

조류제거를 위한 구리이온 발생 반응기의 특성 연구

이선영 · 김혜연 · 주재백*

홍익대학교 공과대학 화학공학과

(2012년 1월 30일 접수 : 2012년 2월 21일 채택)

A Study on the Characteristics of Copper Ion Generator for the Removal of Algae

Sun-Young Lee, Hae-Yon Kim, and Jeh-Beck Ju*

Department of Chemical engineering, Hong Ik University, Seoul 121-791, Korea

(Received January 30, 2012 : Accepted February 21, 2012)

초 록

조류제거를 위한 구리이온을 생성하기 위한 환형 흐름 구리 전기분해 반응기 시스템을 구성하고 그 작동특성에 대하여 고찰하였다. 또한 구리이온이 조류에 미치는 영향도 살펴보았다. 인가전류를 증가하면 균등조로부터 배출되는 구리 이온 농도가 비례적으로 증가함을 알 수 있었다. 전류 밀도를 조절하여 원하는 구리농도를 얻을 수 있음을 알았으며 패러데이 효율은 90% 이상임을 알 수 있었다. 유량을 증가시키면 구리이온농도는 감소하였으며 이는 전극에서의 반응속도와는 상관없이 물의 증가량에 따른 희석 때문임을 알 수 있었으며 농도 과전위 영향은 미미하였다. pH가 증가할수록 생성되는 구리이온 농도는 이에 반비례하여 감소하였고 전기전도도의 변화는 배출되는 구리이온 농도에 별 영향을 미치지 않았다. 구리이온 농도가 증가시킬 경우 Chlorophyll-a 농도가 크게 감소함을 볼 수 있으며, 구리 이온 농도가 0.2 ppm 이상일 때 조류가 효과적으로 제거됨을 알 수 있다. 황산구리를 용해시킨 구리이온이나 전기분해를 통해 얻은 구리이온을 투여한 경우 별 차이가 없었으며 5일 후 조류 제거효율은 0.4 ppm이상의 농도에서는 90%이상이었다.

Abstract : An annular flow type of copper electrolysis reactor was setup in order to generate the copper ions to remove algae in water. The operating characteristics of the reactor and the effect of copper ion on algae have been considered. By controlling the applied current, the copper ion concentration could be obtained as desired level and the faradaic efficiency was above 90%. When the flow rate was increased, the copper ion concentration was linearly decreased due to the dilution effect and the effect of concentration overpotential was insignificant. With the increase of pH in water, the copper ion concentration was linearly decreased and not affected by the conductivity of the water. The concentration of chlorophyll-a was sharply decreased with the increase of copper ion concentration. The algae was effectively removed as the copper ion concentration was above 0.2 ppm. There was no difference between the copper ions obtained by dissolving copper sulfate and those produced by copper electrolysis. The algae removal efficiency was above 90% after 5 days as the copper ion concentration was above 0.4 ppm.

Keywords : Electrolysis, Copper ion, Algae removal, Chlorophyll-a, Ion generator

*E-mail: jbj@hongik.ac.kr

1. 서 론

급속한 산업화와 도시의 인구 집중, 생활수준 향상에 따른 물 수요량의 증가는 상수원수의 부족을 야기시키고 있을 뿐만 아니라 호소와 하천의 수질을 점차 오염시키고 있다. 정수 처리장이나 도시하수, 공장폐수, 농경지에 살포된 비료 등 완전하게 처리되지 않은 오염물질 즉 영양염류가 유입되면 정체된 호소뿐만 아니라 유속이 완만한 하천의 부영양화를 유발하여 과다한 조류를 번식시킨다.^{1,2)} 이러한 조류는 조류 자체로도 경관에 나쁜 영향을 미치고 낮 동안의 동화작용 때문에 호소의 pH를 상승시키게 되고, 세포내 저장, 체외분비, 분해 산물 방출 등을 통하여 물에 맛, 냄새를 유발하는 물질을 발산시킨다. 또한 호소를 상수원으로 이용하는 정수장에서는 여과지 폐색에 의한 역 세척 빈도와 사용수량 증가, 취미 장애, 정수 약품비 증가, 소독부산물 및 슬러지 발생량 증가 등의 피해가 있으며, 하폐수처리장에서는 방류수의 조류발생으로 재이용수로의 활용이 어렵고 방류하천의 녹조 현상을 유발할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 산화제($\text{Cl}_2, \text{ClO}_2$) 및 황산동(CuSO_4)주입, 조류 제거용 제초제 사용, 여과에 의한 제거방법, 황토 등의 동반침전이 가능한 토사투입 등의 기술이 사용되고 있으나 약품사용으로 인해 과다한 비용이 발생하며, 악취나 맛에 대한 거부감이 존재하고 제초제 사용이나 황산동(CuSO_4)주입의 경우에는 2차오염이 발생할 우려가 있어서 사용을 가급적 자제하고 있는 실정이다.^{3,4)} 이러한 처리공정에 전기화학적인 방법을 이용할 경우 화학약품 등의 물질을 첨가하지 않아도 되고, 미리 분산되어 슬러지 생성을 줄이며 호소수의 수질변동에도 대응이 용이하고 자동운전이 가능하며 인건비가 적게 들고 처리시설이 소형이므로 큰 부지를 필요로 하지 않는다는 장점을 지니고 있다. 또한 장치에 비해 처리능력이 크고 반응 제어가 용이하다는 장점을 가지고 있다.

조류처리에 전기화학적 방법을 사용하는 연구로는 전기분해를 겸한 전기부상법,⁵⁻⁸⁾ 전기응집법^{9,10)} 및 수영장 등에 조류를 억제하기 위한 소규모 구리이온 용해법^{11,12)} 등이 있으나 조류제거나 억제를 위해 대규모의 전기분해 반응기에 의한 구리이온 발생에 관한 연구사례는 잘 나

타나 있지 않다. 조류제거나 억제에 대한 구리이온의 효과는 예전부터 잘 알려져 왔다. 구리이온은 다양한 생물의 성장, 물질대사와 효소 활성화에 관여하는 필수적인 요소이지만 어느 이상 다량의 구리는 일차적으로 조류의 세포막에 결합함으로써 구리의 독성으로 인해 막 유동성과 투과성의 손상을 일으키며 한편 조류세포에 부착된 구리는 세포 내로 흡수되어 각종 생리적 기작에 영향을 주며 특히, 세포내의 효소와 결합하여 물질대사의 합성 및 기능을 저하시키는 것으로 알려져 있다.¹³⁻¹⁵⁾ 전기분해를 통해서 구리 이온을 생성하는 방법은 일정한 전류, 유량을 반응기에 인가해두면 일정한 농도의 분산된 구리 이온을 얻을 수 있기 때문에 황산구리를 첨가하여 직접 용해시키는 것보다 안전하다는 장점을 지니고 있다.

본 연구에서는 전기분해에 의하여 구리이온을 발생시킬 수 있는 원형관내 유체 흐름형 전기분해 반응기를 제작하고 생성되는 구리이온의 농도에 대한 유체의 흐름, 전해질의 성상, 비전도도, 인가전류나 인가 전위의 영향을 이해하고자 하였다. 또한 황산구리나 전기분해하여 얻은 구리이온에 의한 조류 발생의 억제 및 제거율의 변화도 살펴보았다.

2. 실험방법

2.1. 전기분해 반응기

본 실험에 사용한 전기분해 반응기에는 Fig. 1과 같이 중앙에 구리 전극봉이 장착되고 둘레에 스테인리스 관으로 둘러싸여져 있는 환형 유체흐름 채널이 4개 장착되어 있으며 이 채널을 통해 나온 물은 교반기가 설치된 혼합 균등조에 들어가 구리이온의 농도가 균등화된 후 흘러나오게 되어 있다. 구리이온 발생부분 즉 채널 내부에서 음극(cathode)은 스테인리스 관(SUS 304 Pipe)을 사용하였으며, 이 스테인리스 관(반지름: 2.5 cm) 중앙에 위치한 양극(anode)으로는 구리 봉(지름 2 cm, 길이 50 cm)을 사용하였다. 전체적으로 네 쌍의 음극-양극은 각각 병렬로 연결하였으며 power supply를 사용하여 정전류 상태 하에서 전류를 공급하였다. 채널부분 이전의 저수조에 물이 공급될 때 유량계를 두어 총 유량을 측정하였다.

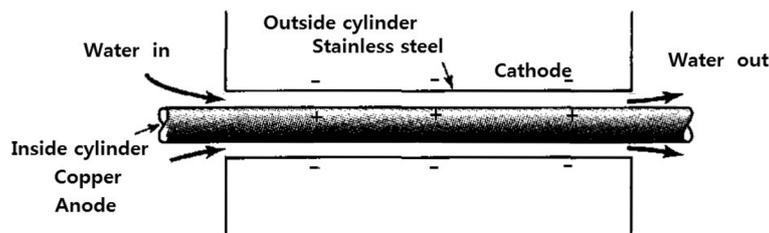


Fig. 1. Schematic view of an annular flow copper ion generator.

2.2. 실험 방법

2.2.1. 구리농도 측정방법

잔류염소를 제거한 상수도 물을 펌프를 사용하여 총 10 L/min의 유량으로 반응기 네 개의 채널로 주입하고 power supply를 사용하여 정전류로 인가하였다. 일정한 전류밀도 하에서 유량, 물의 pH 및 전기전도도 등을 변화시키면서 전해반응에 따라 생성되어 혼합 균등조를 거쳐 흘러나오는 샘플을 1분에서 9분까지 1-2분 간격으로 채취하여 구리 농도를 측정하였다. 구리이온 농도는 구리이온 측정기기(HI 83200 photometer, Hanna Instrument Co.)를 이용하여 측정하였으며 각 샘플마다 다섯 번씩 측정하여 그 평균값을 사용하였다.

2.2.2. 조류의 배양

조류배양은 홍익대학교 교정에 있는 연못의 조류 원수를 채취하여 수행하였고, 조류 배양에 사용된 유리조의 용적은 45 L이고 조류의 광합성에 사용된 빛은 형광등 40W 2개를 사용하였으며 온도조절기 및 히터가 장치되어 있다. 또한 배양에 필요한 영양물질로는 KNO_3 , K_2HPO_4 , KH_2PO_4 , $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, $Fe_2(SO_4)_3$, $NaHCO_3$ 등이 포함된 식물영양제를 유리 수조에 적정 주입하여 30°C 하에서 조류 증식을 수행하였다. 배양된 조류는 농축시켜 냉장고에 보관한 후 실험에 사용하였고, 입자가 큰 조류는 Homogenizer로 미세하게 분쇄한 후 실험에 사용하였다. 광합성을 하는 조류는 Chlorophyll-a를 함유하고 있으며 이 함량은 조류 건조중량의 1~2% 정도였다.

2.2.3. Chlorophyll-a의 측정방법

Chlorophyll-a의 측정은 먼저 적당량의 시료를 유리 섬유 필터로 거른 후 거른 필터를 90% 아세톤 용액에 담가 Homogenizer로 미세하게 간 후 12시간 이상 어두운 곳에서 냉장 보관하여 엽록소를 추출한다. 추출된 용액은 상등 수만을 취해 분광광도계를 사용하여 750, 663, 645, 630 nm에서 흡광도를 측정하여 아래의 식에 따라 Chlorophyll-a의 양을 측정하였다.¹⁶⁾

$$\text{Chlorophyll-a(mg/m}^3\text{)} Y =$$

$11.64 \times X1 - 2.16 \times X2 + 0.10 \times X3$ 여기서 $X1 = OD(663) - OD(750)$, $X2 = OD(645) - OD(750)$ 및 $X3 = OD(630) - OD(750)$.

2.2.4. 조류제거 실험방법

조류는 실험실에서 배양한 조류를 이용하는데 농도가 일반 연못, 호수, 강 등에 있는 조류의 농도보다 높기 때문에 조류를 희석하여 사용하였다. 일정한 조류의 농

도를 지닌 희석된 수용액 시료를 1리터 비커용기에 옮기고 여기에 황산구리 용액이나 전기분해를 통해 원하는 구리이온 농도를 지닌 용액을 만들어 넣어 주었다. 상온에서 시간 간격을 두고 샘플을 채취하여 Chlorophyll-a의 양을 측정하여 조류제거의 효율을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 전류밀도 값에 따른 구리이온 농도의 변화

전기분해시 전류밀도의 크기가 생성되는 구리이온 농도에 미치는 영향을 고찰하였다. 본 실험은 혼합 균등조로부터 방출수를 샘플링하였기 때문에 시스템 특성상 시간이 경과함에 따라 Fig. 2와 같이 구리이온 농도는 시간이 지남에 따라 점근 값을 지니게 됨을 볼 수 있다. 유량은 13 L/min ($19 \text{ m}^3/\text{day}$)으로 고정하고 전류 밀도를 0.084, 0.168, 0.318, 0.477 및 0.637 mA/cm^2 로 변화시켜 각 전류밀도에서 생성되는 구리이온 농도를 측정하였다. 전류 밀도가 증가하면 이에 비례하여 구리 용해 반응속도가 증가되어 구리 이온 농도가 증가하게 됨을 볼 수 있었다. 예를 들어 전류밀도가 0.64 mA/cm^2 (총 인가 전류 값으로는 0.2 A)일 때 배출 구리이온농도가 0.35 ppm 정도가 됨을 알 수 있으며 이 실험 결과를 통해서 본 실험에서 원하는 물속의 구리이온의 농도를 인가해 주는 전류밀도의 크기에 따라서 조절할 수 있음을 보여 준다.

환형 흐름 반응기와 혼합 균등조를 통해 배출되는 공정에서 시간에 따른 구리이온 농도의 변화를 패러데이 법칙을 이용하여 이론적으로 계산할 수 있는 식을 유도하여 식(1)에 나타내었다. 시간이 지남에 따라 점근하는 값을 계산한 결과와 실험 결과 값을 여러 전류밀도에 따라 비교한 결과가 Fig. 3에 나타나 있다.

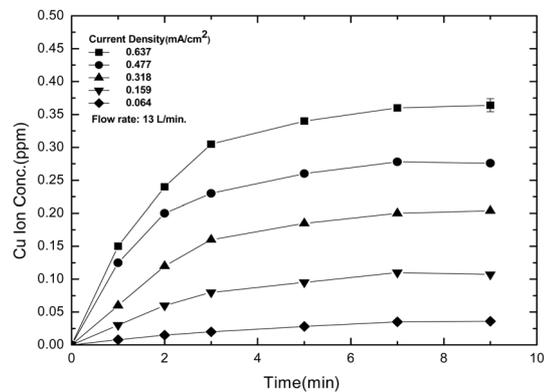


Fig. 2. The changes of copper ion concentrations discharged from mixed tank in process of reaction time.

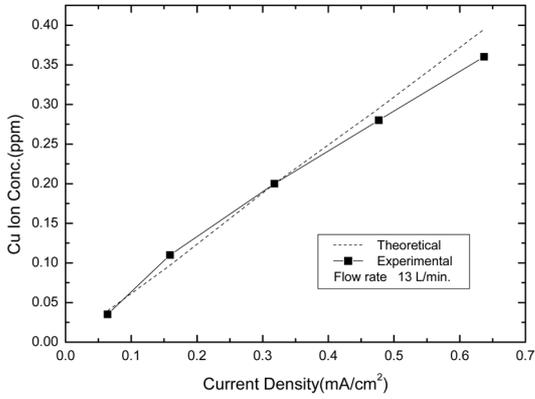


Fig. 3. Copper ion concentrations obtained from experiments compared with values calculated by Faraday's law.

$$C(t) = C_{avg}[1 - e^{-(Q/V_{mix})t}] \quad (1)$$

이때

$$C_{avg} = \frac{It_{ret}M_w}{nFV_r}, \quad I: \text{인가하는 총 전류,}$$

V_r : 반응기의 부피, Q : 유량

t_{ret} : 평균체류시간(즉 V_r/Q), V_{mix} : 혼합 균등조의 부피,

M_w : 구리의 분자량(63.5 g/mole), n : 구리의 원자가(2),

F : Faraday 상수(96485 coulomb/equiv).

전류밀도가 약 0.3 mA/cm² 보다 커질 때 실험결과와 값이 이론값보다 작아질 것을 볼 수 있다. 실험값을 이론값으로 나눈 비율을 페레데이 효율이라고 하는데 전류밀도가 0.48 mA/cm² 일 때 96%, 0.64 mA/cm² 일 때 91%가 됨을 알 수 있다.

3.2. 유량 크기에 따른 구리이온 농도의 변화

흐름 반응기의 특성을 살펴보기 위하여 유량 크기의 변화가 구리 이온농도에 미치는 영향을 고찰하였다. 이전의 실험 결과를 바탕으로 전류밀도를 0.64 mA/cm²로 고정하고 유량의 속도를 4~13 L/min 까지 변화시킬 때 시간에 따른 구리이온 농도의 변화를 측정 하였고 그 접근 값에 대한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 실험결과 전류를 일정하게 유지하여 전압을 측정한 결과 전압은 유량이 변화되어도 5.6 V 정도로 거의 변화가 없었다. 전기화학 반응기의 경우 유량이 증가하면 농도 과전위가 감소하여 전압이 감소하나 이 경우에는 매우 작은 전류가 인가되므로 과전위가 매우 작아 전압의 변화가 거의 없는 것으로 사료된다.¹⁷⁾ 실험결과를 유량이 증가할수록 균등조로부터 나오는 방출수내 구리이온 농도는 직선

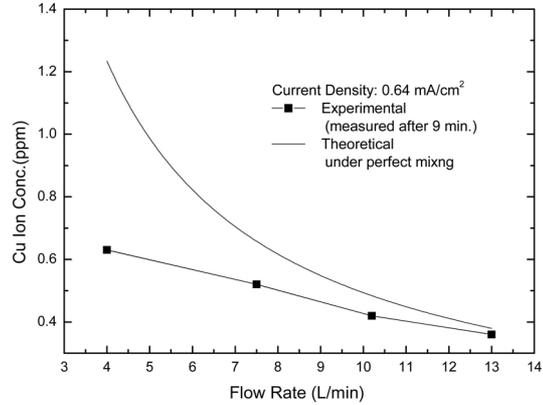


Fig. 4. Effect of flow rate on the copper ion concentration discharged from mixing tank.

적으로 감소함을 알 수 있었다. 반응기 내의 구리용해 반응은 전류밀도가 일정하게 유지되면 반응기 내에서 해리되는 구리 이온이 일정하게 생성되기 때문에 유량이 증가하면 구리이온 농도는 그에 비례하여 감소하기 때문이다. 그러나 상기한 식(1)에 근거하여 얻은 이론적인 구리이온 농도는 유량크기에 따른 직선적인 감소가 아님을 알 수 있으며 실험값과 다른 이유는 유량이 작을 경우 교반효과가 떨어져 완전혼합 상태가 적용된 이론식과 차이를 발생하기 때문인 것으로 생각된다.

3.3. pH에 따른 구리이온 농도의 변화

유량을 13 L/min, 전류밀도를 0.64 mA/cm²로 고정하고 pH를 산성, 중성 그리고 알칼리 용액으로 변화시키며 수용액의 pH가 생성되는 구리이온 농도에 미치는 영향을 고찰하였다. Fig. 5는 다양한 pH에 따른 배출되는 수용액내 구리이온농도의 변화를 보여주고 있다. pH 7.5를 기준으로 볼 때 산성으로 갈수록 구리의 용해속도는

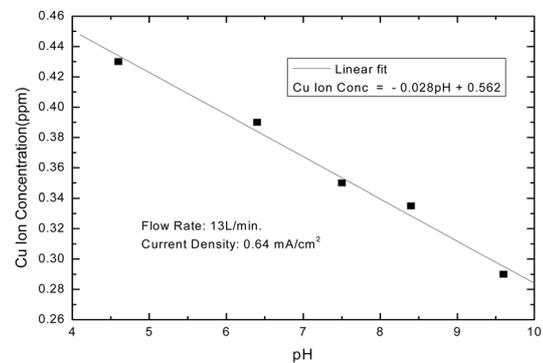


Fig. 5. The effect of pH in water on the copper ion concentration.

Table 1. The changes of voltage, power consumed and copper ion concentrations with various conductivities of water(flow rate: 13 L/min, current: 0.2 A, pH: 7.5)

Conductivity ($\mu\text{S/cm}$)	Voltage (V)	Power consumed (Watts)	Copper ion Concentration (ppm)
130	6.6	1.32	0.38
176	5.5	1.10	0.36
225	4.4	0.88	0.33
300	3.4	0.68	0.35

증가하며 알칼리로 갈수록 구리이온 농도는 일차적으로 감소함을 알 수 있다. 구리는 pH가 7인 물에서 안정화된 구리이온으로 용해되고 산성에서는 구리이온으로 용해되는 전기화학적 반응이 활발하게 일어나며 pH가 8이상일 때에는 구리산화물의 형태로 존재한다.¹⁸⁾ 이러한 특징에 의해 알칼리 용액에서는 구리산화물이 전극 표면에 침착되어 수산화 피막을 형성하기 때문에 구리이온이 잘 해리 되지 못하므로 구리이온의 농도가 감소된다.

3.4. 전기전도도에 따른 구리이온 농도의 변화

물의 전기전도도를 변화시켰을 경우 생성되는 구리이온 농도의 변화를 Table 1에 나타내었다. 유량을 13 L/min, 전류밀도를 0.64 mA/cm²로 고정하고 pH를 7.5로 고정한 다음에 전기전도도를 130, 176, 225 및 300 $\mu\text{S/cm}$ 로 증가시켜 실험을 수행하였는데 측정 전압은 6.6, 5.5, 4.4 및 3.4 V로 각각 감소하는 경향을 보인 반면에 구리 이온의 농도는 0.38, 0.36, 0.33 및 0.35 ppm으로 약간의 변화는 있었으나 농도 변화폭은 매우 미미하여 거의 일정하게 생성된다고 볼 수 있다. 이 결과를 통해서 전도도의 변화는 전기화학반응 기구에 별로 관여하지 않으며 용액의 저항에 의한 전압강하에 주로 관련된다는 이론과 일치함을 알 수 있었다.¹⁸⁾

3.5. 구리이온에 의한 조류제거

물속의 조류농도는 Chlorophyll-a 농도를 측정함으로써 그 농도를 알 수 있다. 본 연구에서는 황산구리를 물에 용해시켜 얻은 경우와 구리의 전기분해에 의해 생성된 구리이온을 사용할 경우에 대한 조류제거 효율을 비교하고자 하였다. Chlorophyll-a 농도는 조류 경보의 범위인 25~100사이의 값인 45.42 mg/m³을 기준으로 하였다. 황산구리를 첨가한 물의 농도를 0.05~0.6 ppm의 범위사이로 하여 녹조류 제거율을 자연광 상태에서 5일간 관찰한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 구리이온 농도가 증가함에 따라 Chlorophyll-a 농도가 크게 감소함을 볼 수 있으며, 구리 이온 농도가 0.2 ppm 이상의 물에서 조류가 효과적으로 제거됨을 알 수 있다. 또한 구리이온이

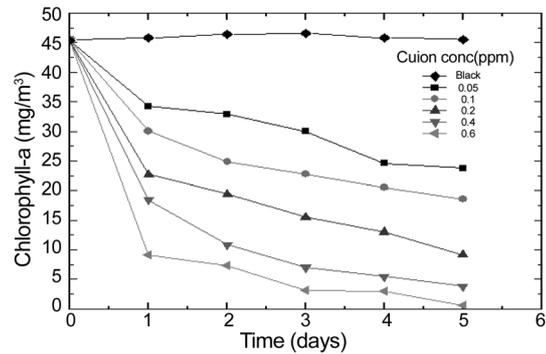


Fig. 6. The removal of algae with various copper ion concentrations prepared by copper sulfate.(Initial Chl-a Concentration: 45.42 mg/m³)

첨가되지 않은 blank 샘플에서는 Chlorophyll-a 농도가 거의 일정함에도 불구하고 구리이온 농도가 미미한 0.05 ppm인 물에서도 5일 동안 약 50%의 감소효과를 보여 조류의 상당한 억제효과를 볼 수 있었다. 즉 소량의 구리 이온으로도 조류의 성장에 있어 물질대사의 교란과 성장 억제를 시킬 수 있음을 알 수 있다. 황산구리를 용해시킨 구리이온을 투여한 경우 5시간 후의 구리이온 농도에 따른 조류제거율을 Table 2에 나타내었다. 0.05 ppm의 구리이온 농도의 경우에도 5일 후 약 48%의 제거율을 보이고 있으며 0.2 ppm의 경우 약 80%, 0.4 ppm 이상의 농도에서는 90%이상의 제거율을 보임을 알 수 있다. 구리 전해 반응기로부터 생성된 구리이온 농도를 0.2, 0.4, 0.6 ppm으로 변화시켜 조류의 제거율을 관찰한 결과 황산동을 첨가한 경우와 마찬가지로 구리이온의 농도가 높아질수록 조류의 제거가 잘 이루어 졌으며 Chlorophyll-a 초기농도를 기준으로 계산한 녹조제거율의 경우 Table 3에서 보듯이 황산구리를 첨가한 결과와 전기분해를 통해 얻은 구리이온을 첨가한 경우의 결과가 거의 일치함을 알 수 있다.

Table 2. Algae removal efficiency with various copper ion concentrations prepared by copper sulfate

Copper ion concentration(ppm)	0.05	0.1	0.2	0.4	0.8
Algae removal efficiency(%)	47.66	59.27	79.83	91.66	98.68

Table 3. Comparison of algae removal efficiency with the preparation methods of the copper ion

Preparation method	Copper ion concentration(ppm)		
	0.2	0.4	0.6
Copper sulfate	79.83%	91.66%	98.68%
Copper electrolysis	75.94%	91.99%	99.56%

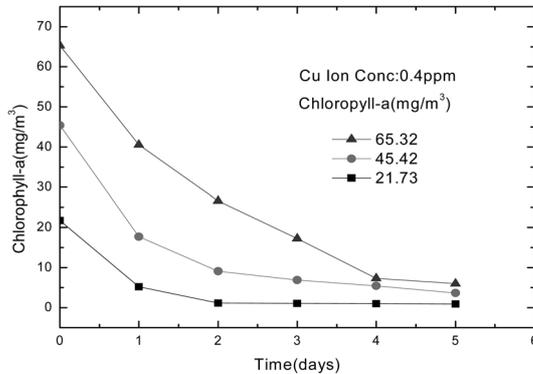


Fig. 7. The removal of algae with various chlorophyll-a concentrations under constant copper ion concentration prepared by copper electrolysis.

구리이온 농도를 0.4 ppm으로 고정하고 조류농도를 변화시키며 조류 제거율의 변화를 살펴본 결과가 Fig. 7에 나타나 있다. 조류의 농도가 클수록 조류가 보다 급격히 제거됨을 알 수 있으나 조류의 농도가 작을 경우 2일 후에 거의 완전히 조류가 사멸됨을 보여 조류효율은 더 향상됨을 알 수 있다. 이는 조류가 크게 퍼진 경우보다는 그 농도가 작을 때 구리이온의 첨가효과가 보다 크다고 알려진 보고 내용과 일치한다.^{4,13)}

4. 결 론

본 연구에서는 조류제거를 위한 구리이온을 생성하는 환경 유체흐름 반응기에 대한 공정 특성을 파악하고 구리이온의 조류제거에 대한 효율도 고찰하였다. 전류 밀도가 증가하면 이에 비례하여 균등조로부터 배출되는 구리 이온 농도가 증가함을 알 수 있었다. 원하는 구리 농도를 전류밀도를 조절하여 얻을 수 있었으며 패러데이 효율은 90% 이상임을 알 수 있었다. 유량을 증가시키면 구리이온농도는 감소하였으며 이는 전극에서의 반응속도와는 상관없이 물의 증가량에 따른 희석 때문임을 알 수 있었다. 이 반응에서는 미미한 전류를 인가하기 때문에 대류에 의한 농도과전위의 영향은 거의 없었다. 물의 pH가 증가할수록 생성되는 구리이온 농도는 이에 반비례하여 감소함을 알 수 있었으며 전기전도도의 변화는 배출되는 구리이온 농도에 별 영향을 미치지 않았으며 다만 소모되는 전력에만 영향을 주었다. 조류의 제거 현상을 고찰한 결과 구리이온 농도가 증가함에 따라 Chlorophyll-a 농도가 크게 감소함을 볼 수 있으며, 구리이온 농도가 0.2 ppm 이상일 때 조류가 효과적으로 제거됨을 알 수 있다. 황산구리를 용해시킨 구리이온을 투여한 경우 5일 후의 구리이온 농도에 따른 조류 제거율은

0.05 ppm의 구리이온 농도의 경우에 약 48%, 0.2 ppm의 경우 약 80%, 0.4 ppm이상의 농도에서는 90%이상의 제거율을 보였다. 전기분해를 통해 얻은 구리이온을 첨가한 경우의 결과도 황산구리를 사용한 결과와 거의 일치함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 홍익대학교 학술진흥연구비 지원(2009)에 의해 일부분 수행되었으며 본 연구에 도움을 주신 우호건설(주) 및 최우석과장에게 감사드립니다.

참고문헌

1. The Ministry of Environment in Korea, Environmental survey on the present state of national lakes and set up of receptor sites in main lakes (1994).
2. K. Ha, H.W. Kim and K. J. Ju, "The transition mechanism of plant plankton in the downstream of Nak Dong River", Environmental Inst. of In-Je Univ. the Proceedings of the 4th Symposium: 21 (1995).
3. W. A. Wurts, 'Use of Bluestone for algae control', www.ca.uky.edu/wkrec/wurtspage.htm.
4. G. P. Cooke and R. H. Kennedy, 'Managing drinking water supplies' *Lake and Reserv. Manage.*, **17**, 157 (2001).
5. K. D. Neder, G. A. Carneiro, T. R. Queiroz and M. A. A. Desouza, 'Selection of natural treatment processes for algae removal' *J. Water Science and Technology*, **46**, 347 (2002).
6. F. G. Edwards, D. L. Fendley and Lunsford, 'Electrolytic treatment of an industrial wastewater from a hosiery plant' *Water Environment Research*, **78**, 435 (2006).
7. C. G. Alfafara, K. Nakano, N. Nomura, T. Igarashi and M. Matsumura, 'Operating and scale-up factors for the electrolytic removal of algae from eutrophied lakewater' *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, **77**, 871 (2002).
8. A. A. Liao, M. Spitzer and A. J. Motheo, 'Electrocombustion of humic acid and removal of algae from aqueous solutions' *J. Appl. Electrochem.*, **38**, 721 (2008).
9. K. D. Kim, "A study on the process of coagulant sedimentation for the algae removal in water treatment", MS Thesis, Seoul University (1997).
10. G. H. Azarian, A. R. Mesdaghinia, F. Vaezi, R. Nabizadeh and D. Nematollahi, 'Algae removal by electrocoagulation process, application for treatment of the effluent from an industrial wastewater' *Iranian J. Publ. Health*, **36**, 57 (2007).
11. "The Science of Ionization", www.proenv.com/algae-how-it-works.htm.
12. J. Dingman, 'A comparison of swimming pool disinfections: Chlorine vs. copper/silver ion' *Environmental*

- Health Review*, Fall, 73 (2006).
13. T. R. Muraleedharan and C. Venkobachar, 'Mechanism of biosorption of copper (II) by *Ganoderma lucidum*' *Biotechnol. Bioeng.*, **35**, 320 (1990).
 14. F. Pagnanelli, L. Toro and F. Veglio, 'Olive mill solid residues as heavy metal sorbent material: a preliminary study' *Waste Management*, **22**, 901 (2002).
 15. N. Ahalya, T. V. Ramachandra and R. D. Kanamadi, 'Biosorption of Heavy Metals' *Research Journal of Chemistry and Environment*, **7**, 71 (2003).
 16. A. Eaton, A. E. Greenberg, E. W. Rice, L. S. Clesceri (eds.), "Standard methods for the examination of water and wastewater", 21st ed., American Public Health Association Publications, Washington (2005).
 17. J. Newman, "Electrochemical Systems", John & Wileys, New York (1991).
 18. R. Dortwegt and E. V. Maughan, "The chemistry of copper in water and related studies planned at the advanced photon sources", *Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference*, 1456, Chicago (2001).