농도가 각각 3.9 mg/L, 3.5 mg/L 및 2.6 mg/L로 아연 6 mg/L 이상에서는 질산화율이 낮아지는 것으로 사료된다. 이러한 결과는 아연 농도 1~3 mg/L 이상에서 질산화에 나쁜 영향을 미친다는 Benmoussa,⁹⁾ Loveless¹⁰⁾ 및 Ibrahim¹¹⁾의 연구 결과와 차이를 나타내는데, 이는 생물 반응조의 종류, 미생물 농도 등의 차이 때문인 것으로 사료되며, 반응 초기의 NH₃-N 농도가 더 높으면 질산화에 더 큰 영향을 미칠 것으로 사료된다.

T-P 실험 결과를 Fig. 7에 나타내었는데, 반응 초기의 T-P 농도는 인의 섭취가 진행되어 24시간 경과 후에는 아연 농도에 관계없이 모두 0.15 mg/L 이하의 낮은 농도를 나타내었다. 아연 3 mg/L인 경우에는 시간 경과에 따른 T-P 농도 변화가 크지 않았으나 아연 농도가 6 mg/L, 9 mg/L 및 12 mg/L로 증가함에 따라 T-P 농도가 증가하였는데, 이는 아연이 활성슬러지 미생물에 영향을 미쳐서 인을 섭취하지 못하고 오히려 미생물 내의 인이 방출되기 때문인 것으로 판단된다.

아연 농도 변화에 따른 산소 소모율 측정 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 첫 번째의 실험에서는 아연 농도를 0~0.75 mg/L 범위로 실험을 행하였는데, OUR에는 큰 변화가 없었으며 0.087~0.101 mgO₂/mgMLSS·day의 OUR 값을 나타내었다. 두 번째의 실험에서 아연 농도를 3 mg/L에서 12 mg/L까지 단계적으로 높여서 행한 실험 결과 아연 농도가 높아질수록 OUR 값은 점차 감소하여 아연이 미생물 활성에 영향을 미친다는 사실을 알 수 있었다. 아연 농도 3 mg/L에서의 OUR은 0.142 mgO₂/mgMLSS·day였으며 점차 감소하여 아연 12 mg/L에서는 0.064 mgO₂/mgMLSS·day를 나타내었다.

3.2. 연속 흐름 완전혼합 반응기(CSTR) 실험

Table 1은 A²/O 공정을 이용하여 아연 농도 변화에 따른 실험 결과를 요약한 것이다. 수리학적 체류시간(HRT)은 8시간으로 하였으며 반응조 내의 온도 및 pH는 생물학적 처리의 최적조건 범위 내인 22.9~24.3℃ 및 6.7~7.4의 범위를 유지하였다. 아연 농도가 0 mg/L, 1 mg/L 및 2 mg/L인 경

Table 1. Summary of the experimental result (CSTR)

Zn concentration (mg/L)	0	1,0	2,0	3,0	4,0	
Experimental period (day)	11	8	9	8	3	
HRT (h)	8	8	8	8	8	
Temperature (°C)	23,2	23,0	22,9	24,3	23,9	
pH	6,7	6,7	7,2	6,9	7,4	
MLSS (mg/L)	1,660	1,910	2,120	2,250	1,860	
STR (day)	20	24	24	15	7	
F/M ratio (kgBOD/kgMLSS·day)	0,24	0,22	0,20	0,16	0,14	
Influent	153,0					
BOD (mg/L)	Effluent	17,1	14,9	13,7	36,0	51,4
Rem. eff. (%)		88,8	90,3	91,0	76,5	66,4
Influent	226,0					
COD _{Cr} (mg/L)	Effluent	42,7	36,5	34,6	64,0	88,0
Rem. eff. (%)		81,1	83,8	84,7	71,7	61,1
Influent	42,2					
T-N (mg/L)	Effluent	21,7	20,2	21,3	26,8	33,7
Rem. eff. (%)		48,5	52,2	49,6	36,4	20,1
Influent	1,2					
NH ₃ -N (mg/L)	Effluent	0,2	0,1	1,3	3,1	5,9
Influent	0					
NO ₂ -N (mg/L)	Effluent	0	0	0	0	0
Influent	0					
NO ₃ -N (mg/L)	Effluent	10,8	9,5	9,0	10,7	11,2
Influent	14,0					
T-P (mg/L)	Effluent	8,8	7,9	8,9	10,8	11,4
Rem. eff. (%)		37,2	43,7	36,6	22,7	18,9
Effluent	12,5					
SS (mg/L)		12	13,3	21,3	39,3	

우 BOD 제거율이 88.8%, 90.3% 및 91%로 유기물 제거에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으나 아연 농도가 3 mg/L 및 4 mg/L 일 때는 BOD 제거율이 76.5% 및 66.4%로 낮아져 생분해성이 낮아지는 것으로 나타났다. COD 제거율에 있어서도 아연 농도 2.0 mg/L까지는 80% 이상의 제거율을 나타내었으나 아연 농도 3 mg/L 및 4 mg/L에서 COD 제거율이 각각 71.7% 및 61.1%로 낮아져 아연 농도 3 mg/L 이상에서는 유기물 분해에 다소 영향을 미치는 것으로 판단된다.

아연 농도 변화에 따른 T-N 제거율 실험 결과 아연 농도 0 mg/L, 1 mg/L 및 2 mg/L일 때의 제거율이 각각 48.5%, 52.2% 및 49.6%으로 나타났으며, 아연 농도 3 mg/L 및 4 mg/L일 경우에는 제거율이 각각 36.4%, 20.1%로 낮아져 아연 농도 3 mg/L 이상에서는 질소 제거율이 낮아지는 것으로 나타났다.

T-P의 제거율은 아연 농도 0 mg/L, 1 mg/L 및 2 mg/L일 때 각각 37.2%, 43.7% 및 36.6%으로 나타났으며, 아연 농도 3 mg/L 및 4 mg/L일 경우에는 각각 22.7% 및 18.9%로 아연 농도 3 mg/L 이상에서는 인 제거율이 낮아지는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 아연 농도 변화에 따른 BOD 및 COD 실험 결과를 나타낸 것이다. 아연 농도 2 mg/L까지는 처리수의 농도

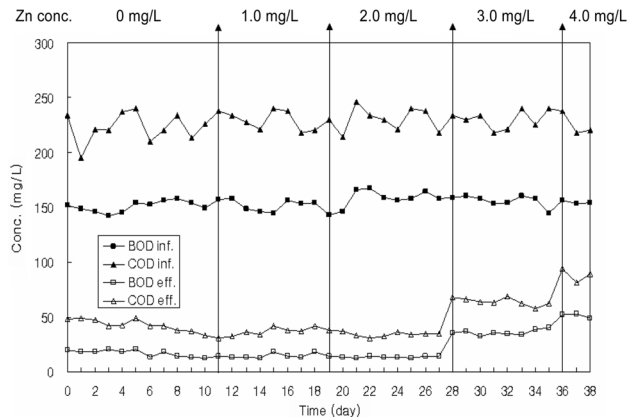


Fig. 9. BOD and COD treatability on the zinc effect.

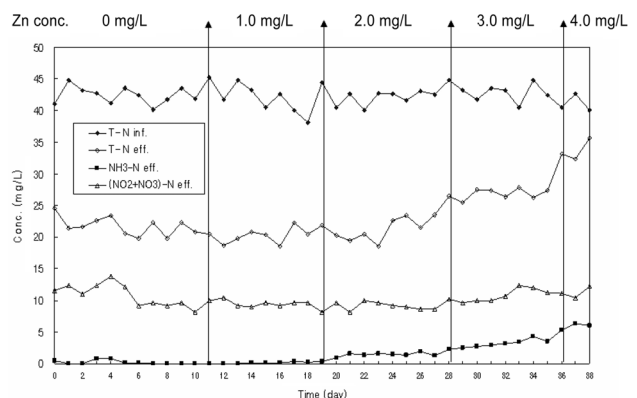


Fig. 10. T-N, NH₃-N and (NO₂+NO₃)-N concentration on the zinc effect.

가 COD의 경우 50 mg/L 이하, BOD의 경우 20 mg/L 이하의 양호한 수질을 나타내었으나 아연 농도 3 mg/L 및 4 mg/L일 때는 처리수 농도가 급격하게 높아지는 경향을 보였다. BOD와 COD는 유사한 경향을 나타내었다. 이러한 결과로부터 아연 농도 3 mg/L 이상일 때는 아연이 유기물 분해를 낮추는 것으로 판단되었다.

Fig. 10은 아연 농도 변화에 따른 T-N, NH₃-N 및 (NO₂+NO₃)-N 실험 결과를 나타낸 것이다. T-N의 경우 아연 농도 2 mg/L까지는 처리수의 농도가 19~25 mg/L 범위로 비슷한 값을 나타내었으나 아연 농도 3 mg/L 및 4 mg/L일 때는 처리수 농도가 높아지는 경향을 보였다. NH₃-N의 경우 아연 농도 1 mg/L까지는 처리수 농도 값이 대부분 0에 가까운 값을 나타내어 질산화가 잘 일어남을 알 수 있었지만, 아연 농도를 점점 높여서 2 mg/L, 3 mg/L 및 4 mg/L로 하였을 때의 처리수 평균 농도가 각각 1.3 mg/L, 3.1 mg/L 및 5.9 mg/L로 높아지는 경향을 보임으로써 아연 농도 2 mg/L 이상에서는 아연이 질산화율을 낮추는 것으로 판단된다. 처리수의 (NO₂+NO₃)-N 농도의 경우 아연 농도에 상관없이 9.0~11.2 mg/L로 큰 변화가 없었다.

Fig. 11은 아연 농도 변화에 따른 T-P 실험 결과를 나타낸 것이다. T-P의 경우 아연 농도 2 mg/L까지는 처리수 평균 농도가 7.9~8.9 mg/L 범위를 나타내었지만, 아연 농도 3 mg/L

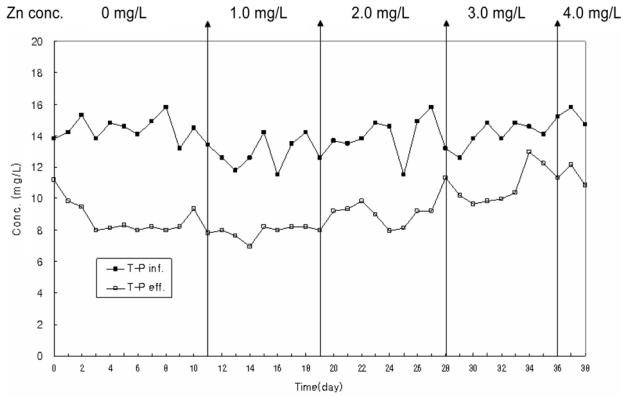


Fig. 11. T-P treatability on the zinc effect.

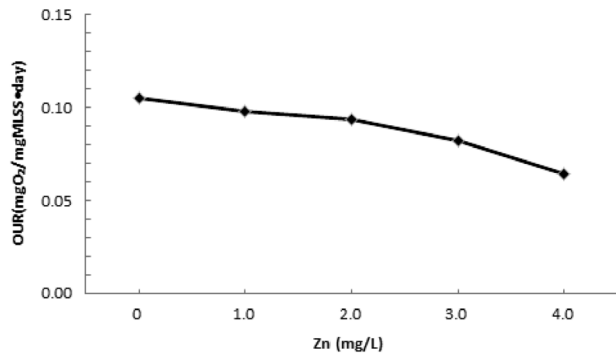


Fig. 12. Result of the OUR test (CSTR).

및 4 mg/L의 경우에는 평균 10.8 mg/L 및 11.4 mg/L로 다소 T-P 제거율이 낮아지는 것으로 나타났다.

아연 농도 변화에 따른 산소 소모율 측정 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 아연 농도 2 mg/L까지는 OUR이 0.094~0.105 mgO₂/mgMLSS·day 범위로 유사한 값을 나타내었으나 아연 농도 3 mg/L 이상에서는 OUR 값이 0.064~0.082 mgO₂/mgMLSS·day로 다소 낮아졌다. 위의 결과로 볼 때 아연 농도 3 mg/L 이상에서는 아연이 미생물 활성을 낮추는 것으로 사료된다.

5. 결론

아연이 부유 성장식 생물학적 공정의 생분해, 질소 제거, 인 제거 및 산소 소모율에 미치는 영향을 검토하기 위한 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 유기물 분해에 미치는 아연 영향 실험 결과 회분식 실험의 경우 아연 농도 12 mg/L까지 큰 영향을 미치지 않았으며, 연속식 실험의 경우 아연 농도가 3 mg/L 이상에서 생분해율이 낮아지는 것으로 나타났다.

2) 질산화 및 탈질에 미치는 아연 영향 실험 결과 회분식 실험의 경우 아연 농도 6.0 mg/L 이상일 때 질산화율이 낮

아지는 것으로 나타났으며, 연속식 실험의 경우 아연 농도 3 mg/L 이상일 때 질소 제거율이 낮아지는 것으로 나타났다.

3) 인 제거에 미치는 아연 영향 실험 결과 회분식 실험의 경우 아연 농도 6.0 mg/L 이상일 때 처리수의 T-P 농도가 증가하였다. 연속식 실험의 경우 아연 농도 3 mg/L 이상에서는 제거율이 크게 떨어지는 것으로 나타났다.

4) 아연 농도에 따른 OUR 측정 결과 연속식 실험의 경우 아연 농도가 3 mg/L 이상이면 아연이 미생물 활성을 낮추는 것으로 나타났다.

KSEE

References

- Lester, J. N., Heavy Metals in Wastewater and Sludge Treatment Processes, In: Vol. II, Treatment and Disposal, CRC Press, Florida, USA.(1987).
- Lee, Y. W., Ong, S. K. and Sato, C., "Effects of heavy metal on nitrifying bacteria," *Water Sci. Technol.*, **36**, 69~74(1997).
- Painter, H. A., "A review of literature on inorganic nitrogen metabolism in microorganisms," *Water Res.*, **4**, 393~450(1970).
- Seo, J. B. and Hwang, C. M., "Effect of copper on the suspended growth biological wastewater treatment," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **35**(7), 479~484(2013).
- 櫻井敏郎 外, 活性汚泥法と維持管理, 産業用水調査會, (1980).
- Zhou, X. H., Yu, T., Shi, H. C. and Shi, H. M., "Temporal and spatial inhibitory effects of zinc and copper on wastewater biofilms from oxygen concentration profiles determined by microelectrodes," *Water Res.*, **45**, 953~959(2011).
- Water Pollution Control Federation, Waste Water Treatment Plant Design, Manual of Practice, No. 8(1977).
- Adams, C. E. and Eckenfelder. W. W., "Nitrification design approach for high strength ammonia wastewaters," *J. Water Pollut. Control Fed.*, **49**, 413~420(1977).
- Benmoussa, H., Martin, G., Richard, Y., Leprince, A., "Inhibition of nitrification by heavy metal cations," *Water Res.*, **20**, 1333~1339(1986).
- Loveless, J. E. and Painter, H. A., "The influence of metal ion concentration and pH values on the growth of a *nitrosomonas* strain isolated from activated sludge," *J. Gen. Microbiol.*, **52**, 1~14(1968).
- Ibrahim, A. M., "Heavy metal inhibition of resting nitrifying bacteria," Proceedings of the 43rd Industrial Waste Conference, Purdue University, Lafayette, IN., Lewis Publishers, pp. 309~318(1989).
- Korean Department of Environment, Standard Methods of Water Quality(2001).
- APHA-AWWA-WEF, Standard Methods 19th ed., American Public Health Association(1995).