

활성슬러지공정에서 구리의 거동에 관한 연구

박진도¹⁾ · 이학성*

¹⁾울산과학기술대학교 환경화학공학과, 울산대학교 생명화학공학과
(2010년 4월 21일 접수; 2010년 8월 10일 수정; 2010년 8월 13일 채택)

A Study on the Cu²⁺ Behavior in Activated Sludge Process

Jin Do Park¹⁾, Hak Sung Lee*

¹⁾Department of Environmental & Chemical Industry, Ulsan College, Ulsan 680-749, Korea
School of chemical Engineering and BioEngineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea
(Manuscript received 21 April, 2010; revised 10 August, 2010; accepted 13 August, 2010)

Abstract

The behavior of copper throughout the whole process of wastewater treatment plant that uses the activated sludge process to treat the wastewater of petrochemical industry that contains low concentration of copper was investigated. Total inflow rate of wastewater that flows into the aeration tank was 697 m³/day with 0.369 mg/L of copper concentration, that is, total copper influx was 257.2 g/day. The ranges of copper concentrations of the influent to the aeration tank and effluent from the one were 0.315 ~ 0.398 mg/L and 0.159 ~ 0.192 mg/L, respectively. The average removal rate of copper in the aeration tank was 50.8 %.

The bioconcentration factor (BCF) of copper by microbes in the aeration tank was 3,320. The accumulated removal rate of copper throughout the activated sludge process was 71.3%, showing a high removal ratio by physical and chemical reactions in addition to biosorption by microbes. The concentration of copper in the solid dehydrated by filter press ranged from 74.8 mg/kg to 77.2 mg/kg and the concentration of copper by elution test of waste was 2.690 ~ 2.920 mg/L. It was judged that the copper concentration in dehydrated solid by bioconcentration could be managed with the control of that in the influent.

Key Words : Bioconcentration factor, Copper, Activated Sludge Process, Biosorption, Heavy metals

1. 서론

산업폐수에 포함되어 강 및 바다로 배출되는 중금속은 미생물에 의해 분해되지 않고 환경과 생물체 내에 계속적으로 축적된다. 특히 중금속을 촉매 또는 조촉매로 취급하는 석유화학 산업공정에서 발생하는 폐수 중에는 많은 종류의 중금속이 포함되어 있으며, 폐

수처리공정에서 미처리된 중금속은 자연 수계에 유출되거나, 잉여슬러지에 농축되어 소각, 매립 후 용출에 의하여 자연환경에 유출되어 환경적 문제점을 발생시키고 있다. 중금속이 함유된 폐수처리는 이온교환법, 물리·화학처리법, 활성탄 흡착 및 생물학적 흡착 등에 의해 처리하고 있으나, 폐수의 발생량이 많고 구리의 농도가 폭기조 미생물 생존에 영향을 미치지 않은 저농도 폐수의 경우 일반적으로 전처리를 실시하지 않고 생물학적 처리공정에 유입시켜 처리하고 있다. 폐수 중에는 중금속이 저농도로 포함되어 있지만 폭기조 내 미생물에 의해 분해가 되지 않으므로 생물농

*Corresponding author : Hak Sung Lee, School of chemical Engineering and BioEngineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea
Phone: +82-52-259-2252
E-mail: hslee@mail.ulsan.ac.kr

Table 1. Dimension of the activated sludge units

Facility	Capacity (m ³)	Dimension (m)	Number of chamber	Surface loading rate(m/hr)	Hydraulic Retention time(hr)
Aeration tank	1,385	9W×9L×5.7H	3	-	41.7
1st settling tank	123	∅7×3.2H	1	18.1	4.2
2nd settling tank	99	∅6.5×3H	1	21.0	3.4

에 의해 가동되고 있는 K공장 공정폐수처리장을 대상으로 수행되었다. 대상 폐수처리공정은 생산 시설 내 염화구리 (CuCl₂)를 촉매로 사용한 공정에서 발생하는 구리를 함유한 공정폐수가 160 m³/day, 그 외 구리를 함유하지 않은 폐수가 200 m³/day가 발생되고 있다. 구리를 함유한 폐수는 난분해성 유기물성분과 다량의 유기염소성분 (organic-Cl)이 포함되어 있어 생물학적 처리가 잘 되지 않아 희석수 261 m³/day를 사용하여 생물학적 분해가 가능한 농도로 희석하여 생물학적 처리를 하고 있다.

폐수처리공정의 흐름도와 시료를 채취한 지점을 Fig. 1에 나타내었다. 시료는 4시간 간격으로 1일 6회에 걸쳐 일정량을 채취하고 혼합 후 대표시료를 만들었다. 또한 폭기조에서 구리의 제거 현황을 확인하기 위해 20일간 폭기조 유입부와 유출부에서 시료를 채취하여 구리의 거동을 살펴보고, 폭기조 내에서 미생물에 의한 생물농축계수를 확인하였다. 시료 채취 시 폐수처리공정의 수리학적 자료를 Table 1에 나타내었다.

2.2. 분석방법

구리 (Cu²⁺)의 분석은 수용액 중의 농도분석과 고형물 내의 함량분석으로 나누어 실시하였다. 수용액 상의 구리분석법은 폐기물공정시험법에 따라 실시하였으며, 고형물 또는 혼합액 (mixed liquor) 내의 구리 (Cu²⁺)의 분석은 강산 (질산+과염소산)으로 유기물을 완전히 분해하여 전처리 후 폐기물공정시험법에 따라 분석을 실시하였다. 또한 용출시험은 폐기물공정시험방법의 용출시험방법에 따라 시료를 일정 크기로 파쇄한 후 증류수에 HCl 용액을 가하여 pH 5.8 ~ 6.3으로 조절한 용출액을 시료 100 g에 대하여 1:10의 비율로 1,000 mL을 혼합 후 진폭 5 cm, 200 rpm에서 6시간 동안 진탕하여 용출시키고, 여과 후 정량범위내로 희

석 또는 원액자체를 분석하였다. 모든 분석과정에서 구리 분석 시료의 전처리는 정량범위 내에 들도록 농축 또는 희석하였으며, 폐기물공정시험방법에 따라 원자흡광광도계 (USA, Perkin Elmer 3100)를 이용하여 324.7 nm에서 전처리한 시료용액의 흡광도를 측정하고 미리 작성한 검량선으로부터 구리의 양을 구하고 농도를 산출하였으며, 바탕시험을 행하고 보정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 시료채취 지점별 구리의 농도

Fig. 1에 나타낸 각 지점에서 2.1의 시료 채취 방법에 따라 시료를 채취하여 구리 농도를 분석한 결과를 Table 2에 나타내었다. 유입수 (influent)는 구리를 함유한 폐수와 구리를 함유하지 않은 폐수로 구별되며, 구리를 함유한 폐수의 구리 농도는 1.409 mg/L 이었다.

공정 피트 (pit)폐수 및 우수는 물리화학 처리시설로 유입시켜 폐수 중 구리를 중화, 침전시킨 처리수는 저장조 (storage tank)로 이송되어 공정 폐수와 혼합되며 구리의 농도는 0.945 mg/L로 나타났다. 희석조 (dilution tank)는 폐수 중 유기물 및 염소성분이 다량 함유되어 있어 원활한 생물학적 폐수처리를 위하여 희석수 (raw water)를 적당량 혼합한 상태로서 구리의 농도는 0.369 mg/L로 나타났다. 폭기조 (aeration tank) 시료는 폭기조 혼합액 (mixed liquor)을 30분간 정치한 후 상등액을 채취하여 구리의 함량을 분석하였으며, 그 농도는 0.191 mg/L로 나타났다. 반송조 (return sludge tank) 또한 혼합액을 30분간 침강시켜 고액분리 후 상등액을 채취하여 분석하였고, 폭기조 상등액의 농도와 유사한 0.181 mg/L로 나타났다. 방류수 (effluent) 중 구리의 농도는 0.106 mg/L로 나타났으며, 환경보전법의 폐수배출허용기준 농도인 3

Table 2. Concentration of copper (Cu^{2+}) in sampling points

No.	Sampling point	Concentration (mg/L)	Flow rate (m ³ /day)	Total Cu (g/day)	Remark
1	Influent (with Cu)	1.409	110.00	155.0	Liquid
2	Physical and chemical treatment	0.300	50.00	15.0	Liquid
3	Storage tank	0.945	160.00	151.2	Liquid
4	Dilution water	0.000	261.00	0.0	Liquid
5	Influent (without Cu)	0.000	200.00	0.0	Liquid
6	Filtrate	4.017	27.00	108.5	Liquid
7	Thickness tank	0.817	49.00	40.0	Liquid
8	Dilution tank	0.369	697.00	257.2	Liquid
9	Return sludge tank	8.729	516.00	4,504.2	Mixed Liquor
10	Mixed liquor of Aeration tank	4.036	1,213.00	4,895.7	Mixed Liquor
11	1st Settling tank	0.191	645.00	123.2	Liquid
12	Cu in Return sludge	8.413	568.00	4778.6	Mixed Liquor
13	1st Settling tank sludge	2.519	52.00	131.0	Mixed Liquor
14	FeCl ₃ Storage tank	223.000	0.16	35.7	Chemical
15	2nd Settling tank sludge	2.039	25.00	51.0	Mixed Liquor
16	Cu in Thickness Bottom sludge	7.404	28.20	208.8	Mixed Liquor
17	Effluent	0.106	620.00	65.7	Liquid
18	Cu in Filter cake (mg/kg)	76.500	1.27	97.2	Cake

* 3회 측정된 평균값임.

mg/L에 비해 현저히 낮은 농도로 나타나 수질환경 배출허용 기준치를 준수하는 데는 문제점이 없는 것으로 판단되었다.

3.1.1. 폐수처리장 유입수 (Influent)

폐수처리장 유입수는 구리를 함유한 공정폐수(①)에서 1.409 mg/L, 구리의 유입량은 155.0 g/day로 나타났다. 제품 생산 공정 하수 및 우수조에 발생된 폐수는 물리·화학처리조(②)로 이송되고, 중화제 (NaOH)를 사용하여 pH 7.0 부근으로 1차 조절 후 탄산나트륨 (Na₂CO₃)으로 pH를 9.0 부근으로 상승시켜 구리를 수산화물 형태로 침전 제거 후, 상등수는 저장조로 이송되는데 이때 구리의 농도는 0.30 mg/L, 물리·화학처리조의 발생유량을 감안한 구리 유입량은 15.0 g/day로 나타났다. 구리를 함유하지 않은 생산 공정폐수의 유입량은 200 m³/day이며, 구리를 함유한 폐수는 고농도의 유기물 및 염소성분을 포함하고 있어 생물학적 처리가 불가하므로 원활한 처리를 위해서 원수 (raw water)로 희석하여 처리하는데 희석수의 유입량은 261 m³/day로 나타났다. 공정폐수로부터 폐수처리장에 유입되는 구리의 총량은 170.0 g/day로 나타났다.

3.1.2. 폭기조 (Aeration tank)

폭기조 유입수는 3.1.1에서 열거한 폐수와 반송슬러지가 유입된다. 유입폐수량은 697 m³/day이며, 구리의 농도는 0.369 mg/L로 나타났다. 또한 반송슬러지 시료(⑨)는 혼합액(mixed liquor)을 강산 (질산·과염소산)으로 유기물을 분해한 후, 분석한 결과 8.729 mg/L로 나타났다. 순환되는 반송슬러지를 제외하고 순수하게 폭기조에 유입되는 폐수의 구리 농도는 0.369 mg/L이었으며, 폭기조를 거쳐 유출되는 상등액 중의 구리 농도는 0.191 mg/L로 나타났다. 일반적으로 미생물에 독성을 미칠 수 있는 구리의 한계농도는 1 mg/L로 알려져 있으며(이 등, 2006), 본 폐수처리장의 유입수는 미생물 독성 한계농도 미만으로 유입되는 것을 알 수 있었다. 폭기조 내부에서 슬러지 표면에 흡착 또는 미생물의 체내로 흡수되어 제거되는 구리의 제거율은 48.2 %로 나타났다. 본 폐수처리 공정의 미생물은 구리에 대한 내성을 가진 것으로 판단되어진다.

미생물에 의한 중금속의 축적은 일반적으로 세포 표면에 존재하는 음이온 그룹과 양이온인 중금속이 결합함으로써 세포표면에 흡착되는 과정과 미생물 대

사작용에 의하여 세포내부로 흡수되는 과정에 의하여 일어나며, 세포내부로의 중금속 흡수는 온도, 에너지 등과 관련된 물질대사에 의하여 일어나는 것으로 알려져 있다(Bucheder와 Broda, 1974). 조와 최 등(1997)의 세포내 중금속 분포 실험결과에 의하면 균체중의 cell wall, cell membrane 및 cytoplasm fraction에서 전체량 중 30%, 11%, 58%가 존재한다고 하였다. 본 연구에서도 폭기조 내 미생물에 의해 구리가 흡착 또는 흡수에 의해 제거 되는 것으로 나타났다. Fig. 2에는 20일간 폭기조 유입수와 유출수 중의 구리의 농도를 분석하여 폭기조에서 제거율을 관찰한 결과를 나타내었다. 실험기간 동안 유입수의 농도범위는 0.315 ~ 0.398 mg/L, 유출수의 농도범위는 0.159 ~ 0.192 mg/L로 나타났으며, 제거율의 범위는 46.2 ~ 53.6%, 평균제거율은 50.8%로 나타났다.

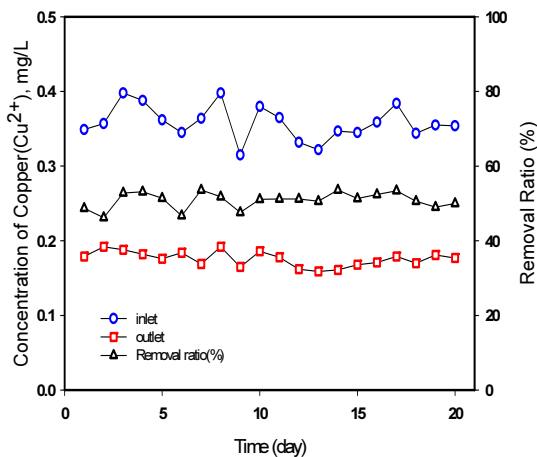


Fig. 2. Removal efficiency of copper with activated sludge process in aeration tank.

3.1.3. 침전조 (Settling tank)

본 공정의 2차 침전조는 2개조가 직렬로 연결되어 있다. 첫 번째(1st) 침전조(Ⅰ)에서 고액분리 후 침강 슬러지는 반송조로 보내어지고 상등액은 두 번째(2nd) 침전조로 유입된다. 두 번째 침전조에서는 부유성 미세 입자를 응집, 침강시켜 제거하기 위해 알칼리성 응집제를 투입하여 고액분리 후 하부의 슬러지는 농축조로 보내어진다. 두 번째 침전조 유입수 중 구리

농도는 0.191 mg/L이며, 응집제 처리 후 방류되는 처리수의 구리 농도는 0.106 mg/L로 나타났다. 두 번째 침전조의 구리 제거율은 44.5 %로 나타났다. 일반적으로 중금속은 알칼리 영역에서 수산화물을 형성하여 침전되는 것으로 알려져 있다. 두 번째 침전조에서도 강알칼리성 응집제에 의해 구리가 수산화물의 형태로 침전되어 제거 되는 것으로 판단되어진다. 이를 확인하기 위해 두 번째(2nd) 침전조 하부 슬러지를 채취 후 강산으로 전처리하여 유기물을 제거하고 구리함량을 분석한 결과, 2.519 mg/L로 높게 나타났다. 폭기조 슬러지에 함유된 구리성분의 포함 여부를 확인하기 위해 첫 번째 침전조에서 두 번째 침전조로 유입되는 폐수 중 부유물질 (suspended solid) 농도를 분석한 결과, 20~30 mg/L로 낮게 나타났다. 즉 두 번째 침전조 하부 슬러지 중에 함유된 구리는 침전조에 응집제로 투입된 알칼리성물질에 의해 수중에 용존하는 구리(Cu²⁺)가 수산화물(Cu(OH)₂)의 형태로 침전한 것을 확인할 수 있었다.

3.1.4. 농축조 (Thickness tank)

첫 번째 침전조에서 고액 분리 후 침전조 하부의 고농도 슬러지는 반송조로 이송되고, 이중 일부는 잉여 슬러지로 인출하여 농축조로 보내어진다. 또한 두 번째(2nd) 침전조 하부의 무기슬러지도 농축조로 이송되어 탈수시킨다. 탈수기로 이송 전에 고농도 슬러지를 만들기 위해 응집보조제인 소석회(Ca(OH)₂)와 염화제이철(FeCl₃)을 응집제로 사용하여 농축시킨다. 농축 후 탈수기(filter press)에서 고액분리 후 고형물(cake)은 외부로 인출된다. 이때 필터프레스 여액 중의 구리 농도는 4.017 mg/L로 농축조 상등액 중의 구리농도 0.817 mg/L을 감안할 경우 예상보다 높게 나타났다. 농축조로 유입되는 첫 번째 침전조 및 두 번째 침전조 상등액의 구리농도는 각각 0.191 mg/L, 0.106 mg/L 이었고, 응집 전 농축조 상등액의 구리농도는 0.191 mg/L 이었다. 일반적으로 슬러지 중에 함유된 구리는 산성조건에서 용출이 용이하지만 농축조의 액성은 알칼리성을 유지하였으므로 슬러지 중 구리의 용출로는 볼 수 없다. 그 원인을 파악하기 위하여 농축조로 유입되는 응집제인 염화제이철 중 구리의 농도를 분석한 결과 223 mg/L, 농축 시 투입한 염화

제이철의 양이 0.160 m³/day이므로 총 35.7 g/day의 구리가 농축조로 유입되었고, 이중 일부는 알칼리영역에서 수산화물로 침전되고 나머지 구리는 탈수기의 여액으로 유출된 것으로 판단되었다. 공업용 염화제이철 제조 시, 구리가 포함된 금속을 사용할 경우 제품 중에 구리가 함유될 수 있으므로 처리수 중 구리의 농도를 낮게 유지하고자 하면 구리함량이 적은 응집제를 사용하거나 고분자응집제로 교체할 필요가 있다.

3.2. 폭기조 내 구리의 생물농축계수

폭기조 상등액 중 구리의 농도는 0.191 mg/L 이지만, 폭기조 혼합액을 폐기물공정시험법의 규정에 따라 강산으로 분해하여 유기물을 제거한 후 구리의 함량은 4.036 mg/L로 나타났다. 중금속은 미생물의 대사과정에서 분해가 되지 않기 때문에 생체내로 유입되면 축적이 된다(Leusch 등, 1996). 본 연구 대상시설에서도 상등액 중의 구리농도와 혼합액을 강산으로 처리 후 구리함량 분석 결과에 의하면 생물학적 농축이 일어나는 것으로 사료된다. 폭기조 내 미생물 체내에 축적된 구리의 양은 폭기조 혼합액을 강산으로 분해한 시료 중의 구리함량이 4.036 mg/L이고, 폭기조 상등액 중의 구리농도가 0.191 mg/L이므로 실제 미생물 체내로부터 용출된 구리의 농도는 3.845 mg/L이다. 폭기조 내 미생물 (MLVSS)의 건조중량이 2,790 mg biomass/L이므로 전체 1L를 기준으로 환산하면 1.378 mg/g 이 된다. 혼합미생물에 의한 생물농축의 경우 음(-)으로 하전된 각종 미생물들의 세포벽의 기능기 (구연산, 옥살산, 글로코네이트, 푸말레이트 등의 유기산)와 전기적 상관관계 등이 너무 복잡하여 아직 정확한 메커니즘을 규명하지 못하고 있는 실정이다(안과 서, 1995). 조 등(1997)의 미생물 중금속 축적 실험에서 100 mg/L의 구리를 함유한 폐수 100 mL에 미생물 100 mg을 분산 상태로 30°C에서 48 시간동안 연속 교반하면서 흡착시킨 결과, 구리의 축적은 86.1 mg/g 까지 흡착하였다고 보고하였다. *Zooglea ramigera*, *Bacillus licheniformis*와 같이 활성슬러지로부터 분리가 가능한 여러 가지 세균은 철, 구리, 카드뮴, 니켈, 우라늄과 같은 금속과 복합체를 형성한 후 금속을 축적하는 세포의 중합체를 형성한다고 알려져 있다. Korte

등(1978)에 의하면 *Zooglea ramigera*는 biomass 1g 당 0.170g의 구리를 축적할 수 있다고 보고하였다. 본 공정에서는 이에 미치지 않는 축적 양이지만, 실제 폐수처리공정에서 폭기조 미생물에 의한 구리의 축적 양을 확인할 수 있었다.

일반적으로 생물농축계수 (Bioconcentration factor: BCF)를 계산은 아래의 식 1)에 따라 산출한다(Oliver와 Niimi, 1983; Jorgensen, 1990; U.S. EPA, 1989).

$$BCF = \frac{Cu \text{ concentrabn in microorgaism}(\mu\text{g/g})}{Cu \text{ concentrabn in water}(\mu\text{g/ml})} \quad 1)$$

반송슬러지 상등액에 존재하는 구리의 양을 포함하여 폭기조에 유입되는 구리의 총량은 504.2 mg으로 이를 폭기조 혼합액 유효 용량을 기준으로 수중의 구리농도를 환산하면 0.415 $\mu\text{g/mL}$ 이 된다. 위에서 얻어진 값들을 식 1)에 대입하여 계산하면 폭기조 내 미생물에 의한 생물농축계수 (BCF)는 3,320으로 나타났다.

3.3. 공정별 구리 제거 효율

폐수처리공정에 유입된 구리의 단위공정별 제거 효율을 분석한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 폭기조 유입 폐수 중의 구리농도는 0.369 mg/L이고, 폭기조 유출 혼합액의 상등액 중의 구리농도는 0.191 mg/L 이었다. 폭기조에서의 구리 제거율은 48.2%로 나타났으며, 침전조에서 고액분리 및 강알칼리성 응집제에 의해 수산화물의 형태로 제거된 후 상등수의 구리 농도는 0.106 mg/L, 제거율은 44.5%로 나타났다.

폭기조 유입수와 방류수 중의 구리농도를 기준으로 누적제거율은 71.3%로 나타나 미생물에 의한 흡착, 흡수 및 물리화학적 처리에 의해 제거되는 비율이 높게 나타났다. 대부분의 금속들은 활성슬러지 처리에 의해 40~90%가 제거되는 것으로 알려져 있다. 본 폐수처리공정의 처리수는 구리의 배출허용기준 (2008년 1월 1일 이후 기준, 나 지역) 3.0 mg/L 이하보다 현저히 낮은 농도를 나타내었다.

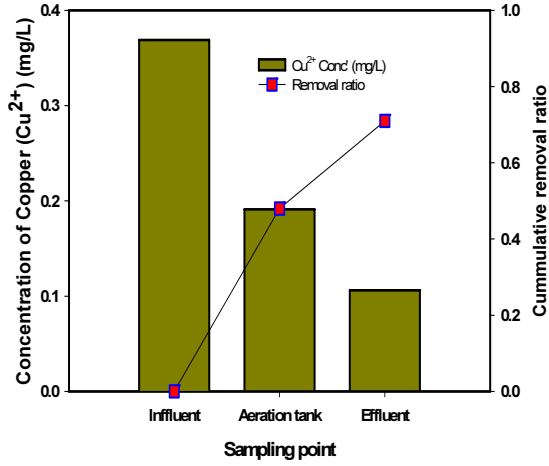


Fig. 3. Cumulative removal rate of copper at wastewater treatment process.

3.4. 탈수 고형물 (Cake) 내 구리

폐수처리 공정에서 발생하는 잉여슬러지는 필터프레스에서 탈수하여 고형물 형태로 공정으로부터 제거한다. 생물학적 폐수처리과정에서 미생물 세포에 흡수 및 흡착된 구리의 함량을 확인하기 위해 3회에 걸쳐 탈수 고형물 일정량을 채취하여 용출 및 함량 분석 실험결과를 Fig. 4에 나타내었다.

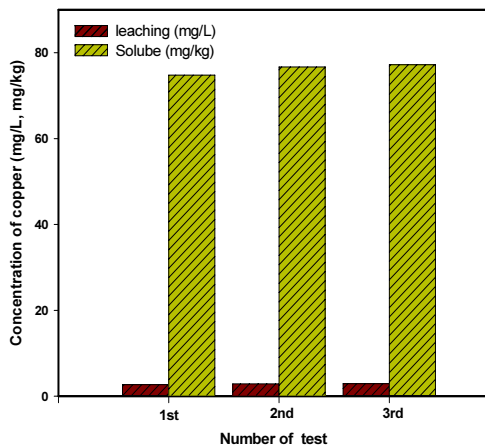


Fig. 4. Comparison of copper concentration in cake with leaching and solution.

폐기물 공정시험방법에 의거하여 전처리 후 용출 실험 결과 구리의 농도는 2.690 ~ 2.920 mg/L, 탈수고형물 중 유기물을 강산으로 분해하여 전처리 후 구리의 함량을 분석한 결과 74.80 ~ 77.20 mg/kg cake로 나타났다. 탈수고형물 내 구리의 함량은 고농도로 존재하지만 용출실험결과는 그에 비해 매우 낮은 값으로 나타났다. 본 실험에서 용출액의 초기 pH를 6.0으로 조절하여 용출을 시작하였으나 용출과정에서 용출액의 pH를 측정된 결과, Fig. 5와 같이 시간이 경과함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 일반적으로 폐수처리슬러지 중의 금속 용출은 산성용액에서 용출율이 증가한다. 하지만 실험에서 사용된 시료는 응집과정에서 과량으로 투입된 수산화칼슘 (Ca(OH)₂)이 용출과정에서 용해되어 용출액의 pH를 9.8 부근으로 상승시킨 것으로 판단된다. 즉, 용출액의 pH가 상승함에 따라 미생물 체세포 및 표면에 존재하는 구리의 용출이 잘 되지 않았던 것으로 판단된다. 미국의 EPA방법은 용출과정에서 용매의 pH를 계속 5 정도로 유지시켜 주어 항상 일정한 pH 조건에서 폐기물 중의 중금속 용출특성을 측정하도록 되어 있다(U.S. EPA, 1992).

폐수처리장에서 발생하는 슬러지의 경우 폐기물공정시험방법에 의한 용출실험결과 구리의 농도가 3.0 mg/L 이상인 경우 폐기물 관리법에 의거하여 지정폐기물로 규정된다. 본 대상공정에서 발생한 폐수처리슬러지의 용출실험 농도가 규제치에 근접하므로 유입

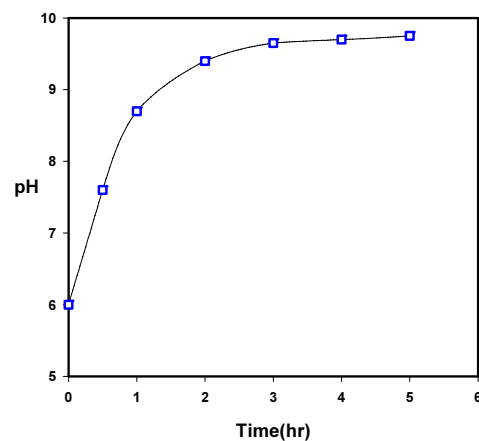


Fig. 5. pH enhancement with reaching time.

되는 폐수 중의 구리 농도를 관리하거나 농축조에 사용하는 응집제는 구리의 함량이 낮은 염화제이철 (FeCl_3) 또는 고분자응집제를 사용하여야 안정적으로 규제치 이하의 농도관리가 될 것이다.

4. 결론

석유화학 공정에서 발생하는 구리를 함유한 폐수를 활성슬러지공법을 이용한 폐수처리장에서 처리할 때 각 공정의 주요 지점별 구리의 농도를 측정하여 전 공정에서의 구리의 거동을 살피고, 폭기조 내 미생물에 의한 구리의 생물농축계수를 산출하였으며, 본 연구대상과 유사한 공정에서 중금속을 처리할 경우, 연구결과를 기초자료 사용할 수 있도록 하는데 목적을 두고 수행되었다. 본 연구를 수행한 결과는 다음과 같다.

1) 폐수처리장에 유입되는 폐수 중 구리의 함량은 0.369 mg/L로 나타났고, 폭기조에서 구리에 대해 내성을 가진 미생물에 의해 구리의 제거율은 48.2%로 나타났다.

2) 폭기조 혼합액을 침강시킨 후 상등액의 구리농도를 측정한 결과 0.191 mg/L로 나타났고, 반송슬러지 상등액에 존재하는 구리의 양을 포함하여 폭기조에 유입되는 구리의 총량은 504.2 mg으로 폭기조 유효용량을 기준으로 환산하면 0.415 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 이 되었고, 폭기조 내 미생물 (MLVSS)의 건조중량을 기준으로 구리의 함량은 1.378 mg/g으로 나타났으며, 이를 근거로 생물농축계수를 계산하면 3,320으로 나타났다.

3) 단위 공정별 누적제거율은 폭기조에서 44.5%, 침전조에서 71.3%로 나타났다. 최종 처리수 중의 구리 농도가 0.106 mg/L로 폐수처리시설 처리수의 구리 허용기준치인 3.0 mg/L에 비해 현저히 낮은 것을 알 수 있었다.

4) 필터프레스에서 배출된 탈수 고형물을 폐기물공정시험방법에 따라 용출실험 한 결과, 구리의 농도가 2.690 ~ 2.920 mg/L로 나타났으며, 탈수고형물을 강산으로 분해하여 고형물 중 구리의 함량을 분석한 결과 74.8 ~ 77.2 mg/kg으로 나타났다. 용출량이 낮은 것은 용출과정에서 응집 보조제로 사용한 과잉의 수산화칼슘이 용해되어 용출액의 pH를 9.8까지 상승시

켰고, 이로 인하여 구리가 수산화물로 전환됨으로 용출량이 낮은 것으로 판단되어진다.

5) 슬러지 농축과정에서 응집제로 투입되는 염화제이철 (FeCl_3) 중 구리가 고농도로 함유되어 있어 탈수 여액 및 탈수고형물 중 구리 농도를 상승시킨 것으로 판단됨으로 구리의 함량이 낮은 응집제를 선택하여야 할 것이다.

6) 유입수 중의 구리농도를 관리하여야 미생물 농축에 의한 탈수고형물 중의 구리농도를 낮출 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 울산대학교의 연구비에 의하여 연구되었습니다.

참고 문헌

- 안갑환, 서근학, 1995, *Sacharomyces uvarum*에 의한 중금속 생체흡착에 관한 연구, 한국환경과학회지, 4(5), 527-534.
- 이학성, 유익근, 박진도, 2006, 폐수의 생물학적 처리, 울산대학교출판부, 37.
- 조주식, 이원규, 최형섭, 허중수, 1997, 중금속내성균의 세포내 중금속 분포, 한국환경농학회지, 16(1), 55-60.
- 조주식, 이홍재, 허중수, 1997, 물리화학적 전처리에 의한 중금속 내성세균의 균체내 중금속 축적변화, 한국환경농학회지, 16(4), 311-319.
- 환경부, 2008a, 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률.
- 환경부, 2008b, 폐기물관리법.
- Bucheder, F., Broda, E., 1974, Energy dependent zinc transport by *Escherichia coli*, *Eur. J. Biochem.*, 45, 555-559.
- Jorgensen, S. E., 1990, Modeling in ecotoxicology, 16, 69-79.
- Korte, F., Freitag, D., Geyer, H., Klein, W., Kraus, A. G., Lahaniatis, E., 1978, A concept for establishing ecotoxicologic priority lists for chemicals, *Chemosphere*, 1, 79-102.
- Leusch, A., Holan, Z. R., Volesky, B., 1996, Solution and particles effects on the biosorption of heavy metals by seaweed biomass, *Appl. Biochem. & Biotech.*, 61, 231-249.

- Oliver, B. G., Niimi, A. J., 1983, Bioconcentration of chlorobenzene from water by rainbow trout., Correlations with partition coefficients and environmental residues, *Environ. Sci. Technol*, 17(5), 287-291.
- Paek, S. M., Lee, I. S., 1998, A Study on Bioaccumulation of Heavy Metals in Mussels (*Mytilus edulis*) from the Onsan coastal zone, *Korean J. Ecol.*, 21(3), 217-224.
- U.S. EPA/625/6-82/022, 1989, Stabilization/solidification of CERCLA; physical tests, chemical tests procedure, technology screening, and field activities, Cincinnati, OH.
- U.S. EPA, Project Summary, 1992, A comparative evaluation of two extraction procedures; the TCLP and the EP, EPA/600/S2-91/049 RREL., Cincinnati, OH.