

부유 성장식 생물학적 폐수처리에 미치는 구리의 영향

Effect of Copper on the Suspended Growth Biological Wastewater Treatment

서정범[†] · 황창민

Jeong-Beom Seo[†] · Chang-Min Hwang

안양대학교 환경에너지공학과

Department of Environmental & Energy Engineering, Anyang University

(2013년 3월 25일 접수, 2013년 5월 1일 채택)

Abstract : This study was performed to examine the effect of copper 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 copper on organic treatment, the bad effect initiated when it was above 4.5 mg/L copper with batch reactor and above 2.0 mg/L copper with CSTR. Concerning the case on nitrification and removal of nitrogen, it showed bad effect when copper was above 4.5 mg/L with batch reactor for nitrification and 1.0 mg/L with CSTR for the removal of nitrogen. The bad effect on the removal of phosphorus began when it was 4.5 mg/L copper with batch reactor and 2 mg/L copper with CSTR. In the case of OUR, it decreased as microbial activity was affected when copper concentration was above 1.5 mg/L in both case of batch reactor and CSTR.

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

요약 : 본 연구에서는 회분식 실험 및 A₂/O 공법의 연속식 실험으로 구리가 생분해, 산소소모율 및 질산화에 미치는 영향을 검토하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다. 구리 영향 실험 결과 유기물 분해는 회분식 실험의 경우 구리 농도 4.5 mg/L 이상, 연속식은 구리 농도 2.0 mg/L 이상일 때 영향을 미쳤다. 질산화 및 질소 제거의 경우 회분식은 구리 농도 4.5 mg/L 이상에서 질산화에 영향을 미쳤으며, 연속식의 경우 구리 농도 1 mg/L 이상일 때 질소 제거에 영향을 미쳤다. 인 제거의 경우 회분식은 구리 농도 4.5 mg/L, 연속식은 구리 농도 2 mg/L 이상일 때 영향을 미치는 것으로 나타났다. 산소소모율의 경우 회분식과 연속식 모두 구리 농도 1.5 mg/L 이상일 경우 미생물 활성에 나쁜 영향을 주어 산소소모율이 낮아졌다.

주제어 : 구리 영향, 생분해성, 질산화, 탈질, 산소소모율

1. 서론

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

현재 국내의 하수처리는 표준 활성슬러지 공법에서 영양염류제거(Biological Nutrient Removal: BNR) 공법으로 변화하고 있다. BNR 공법으로 운전되고 있는 공단 주변의 하수종말처리장은 중금속과 독성물질이 포함된 공단폐수의 유입으로 정상적인 운전이 어려움을 겪고 있다. 산업폐수에는 다양한 종류의 독성 유기물과 높은 농도의 중금속 및 고농

도의 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 조 건변화에 대한 적응성이 떨어지게 되므로 안정적인 공정운전이 어렵게 된다. 일반적으로 유기물 제거와 관련된 중속 영양 미생물의 중금속에 대한 저해효과는 질산화균과 같은 독립영양균 보다 적다고 알려져 있으며²⁾, 중금속 중에서도 구리는 심각한 영향을 미친다고 알려졌다.^{1,3)} 키쿠라이빈로우⁴⁾ 등은 구리가 활성슬러지에 영향을 미치는 한계 농도를 1 mg/L라고 보고하였고, Zhou⁵⁾ 등은 구리 농도 1.0 mg/L에서 생물막에 영향을 미쳤다고 보고하였다. 공장폐수는 고농도의 중금속이 함유되는 경우가 있는데, 이들 공장폐수가 생활하수와 혼합되어 하수종말처리장으로 유입되고 있다.

중금속과 유해물질을 포함한 중금속 폐수는 생물학적 처리시스템 내에 유입시, 생물학적 처리공정의 처리효율을 저하시키고 독성을 나타낸다. 즉 하수처리장 유입수 내 오염물질 항목 중 Cu, Zn 및 Pb과 같은 중금속 성분들은 미생물 효소와 반응하여 물질대사의 억제 및 방해로 초래한다.⁶⁾ Adams⁷⁾

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

등은 암모니아성 질소 및 아질산염을 기질로 이용하는 질산화균은 유기물의 분해로부터 성장하는 미생물보다 성장속도가 느리기 때문에 효율적인 질산화 반응을 위해서는 비교적 긴 SRT가 요구된다고 하였다. 질산화균의 질산화 반응에 미치는 중금속의 저해효과는 여러 연구자들에 의해 보고되었다. Arvin 및 Kristensen⁸⁾에 의하면 구리는 0.1~0.5 mg/L로 보고하였고, Lovelss 및 Painter⁹⁾는 구리 농도 0.1 mg/L 이상에서 질산화 반응이 일어나지 않음을 보고한바 있다.

따라서 본 연구에서는 회분식 실험으로 구리가 생분해, 산소소모율 및 질산화 등에 미치는 영향을 평가하고, 연속식 실험으로 Anaerobic/Anoxic/Oxic (A²O)공법에 대하여 구리 농도 변화에 따른 생분해, 산소소모율 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 동일한 크기로 제작하였으며 BNR 공정 중 A²O 공정을 기본으로 하여 혐기조, 무산소조, 호기조 및 최종침전조로 구성하였다.

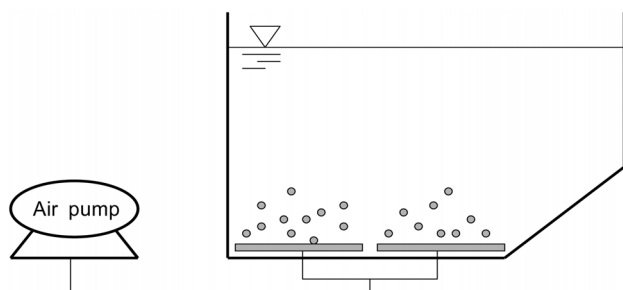


Fig. 1. Schematic diagram of activated sludge batch reactor.

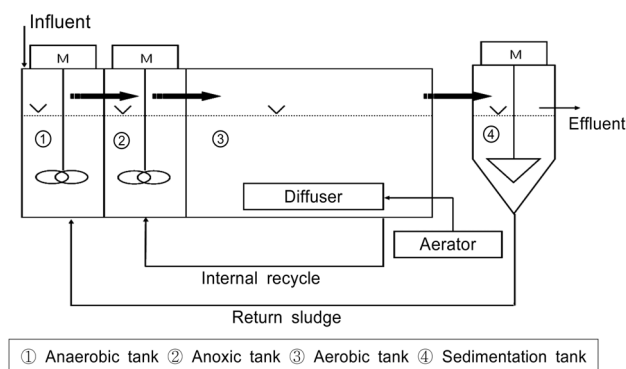


Fig. 2. Schematic diagram of CSTR.

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 hr, 1.6 hr, 4.8 hr 및 2 hr로 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.

구리에 대한 영향 농도를 알아보기 위한 회분식 실험에서는 1,000 mg/L 표준용액을 이용하여 각각 0.1 mg/L, 0.2 mg/L, 0.3 mg/L, 0.5 mg/L, 1.5 mg/L, 3 mg/L 및 4.5 mg/L가 되도록 하였다. 조건 변화에 따른 모든 회분식 실험에서 산소소모율을 측정하였는데, 산소소모율은 실험 개시 6시간 후의 폭기액을 채취하여 DO 소모 속도를 구하고 이 값을 MLSS 농도로 나누어서 계산하였다.

연속흐름 완전혼합 반응기에 유입되는 폐수는 합성폐수를 이용하였으며 미생물 슬러지는 A하수종말처리장의 반응슬러지를 채취하여 합성폐수에 적응시킨 후 실험에 이용하였다. 탄소원으로는 monosodium gluamate, glucose, beef extract, yeast extract와 BACTOTM peptone를 사용하였으며, 기타 미량 원소인 나트륨, 칼슘, 마그네슘 및 철 등을 공급하였다. 인공 폐수를 필요한 농도로 희석하여 사용하였다. A²O 공정은 폭기조의 폭기량, HRT 등이 같은 조건에서 2개의 반응조가 이용되었는데, 내부반송율은 유입수의 200%, 외부반송율은 유입수의 50%, MLSS는 2,000±200 mg/L 유지되도록 운전하였다.

각각의 반응조에 구리 농도를 달리하여 운전하였다. 구리는 각각 1,000 mg/L 표준용액을 이용하여 0.5 mg/L, 1.0 mg/L, 1.5 mg/L, 2.0 mg/L 및 2.5 mg/L가 되도록 희석하였다. 각 조건의 변화에 따른 유기물, 질소, 인, SS 및 산소소모율 등을 측정하였다. 시료의 분석은 수질오염공정시험법¹⁰⁾ 및 Standard methods¹¹⁾에 따라 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 회분 반응기(Batch reactor) 실험

BOD 실험결과를 Fig. 3에 나타내었는데, 구리 농도 0.1 mg/L, 0.2 mg/L, 0.3 mg/L의 반응조에서는 6시간 경과 후 구리 농도에 관계없이 모두 2.0 mg/L 이하의 낮은 농도를 나타내어 구리 농도 0.3 mg/L까지는 유기물 분해에 영향을

미치지 않음을 알 수 있었다. 구리 농도 0.5 mg/L, 1.5 mg/L, 3 mg/L, 4.5 mg/L에서는 6시간 경과 후 폐수 내의 구리 농도가 3 mg/L 이하일 때는 BOD 농도가 3.4 mg/L 이하였으나 구리 농도가 4.5 mg/L일 때는 16.5 mg/L의 높은 농도를 나타내었다. 12시간 이상 경과 후 폐수 내의 구리 농도별 BOD 농도에는 큰 차이가 없었다.

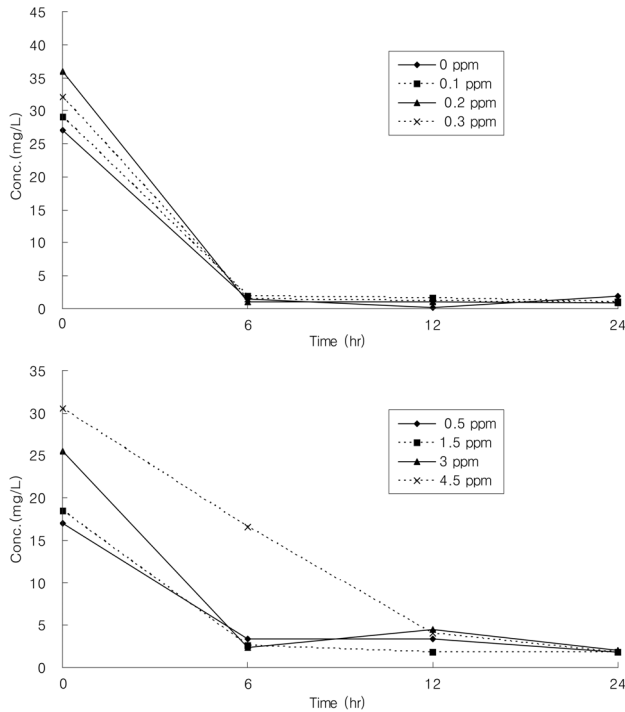


Fig. 3. BOD variation of batch reactor.

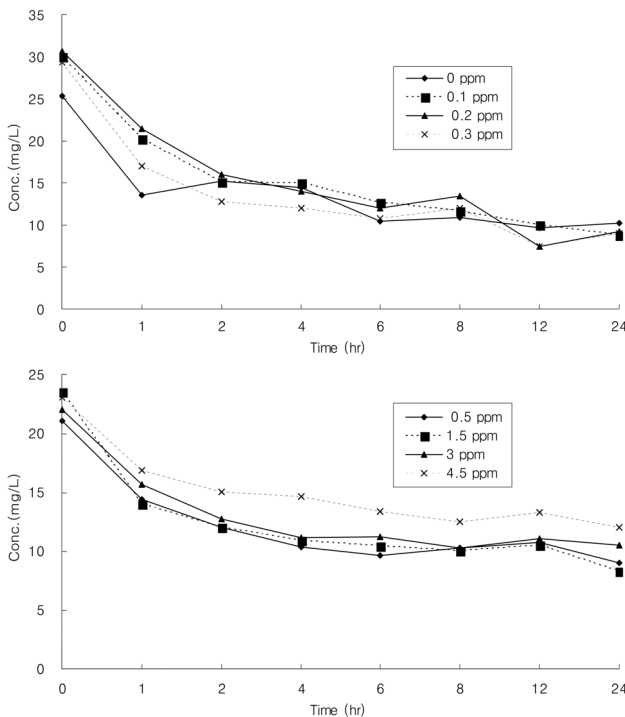


Fig. 4. COD variation of batch reactor.

Fig. 4는 폐수 내 구리 농도 변화에 따른 COD 실험 결과를 나타낸 것으로서 반응 초기의 COD 농도는 21.0~23.5 mg/L 범위였으며, 구리 농도 3 mg/L 이하일 때 6시간 경과 후의 COD 농도는 11.2 mg/L 이하로 비슷한 값을 나타내었으나 구리 농도 4.5 mg/L일 때는 COD 농도가 13.3 mg/L로 다소 높았다. 이러한 경향은 시간이 12시간, 24시간 경과 후에도 유사하

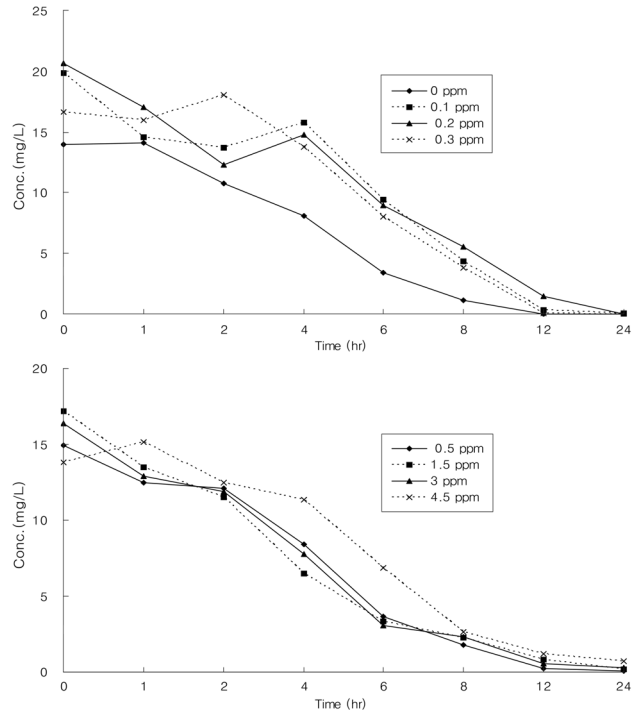


Fig. 5. NH₃-N variation of batch reactor.

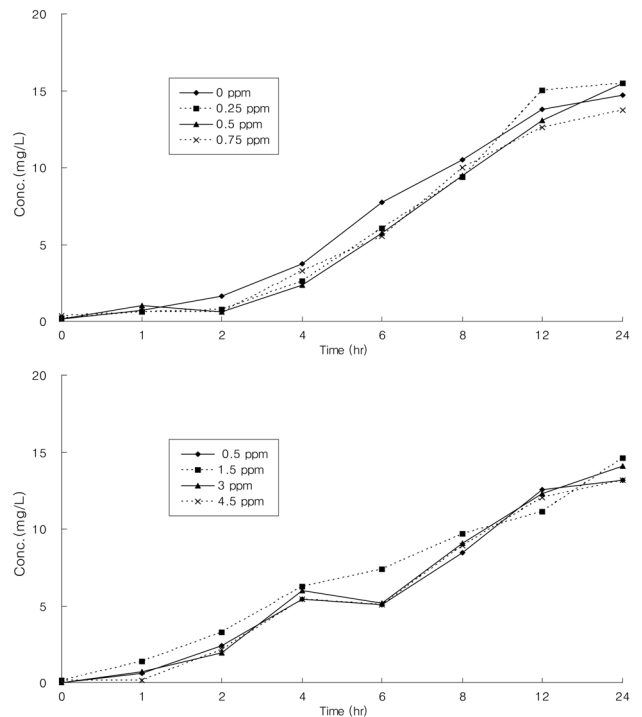


Fig. 6. (NO₂+NO₃)-N variation of batch reactor.

였다. 이러한 결과로부터 구리 농도 4.5 mg/L일 때는 구리가 유기물 분해에 다소의 나쁜 영향을 미치는 것으로 판단된다.

NH₃-N 실험 결과를 Fig. 5에 나타내었는데, NH₃-N의 경우 구리 농도가 3.0 mg/L 이하일 때는 유사한 경향을 나타내지만 구리 농도가 4.5 mg/L일 때는 6시간이 경과할 때까지 구리 농도가 3.0 mg/L 이하일 때 보다 감소속도가 느렸으며 8시간 이상 경과하였을 때는 구리 농도에 관계없이 유사한 NH₃-N 농도를 나타내었다. 따라서 구리 농도 4.5 mg/L 이상에서는 구리가 질산화에 다소의 영향을 미치는 것으로 사료된다. 이러한 결과는 구리 농도 0.1~0.5 mg/L에서 질산화에 나쁜 영향을 미친다는 Arvin 및 Kristensen⁸⁾와 Lovelss 및 Painter⁹⁾의 연구 결과와 큰 차이를 나타내는데, 이는 생물반응조의 종류, 미생물 농도 등의 차이 때문인 것으로 사료된다. 12시간이 경과하면 NH₃-N의 농도가 대부분 0에 가까운 값을 나타내어 질산화가 완전히 이루어짐을 알 수 있었다.

Fig. 6은 (NO₂+NO₃)-N 실험결과로서 본 연구에서 행한 구리 농도 범위에서는 구리 농도가 질산화에 미치는 영향이 관찰되지 않았으며, Fig. 5의 NH₃-N 농도가 감소함에 따라 (NO₂+NO₃)-N은 시간 경과에 따라 증가하였다.

Fig. 7은 구리 농도 변화에 따른 T-P 실험 결과를 나타낸 것으로 구리 농도가 3.0 mg/L 이하일 경우에는 4시간이 경과할 때까지 감소하다가 6시간이 경과하면 다소 증가한 후, 더 이상의 시간이 경과하여도 유사한 값을 나타내었다. 구리 농도가 4.5 mg/L일 경우에도 경향은 유사하나 4시간 경과 후부터 T-P 농도가 높아지며 그 증가 폭이 구리 3.0 mg/L 이하일 경우보

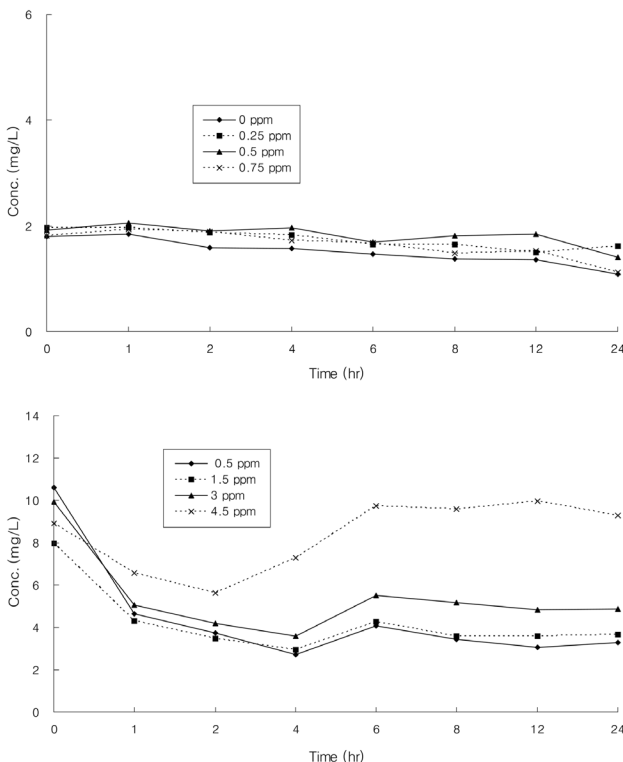


Fig. 7. T-P variation of batch reactor.

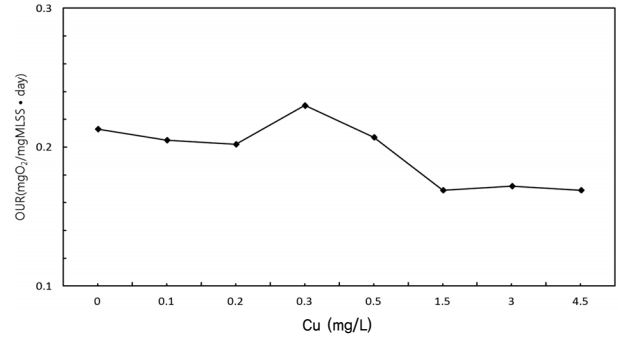


Fig. 8. Result of the OUR test (Batch reactor).

다 더 크게 나타났다. 따라서 구리 농도가 4.5 mg/L 이상일 경우에는 미생물에 다소의 영향을 미치는 것으로 사료된다.

구리 농도 변화에 따른 산소소모율 측정결과를 Fig. 8에 나타내었다. 구리 농도 0.5 mg/L까지는 OUR이 0.2 mgO₂/mg MLSS·day 이상으로 유사한 값을 나타내었으나 구리 농도 1.5 mg/L 이상에서는 OUR 값이 0.169~0.172 mgO₂/mgMLSS·day로 다소 낮아졌다.

3.2. 연속흐름 완전혼합 반응기(CSTR) 실험

Table 1은 A²/O 공정을 이용하여 구리 농도 변화에 따른 실험결과를 요약한 것이다. 반응조 내의 온도는 23.0~24.9°C의 범위를 유지하였으며, pH는 6.8~7.2의 범위로 중성에 가깝게 유지하였다. 구리 농도가 0 mg/L, 0.5 mg/L 1.0 mg/L 및 1.5 mg/L의 경우 평균 BOD 제거율이 각각 89.7%, 90.5%, 87.0 및 86.6%로 유기물 제거에 영향을 미치지 않는 처리수의 BOD 농도가 20 mg/L 이하의 양호한 수질을 나타내었으나 구리 농도가 2 mg/L 및 2.5 mg/L일 때는 BOD 제거율이 78.8% 및 70.3%로 구리 농도 2.0 mg/L 이상에서는 BOD 제거에 영향을 미치는 것으로 나타났다. COD 제거율에 있어서도 BOD와 유사한 경향으로 구리 농도 2 mg/L 및 2.5 mg/L에서 평균 COD 제거율이 76.8% 및 70.6%로 다소 나쁜 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 또한 구리 농도 2.5 mg/L 이상에서는 슬러지 팽화(Bulking)현상이 일어나 더 이상 실험을 진행할 수가 없었다.

구리 농도에 따른 T-N 제거율의 경우 구리 농도가 0.5 mg/L까지는 50% 이상의 양호한 제거율을 나타내었으며, 구리 농도 1 mg/L, 1.5 mg/L, 2 mg/L 및 2.5 mg/L일 경우에는 평균 제거율이 각각 37.0%, 29.4%, 22.9% 및 13.9%로 구리 1 mg/L 이상에서는 질소 제거에 악 영향을 미치는 것으로 나타났다. T-P의 경우 구리 농도가 증가함에 따라 제거율이 점차 감소하는 경향을 나타내었는데, 특히 2 mg/L 이상에서 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 구리 농도 변화에 따른 BOD 및 COD의 실험 결과를 나타낸 것이다. 구리 농도 1 mg/L까지는 처리수의 BOD 농도가 평균 16 mg/L 이하로 양호한 수질을 나타내었으며, 구리 농도가 1.0 mg/L 및 1.5 mg/L로 높아짐에 따라 처리수의 BOD 농도도 다소 높아지기는 하였으나 평균 20 mg/L

Table 1. Summary of the experimental result (CSTR)

Cu Concentration (mg/L)		0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Experimental period (day)		10	9	9	4	8	4
HRT (hr)		8	8	8	8	8	8
Temperature (°C)		23,0	23,0	24,6	23,2	24,9	24,8
pH		6,8	6,8	6,9	7,2	7,1	7,2
MLSS (mg/L)		2,150	1,950	2,040	1,980	2,280	2,120
SRT (day)		25	17	18	12	8	5
F/M ratio (kgBOD/kgMLSS·day)		0,19	0,21	0,20	0,20	0,16	0,15
BOD (mg/L)	Influent					153,0	
	Effluent	15,8	14,5	19,9	20,4	32,5	45,5
	Rem. (%)	89,7	90,5	87,0	86,6	78,8	70,3
COD (mg/L)	Influent					226,0	
	Effluent	38,7	37,8	44,7	51,1	52,3	66,5
	Rem. eff.(%)	82,9	83,3	80,2	77,4	76,8	70,6
T-N (mg/L)	Influent					42,2	
	Effluent	19,9	20,1	26,6	29,8	32,5	36,4
	Rem. eff.(%)	52,9	52,4	37,0	29,4	22,9	13,9
NH ₃ -N (mg/L)	Influent					1,2	
	Effluent	0	0,6	5,4	9,4	8,7	9,7
NO ₂ -N (mg/L)	Influent	0	0	0	0	0	0
	Effluent	0	0	0	0	0	0
NO ₃ -N (mg/L)	Influent					0	
	Effluent	10,6	8,6	9,5	11,6	10,7	10,8
T-P (mg/L)	Influent					14,0	
	Effluent	7,7	8,2	8,7	9,0	10,5	11,9
	Rem. eff.(%)	44,7	41,5	37,5	36	25,2	14,7
SS (mg/L)	Effluent	13,1	17,6	16,8	25,6	14	62,3

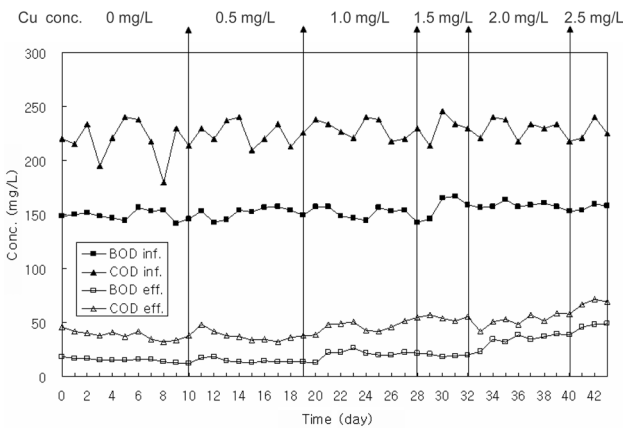


Fig. 9. BOD and COD treatability on the copper effect.

이하의 양호한 수질을 나타내었다. 구리 농도가 2.0 mg/L 및 2.5 mg/L로 높아지면서 처리수의 BOD 수질도 악화되는 경향을 보였는데, 평균 BOD 농도가 각각 32.5 mg/L 및 45.4 mg/L로 처리효율은 각각 78.8% 및 70.3%로 낮아졌다. COD도 BOD와 유사한 경향을 나타내었다. 이러한 결과로부터 구리 농도 2.0 mg/L 이상일 때는 유기물 분해에 악 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

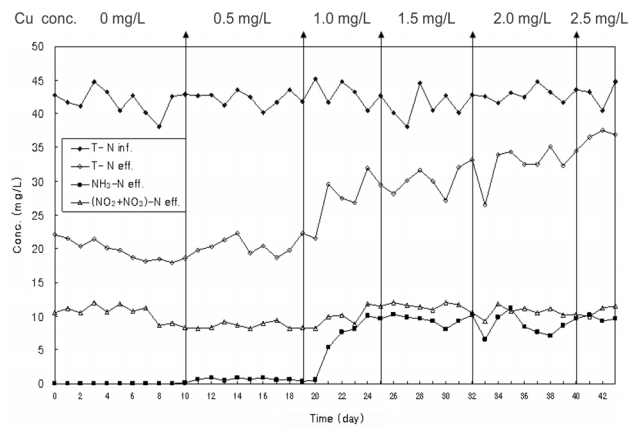


Fig. 10. T-N, NH₃-N and (NO₂ + NO₃)-N concentration on the copper effect.

Fig. 10은 구리 농도 변화에 따른 T-N, NH₃-N 및 (NO₂+NO₃)-N 실험 결과를 나타낸 것이다. 구리 농도 0.5 mg/L까지는 처리수의 T-N 농도가 약 20 mg/L로 비슷한 값을 나타내었으나 구리 농도가 1.0 mg/L, 1.5 mg/L, 2.0 mg/L 및 2.5 mg/L로 높아짐에 따라 처리수의 T-N 농도가 크게 높아지는 경향을 보였다.

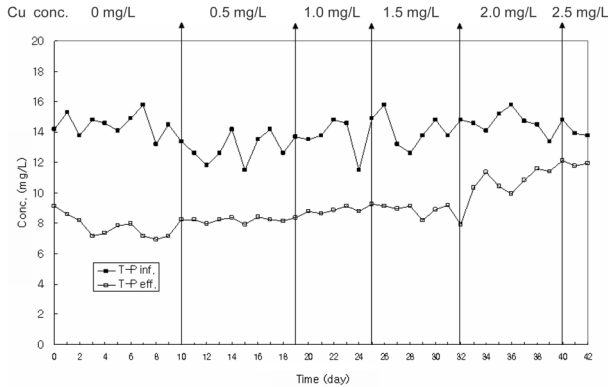


Fig. 11. T-P treatability on the copper effect.

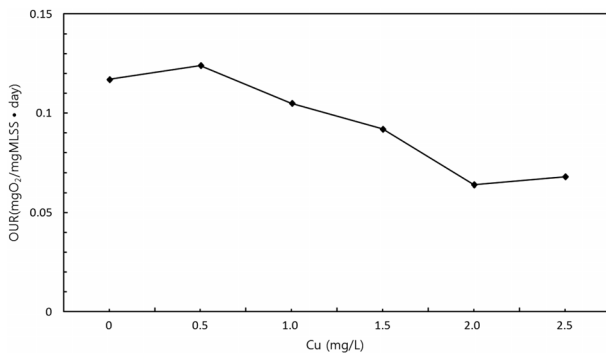


Fig. 12. Result of the OUR test (CSTR).

NH₃-N의 경우 구리 농도 0.5 mg/L까지는 처리수 농도가 대부분 0에 가까운 값을 나타내어 완전한 질산화가 일어남을 알 수 있었지만, 구리 농도 1 mg/L, 1.5 mg/L, 2 mg/L 및 2.5 mg/L일 때 처리수 평균 농도가 각각 5.4 mg/L, 9.4 mg/L, 8.7 mg/L 및 9.7 mg/L로 높아지는 경향을 보여 구리 1.5 mg/L 이상에서는 질산화에 약 영향을 미치는 것으로 판단되었다. (NO₂+NO₃)-N의 경우 구리 농도에 상관없이 8.6 mg/L~11.6 mg/L로 나타났다.

Fig. 11은 구리 농도 변화에 따른 T-P 실험 결과를 나타낸 것이다. T-P의 경우 구리 농도 1.5 mg/L까지는 처리수 농도 7.7 mg/L~9.0 mg/L 범위를 나타내었지만, 구리 농도 2 mg/L 및 2.5 mg/L의 경우 각각 평균 10.5 mg/L 및 11.9 mg/L로 구리 2 mg/L 이상에서 다소 나쁜 영향을 미치는 것으로 나타났다.

구리 농도 변화에 따른 산소소모율 측정결과를 Fig. 12에 나타내었다. 구리 농도 1.0 mg/L까지는 산소소모율이 1.0 mgO₂/mgMLSS·day 이상의 값을 나타내었으나 구리 농도 1.5 mg/L 이상에서는 산소소모율 값이 점점 낮아졌다. 구리 농도 1.5 mg/L 이상일 때 미생물 활성에 나쁜 영향을 미치는 것으로 사료된다.

4. 결론

구리가 부유성장식 생물학적 공정의 생분해, 질소 제거, 인 제거 및 산소소모율에 미치는 영향을 검토하기 위한 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 유기물 분해에 미치는 구리 영향 실험 결과 회분식 실험의 경우 Cu 농도 4.5 mg/L 이상일 때 유기물 분해에 다소의 나쁜 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 연속식 실험의 경우 구리 농도가 2 mg/L 이상일 때 유기물 제거에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

2) 질산화 및 탈질에 미치는 구리 영향 실험 결과 회분식 실험의 경우 구리 농도 4.5 mg/L 이상일 때 질산화에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 연속식 실험의 경우 구리 농도 1 mg/L 이상에서 질소 제거에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

3) 인 제거에 미치는 구리 영향 실험 결과 회분식 실험의 경우 구리 농도 4.5 mg/L 이상일 때 인 섭취에 다소 영향을 미치는 것으로 나타났다. 연속식 실험의 경우 구리 2 mg/L 이상에서 다소 나쁜 영향을 미치는 것으로 나타났다.

4) 구리 농도에 따른 산소소모율 측정결과 회분식과 연속식 모두 구리 농도 1.5 mg/L 이상일 때 미생물 활성에 나쁜 영향을 미치는 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 안양대학교 안식년 연구기간 동안 수행되었으며, 이에 감사드립니다

KSEE

참고문헌

- 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).
- 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).
- Adams, C. E. and Eckenfelder. W. W., "Nitrification design approach for high strength ammonia wastewaters," *J. Water Pollut. Control Fed.*, **49**, 413~420(1977).
- Water Pollution Control Federation, Waste Water Treatment Plant Design, Manual of Practice, No. 8(1977).
- Arvin, E. and Kristensen, G. H., "Exchange of organics, phosphate and cation between sludge and water in biological phosphorus and nitrogen removal processes," *Water Sci. Technol.*, **17**, 147~162(1985)
- 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)
- APHA-AWWA-WEF, Standard Methods 19th ed., American Public Health Association(1995).
- Korean department of Environment, Standard Methods of Water Quality(2001).