

3가철 코팅 불가사리 흡착제 제조 및 구리 제거 특성 평가

양재규 · 유목련 · 이승목*

관동대학교 토목 · 환경학부

Preparation of Fe(III)-Coated Starfish and Evaluation of the Removal Capacity of Copper

Jae-Kyu Yang · Mok-Ryun Yu · Seung-Mok Lee[†]

School of Civil and Environmental Engineering, Kwandong University

(Received 23 November 2005, Accepted 19 December 2005)

Abstract

Fe(III)-Coated Star Fish (ICSF) was prepared by reaction of calcined Star Fish (SF) with Fe(III) solution at an elevated temperature. To investigate the stability of ICSF at acidic condition, dissolution of Fe was studied at pH 2 as a function of time. Extracted iron was negligible over the entire reaction time. This stability test suggests the applicability of ICSF in the treatment of wastewater even at low pH. Adsorption capacity of Cu(II) onto SF and ICSF was investigated in a batch and a column test. In the pH-edge adsorption, adsorption of copper onto SF and ICSF was quite similar over the entire pH range due to the presence of an important amount of Fe in SF itself. From the adsorption isotherm obtained with variation of the concentration of Cu(II), ICSF showed 1.6 times greater adsorption capacity than SF. Also, ICSF showed a greater removal capacity of Cu(II) in the column test.

keywords : Adsorption, Copper, Fe(III), Iron-coated star fish, Star fish

1. 서론

불가사리의 주된 사냥감은 전복, 조개, 굴, 큰 가리비, 홍합 등의 어미 또는 어린패류로서, 한 마리당 하루에 멧게 4개, 전복 2개 및 홍합 10개 정도를 먹으며, 또한 죽은 물고기까지도 무차별적으로 잡아먹는 포식성을 가지고 있어 양식업에 큰 피해를 주는 '해적생물' 이라고 알려져 있다. 이러한 불가사리의 번식으로 인한 양식업의 큰 피해를 막기 위해, 현재 우리나라의 수협에서는 이를 해결하기 위한 방안으로 어망 등을 통해 포획되는 불가사리를 어민들로부터 수매하는 방법을 통하여 불가사리를 회수 및 처분하고 있으나, 회수한 불가사리의 재이용방안은 현재 불가사리를 처리하여 퇴비화, 하수소화 슬러지 탈수보조제, 폐광폐수처리제, 인 제거용 흡착제로서의 응용성에 목적을 두고 재활용하려는 일부 시도외에는 다른 특별한 처리방법이 없는 실정이다(유 등, 2004; 김 등, 2002; 이 등, 2002).

금속도금, 채광, 제약, 전기 및 원자력산업 등과 같은 각종 산업활동에 의해 최근에는 수계에 여러 가지 독성중금속의 오염이 늘어나고 있다. 이러한 중금속은 미량일지라도 체내에 축적되어 잘 배설되지 않고 장기간에 걸쳐 부작용을 나타내며, 환경에 배출된 중금속은 분해나 자정작용에

의해 분해되지 않고 생물권을 순환하면서 먹이연쇄의 높은 단계에서 고농도로 축적됨으로 반드시 적절한 방법으로 처리하여야 한다. 수서 생태계를 보호하고 중금속물질에 의한 오염을 방지하기 위하여, 산업폐수로부터 중금속을 제거하기 위한 많은 연구들이 수행되어 오고 있는데, 현재까지 실용화되었거나 또는 연구되고 있는 것은 응집침전법, 이온교환법, 흡착법, 산화환원법, 전기분해법, 중화법 및 추출법과 같은 물리화학적 처리방법들이 주로 적용하고 있는데, 이중 흡착법은 수용액으로부터 미량의 중금속들을 제거하기 위한 한 가지 방법으로 적당하여 금속산화물, 활성탄, fly ash, peat, 활성슬러지, 폐슬러지, 생흡착제와 같은 수많은 자연적 및 합성적인 흡착제의 개발이 다방면으로 연구되어 왔다(김 등, 2002; 장 등, 1999; 김 등, 2003b). 최근에는 이러한 중금속을 제거하기 위한 흡착제로서 모래 및 활성탄을 지지체로 사용하고 3가철을 코팅 및 침착시킨 흡착제를 개발하고 이를 Cu(II), Pb(II), As(III), As(V) 등의 중금속으로 오염된 수계 처리에 적용하려는 연구가 국내외적으로 활발히 진행 중이다(양 등, 2003; 장 등, 2005; Reed et al., 2000; Vaughan et al., 2005). 본 연구에서는 양식장에 피해를 주는 불가사리의 문제점을 해결함은 물론 불가사리를 중금속을 처리하기 위한 흡착제로서의 재활용하기 위한 타당성을 평가하기 위하여 사전 처리된 불가사리를 담체로 사용하여 Fe(III)를 코팅시킨 불가사리(Iron-Coated Star Fish, ICSF)를 제조하고 제조한 ICSF가 여과재

[†] To whom correspondence should be addressed.
leesm@kwandong.ac.kr

질로서의 안정성을 갖기 위한 내산성 실험과 중금속이온 (Cu(II))에 대한 흡착특성을 연구하였으며 흡착성능을 Fe(III)를 코팅하지 않은 불가사리(SF)와 비교하였다.

2. 실험

2.1. 실험재료

본 실험에 사용된 불가사리 시료는 동해안 항·포구에서 수거된 것으로서, 수거한 불가사리를 105°C에서 24시간 건조하여 수분을 제거한 후, 회화를 위해 적당한 크기로 파쇄 하였다. 파쇄한 불가사리를 도가니에 넣고 550°C 전기로(Thermolyne의 1400 Furnace)에서 회화시킨 후, SIEVE SHAKER를 사용하여 mesh별로 체거름 하였다. Table 1은 회화 후 불가사리 시료의 pH, 중금속 함량 및 기타 무기물 조성을 나타내고 있다. 회화불가사리는 약한 알칼리성을 지니며 전체 무기물 중 Ca, Cl, Na 및 Mg 등이 주요 이온화 화종으로 확인되었다. 본 실험에서는 회화시켜 얻은 불가사리 중 16/20 mesh 분율을 사용하였다. 흡착질은 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (Duksan Pure Chemical Co.)를 사용하였으며 초순수(Milli-Q water)를 사용하여 1,000 ppm의 저장용액을 제조하였으며 각 흡착 실험시 희석하여 사용하였다.

실험에 사용된 모든 용액은 초순수 (Milli-Q water)를 사용하여 제조하였다. 흡착실험을 위해 125 mL 폴리프로필렌 병을 사용하였으며, 실험에 사용된 초자기구는 1 N 염산 세척액에 24시간 이상 담가 둔 후 증류수로 여러 번 세척하여 사용하였다. 반응용액의 pH는 HNO_3 및 NaOH 를 사용하여 조절하였으며, Orion사의 pH meter(720A)를 사용하여 측정하였다. 이온세기화학종으로 NaNO_3 를 사용하였으며, 반응 후 고행분은 여과지(Whatman의 Filter Papers 90 mm)를 사용하여 제거시켜 여액을 얻은 후 원자흡수분광광도계(Varian SpectrAA-300)를 사용하여 분석하였다.

Table 1. Chemical properties of starfish

Constituents	
pH	8~9
Ash (%)	49.9
*Metal contents (mg/Kg)	
Mn	8.71
Pb	14.5
Cu	1.40
**Inorganic contents (%)	
Na	12.99
Mg	8.00
Al	5.52
P	4.96
S	5.31
Cl	19.82
K	5.04
Ca	38.37

*Determined by acid digestion under reflux and AA

**Determined by EDX-Normalized to 100%

2.2. ICSF 제조

Fe(III) 코팅 불가사리(ICSF) 제조시 철 용액은 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (Duksan Pure Chemical Co.)를 사용하였으며 초순수(Milli-Q water)를 사용하여 제조하였다. 회화된 불가사리 16/20 mesh 200 g과 0.5 M $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 용액 1 L를 혼합한 후 희석된 HNO_3 및 NaOH 용액을 Fe(III) 용액의 pH를 조절하는데 사용하였으며 ORION사의 pH meter(720A)를 사용하여 pH를 측정하였다. pH를 7로 맞추는 불가사리와 Fe(III) 혼합용액을 Shaking Incubators(KUKJE사)에 넣고 95°C에서 24시간동안 진탕시켜 수분을 90% 이상 증발될 때 까지 반응시키면서 3가철이 불가사리 표면에 코팅이 이루어지게 하였다. 수분이 증발된 시료에 초순수를 사용하여 코팅이 되지 않은 철을 제거한 후 시료를 105 ± 5°C 건조기에서 24시간 건조하였으며 건조된 철코팅 불가사리를 중금속제거 흡착실험에 사용하였다.

제조한 ICSF내의 Fe 함량은 미국 EPA의 분석방법 3050B의 총 토양 중금속 농도 측정을 위한 산 분해 토양 중금속 용출법을 사용하여 ICSF로부터 Fe의 용출을 수행하였으며, 모든 실험의 분석은 원자흡수분광도계(Varian SpectrAA-300)를 이용하여 측정하였다.

2.3. 실험방법

제조한 ICSF의 내산성을 측정하기 위하여 준비된 여러개의 폴리프로필렌 병에 증류수 100 mL 씩 넣고 ICSF를 0.2 g씩 넣은 후 각 용액의 pH를 2로 맞춘다. pH 2로 맞춘 시료를 shaking incubators에서 진탕시키고 일정 시간 간격으로 꺼내어 즉시 Gelman사의 0.2 μm 여과지를 사용하여 ICSF 고행분을 제거시켜 여액을 얻은 후 원자흡수분광광도계를 사용하여 용출되는 Fe(III)의 농도를 측정하였다.

불가사리(SF)와 3가 철을 코팅시킨 불가사리(ICSF)를 사용하여 pH 및 흡착질 Cu(II) 농도변화에 따른 Cu(II) 흡착 실험을 회분식 방법으로 실시하였다. pH 별 흡착실험을 위해 여러 개의 125 mL 플라스틱용기에 SF 및 ICSF를 0.2 g을 주입하고 NaNO_3 를 사용하여 이온세기를 0.01 M로 조정된 20 ppm Cu(II) 용액을 100 mL씩 넣고 초기 pH를 각각 4~10 이내으로 조정하고, 항온진탕기 25°C에서 24시간 동안 반응시켰다. 이후 Gelman사의 0.2 μm 여과지를 사용하여 ICSF 고행분을 제거시켜 여액을 얻은 후 원자흡수분광광도계를 사용하여 흡착되지 않고 잔류한 Cu(II) 농도를 측정된 후 SF 및 ICSF에 의한 흡착분율을 계산하였다.

흡착질 농도 변화에 따른 흡착실험은 흡착질에 따른 흡착제의 농도를 2 g/L로 하고, 흡착질의 농도는 30 ppm에서 100 ppm까지 변화를 주었다. 초기 pH는 높은 농도의 구리가 침전하지 않는 pH 3으로 조절하고, 흡착질의 이온세기는 0.01 M NaNO_3 로 조절하고, 항온진탕기 25°C에서 약 24시간 반응시켰다.

SF 및 ICSF 2.0 g으로 충전된 내경 1.0 cm의 유리 column을 사용하여 Cu(II)의 투과능 실험을 실시하였다. 일정한 이온세기(0.01 M NaNO_3)와 온도 25°C에서 pH 4.5에서 32 ppm의 Cu(II) 투과능 실험을 실시하였다. Cu(II) 용

액은 Acuflo Series II high pressure liquid chromatography 펌프를 사용하여 상방향으로 분당 1.8 mL의 속도로 주입되게 하였으며 유출용액은 Spectra/Chrom CF-1 Fraction Collectors를 사용하여 수집한 후 Gelman사의 0.2 μm 여과지를 사용하여 ICSF 고형분을 제거시켜 여액을 얻은 후 원자흡수분광계를 사용하여 유출된 Cu(II)의 농도를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

SF 및 ICSF에 의한 구리의 흡착경향을 평가하기 위해 지구화학종 모사 프로그램인 MINEQL을 사용하여 20 ppm 및 100 ppm Cu(II)의 pH 변화에 따른 화학종들의 분포를 구하고 이로부터 Cu(II)가 용액상에서 안정하게 존재하는 pH 조건을 선정하였다.

Fig. 1에 나타난 바와 같이 pH 5.5 이전까지는 10^{-4} M Cu(II)의 대부분은 용존 자유 2가 구리(Cu^{2+})로 안정하게 존재하는 반면 중성 pH 이상에서는 거의 모든 Cu(II)가 Tenorite 형의 침전물로 존재하는 것으로 나타났다. 이에 비해 100 ppm Cu(II) 사용시, Fig. 2에 나타난 것처럼 Cu^{2+} 로 안정하게 존재할 수 있는 pH는 5.25 이하로 나타났다.

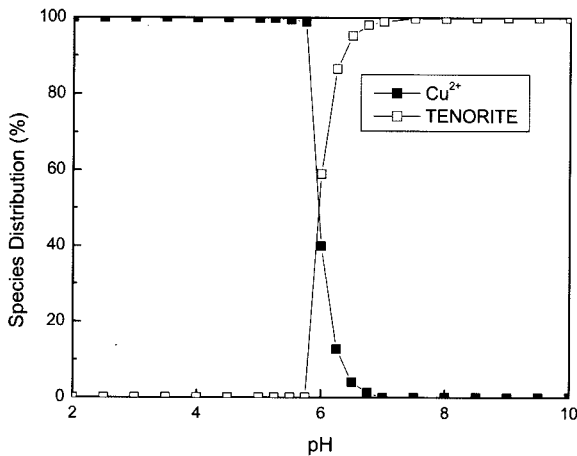


Fig. 1. Speciation result of 10 ppm Cu(II) by MINEQL.

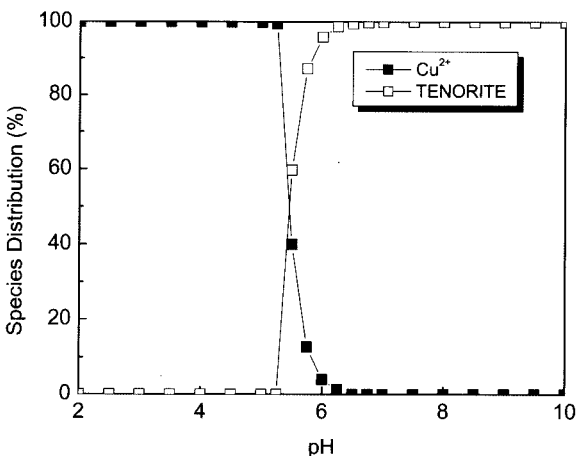


Fig. 2. Speciation result of 100 ppm Cu(II) by MINEQL.

이러한 모사 결과에 의해 10^{-4} M의 Cu(II)를 사용한 흡착 속도 실험은 pH 5에서 실시하였으며 Cu(II) 농도 변화에 따른 흡착실험은 최대농도인 5×10^{-3} M Cu(II)의 안정성을 고려하여 pH 3에서 실시하였다.

3.1. ICSF의 철코팅 함량

Fig. 3에는 제조한 ICSF에 코팅된 철의 함량을 담체로 사용한 SF의 철 함량과 비교하여 나타내었다. 회화된 불가사리 자체의 철 함량은 1,675 mg/kg으로 나타났으며 ICSF의 철 함량은 18,575 mg/kg이었다. 따라서 약 16,000 mg/kg 가량의 철이 담체인 불가사리에 부가적으로 코팅이 되었음을 알 수 있었다.

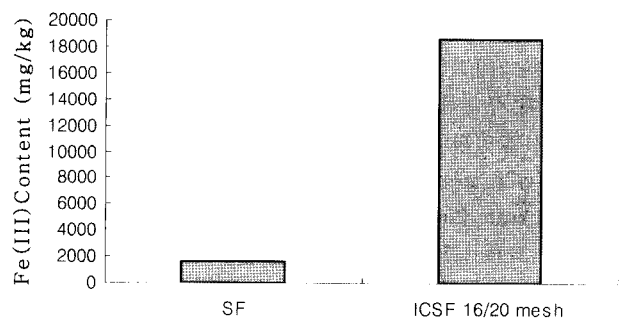


Fig. 3. Content of Fe in SF and ICSF.

3.2. ICSF의 안정성

Fig. 4는 제조한 ICSF의 내산성을 측정하기 위하여 용액의 pH를 2로 맞추는 후 시간변화에 따른 ICSF로부터의 철의 용출 시험결과를 나타낸다. 초기시간대에 채취한 시료에서는 철의 용출량이 0.15 ppm 정도가 되었지만 그 이후 모든 시간대에서 채취한 시료에서의 철의 용출량은 무시할 수 있을 정도의 미량 혹은 원자흡수분광기의 검출한계 이하로 나타났다. 초기시간대에 나타난 철의 용출은 제조한 ICSF를 초순수를 사용하여 코팅이 되지 않은 철을 세척과정에서 완전히 세척되지 않은 철이 용출된 것에 기인한 것으로 여겨진다. pH 2 조건에서 모든 시간대에서 나타난

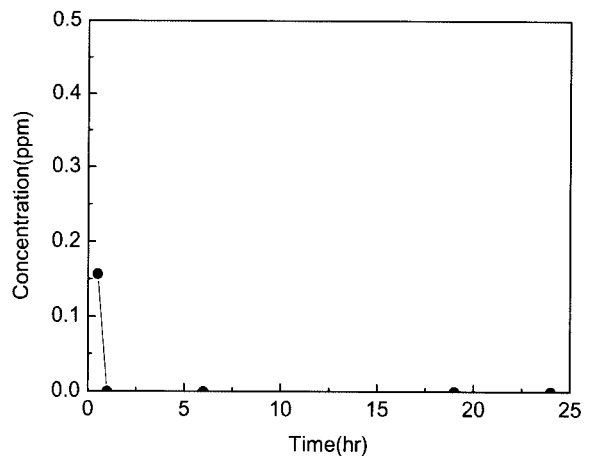
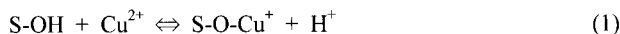


Fig. 4. Dissolution of Fe from ICSF at pH 2 as a function of time.

ICSF의 안정성 결과는 회화불가사리에 코팅된 철이 낮은 pH 조건에서도 안정하게 코팅되었음을 나타내는 것이며 ICSF를 일반배수 처리를 위한 흡착제 및 여과재질로 사용할 수 있음을 제시한다.

3.3. pH 변화에 따른 흡착

SF 및 ICSF를 사용하여 Cu(II)의 pH별 제거실험 결과가 Fig. 5에 나타났다. 약산성 및 약 염기성 영역의 pH에서 SF 및 ICSF에 의한 Cu(II)의 제거는 모든 pH 영역에서 약 90% 가량의 Cu(II) 흡착경향을 보였으며 SF 만에 의한 Cu(II)의 흡착량이 ICSF에 의한 Cu(II)의 흡착량과 큰 차이를 보이지 않았다. 이러한 경향은 SF 자체에도 상당량의 철이 함유되어 있으며 이러한 철에 의해 Cu(II)가 효과적으로 제거되기 때문에 ICSF와 차이가 나지 않는 흡착경향을 보인 것에 기인한다고 여겨진다. pH 증가에 따른 ICSF에 대한 Cu(II)의 흡착이 증가하는 이유는 불가사리에 코팅된 산화철이 Cu²⁺가 용해된 물과 접촉할 때, 반응식 (1)과 같은 흡착경향을 따르는 것에 기인한다고 여겨진다(김 등, 2003a).



여기서 S-OH는 불가사리에 코팅된 산화철이 물과 접촉하는 계면상에서 중금속들의 흡착에 관여하는 반응점을 나타낸다. 김 등(2003b)은 여러 가지 이온세기 화학종 변화에 따른 TiO₂에 대한 구리 흡착실험에서 TiO₂의 pH_{zpc}가 6.5임에도 대부분의 구리가 pH_{zpc} 이하에서 제거되는 것으로서 inner-sphere 형의 표면착화합물이 생성을 제시하였다. 마찬가지로 goethite, hematite 그리고 lepidocrocite와 같은 철(수)산화물에 대한 구리의 흡착도 이들의 pH_{zpc} 이하에서 이루어지는 것이 알려져 있다(Peacock et al., 2004). 따라서 불가사리에 코팅된 Fe(III) 표면과 용존 Cu²⁺가 inner-sphere 형의 표면착화합물을 형성하기 때문에 낮은 pH에서도 비교적 흡착효율이 높은 것으로 사료된다.

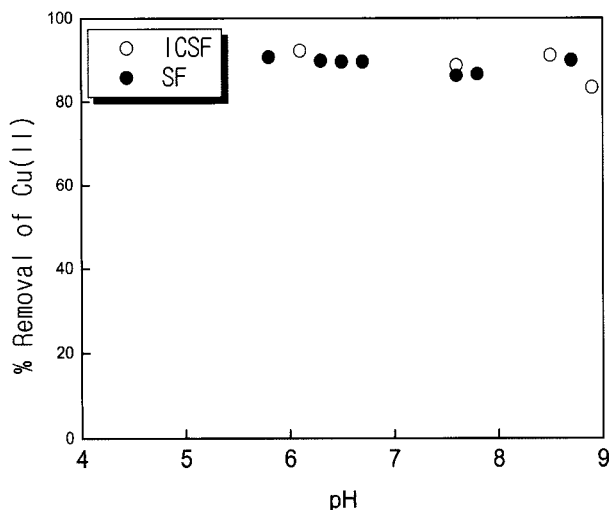


Fig. 5. Cu(II) adsorption onto SF and ICSF as a function of pH (20 ppm Cu(II), I.S = 0.01M).

3.4. Cu(II)농도 변화에 따른 흡착실험

Fig. 6은 SF 및 ICSF 주입량 2 g/L, Cu(II) 용액의 초기 pH를 3으로 일정하게 유지한 상태에서 Cu(II)의 초기주입 농도를 각각 30 mg/L 에서 100 mg/L 까지 변화시켰을 때 얻어진 Cu(II)의 흡착 결과를 흡착 후의 용액상(C_e, mg/L) 및 흡착제에 흡착된(q, mg/kg) Cu(II)의 양으로서 도시하여 나타내었다. 흡착제 단위 중량당 Cu(II)의 최대 흡착량을 구하기 위해 Langmuir형의 등온흡착식(q = QC_eK_a/(1+C_eK_a)) 적용하였을 때, Fig. 7에서와 같이 C_e/q에 대한 C_e의 선형 관계식의 상관계수(r²)는 SF의 경우에는 0.906 그리고 ICSF의 경우에는 0.987로 나타났다. 선형관계식의 기울기 및 절편으로부터 구한 SF에 의한 Cu(II)의 최대 흡착량(Q) 및 흡착등온식의 상수 K_a는 각각 50,940 mg/kg 및 0.275로 나타났다. 이러한 흡착등온 실험결과, 부가적으로 코팅된 철에 의해 ICSF가 SF에 비해 1.6배 정도 더 큰 흡착용량을 가짐을 알 수 있었다.

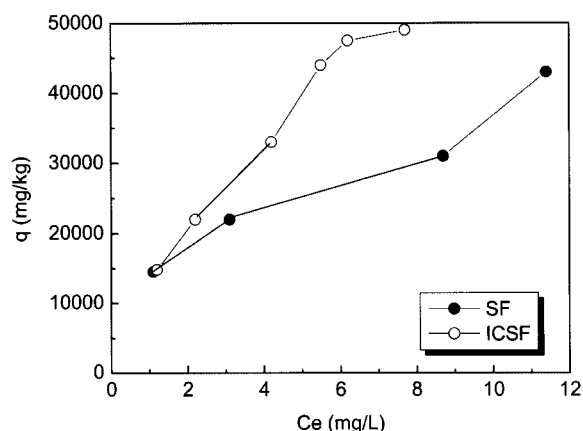


Fig. 6. Adsorption isotherm of Cu(II) onto SF and ICSF with variation of Cu(II) concentration at pH 3.

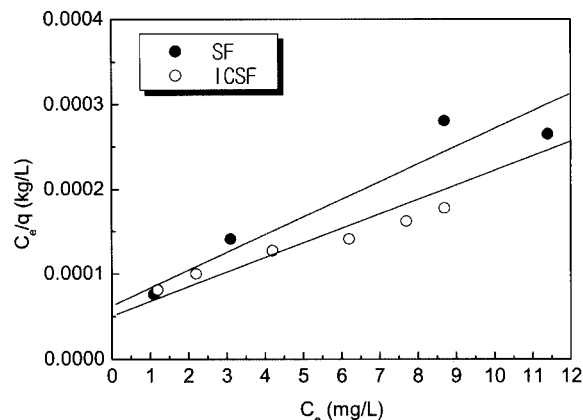


Fig. 7. Reciprocal plot of Cu(II) adsorption onto SF and ICSF with variation of Cu(II) concentration at pH 3.

3.5. 칼럼 흡착실험

Fig. 8은 SF 및 ICSF를 각각 2 g 주입시킨 칼럼에 의한

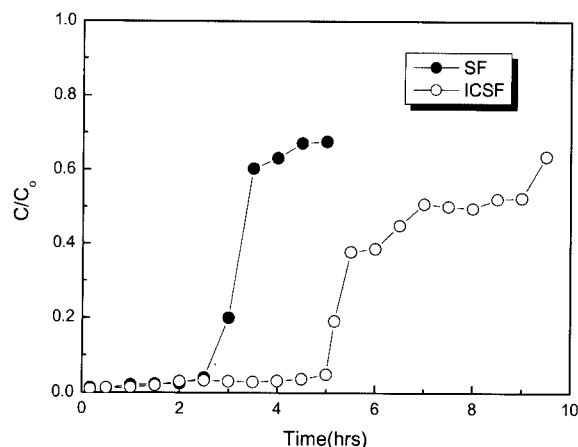


Fig. 8. Breakthrough curves of Cu(II) through SF and ICSF column (2 g ICSF, Cu(II) = 32 ppm, pH 4.5, flow rate = 1.8 mL/min, IS = 0.01 M NaNO₃).

Cu(II)의 여과실험 결과를 비교하여 나타낸 결과이다. SF 사용시 Cu(II)의 파과는 2시간이 경과하면서 시작되었지만 ICSF를 여과재질로 사용하였을 때는 5시간이 경과하면서 Cu(II)의 파과가 나타났다. 이러한 실험결과는 ICSF가 SF에 비해 Cu(II)를 효과적으로 흡착시킨다는 것을 나타내는 것이며 앞의 회분식 흡착등은 실험결과에서 얻어진 ICSF의 상대적으로 더 큰 Cu(II)의 흡착능과 일치하였다. 파과시간을 기준으로 하여 구한 SF 및 ICSF 단위중량당 Cu(II)의 제거결과는 각각 3,400 mg/L 및 8,600 mg/L로서 ICSF가 SF에 비해 2.5배 정도 더 큰 여과용량을 보였다. 이러한 실험결과를 토대로 할 불가사리에 철을 코팅시켜 얻은 ICSF는 구리함유 폐수처리에 효율적인 흡착제 및 여과재질로 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

4. 결론

불가사리를 회화시킨 후 이를 담체로 사용한 철(III)-코팅 불가사리를 제조하고 이를 Cu(II)에 대한 흡착특성을 철을 코팅하지 않은 불가사리와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 불가사리를 회화시킨 시료를 담체로 사용하고 3가 철과 반응시켰을 때 약 16,000 mg/kg 가량의 철이 담체인 불가사리에 코팅이 되었음을 알 수 있었다.
- 2) ICSF는 pH 2에서도 충분한 내산성을 가지고 있어서 pH 2이상의 중금속을 함유한 폐수처리용 흡착제 및 여과재질로 사용할 수 있음을 알 수 있었다.
- 3) SF 및 ICSF를 흡착제로 사용한 pH 변화에 따른 20 ppm Cu(II) 용액의 흡착실험은 모든 pH 범위에서 유사한 흡착 결과를 보였는데, 이러한 결과는 사용한 SF 자체에도 상당량의 철이 함유되어 있으며 이러한 철에 의해 Cu(II)가 효과적으로 제거되기 때문에 ICSF와 차이가 나지 않는 흡착경향을 보인 것에 기인한다고 여겨진다.
- 4) SF 및 ICSF를 흡착제로 사용하고 Cu(II)농도 변화에 따른 흡착실험결과를 Langmuir 흡착등온식으로 표현하였을 때, SF에 의한 Cu(II)의 최대 흡착량(Q) 및 흡착등온

식의 상수 K_a 는 각각 50,940 mg/kg 및 0.275로 나타났으며 ICSF에 의한 Cu(II)의 최대 흡착량(Q) 및 흡착등온식의 상수 K_a 는 각각 82,780 mg/kg 및 0.169로 나타났으며 ICSF가 SF에 비해 1.6배 정도 더 큰 흡착용량을 가짐을 알 수 있었다.

- 5) 칼럼여과실험에서 Cu(II)의 파과시간을 기준으로 하여 구한 SF 및 ICSF 단위중량당 Cu(II)의 제거결과는 각각 3,400 mg/L 및 8,600 mg/L로서 ICSF가 SF에 비해 2.5배 정도 더 큰 여과용량을 보였다. 이러한 실험결과를 토대로 할 불가사리에 철을 코팅시켜 얻은 ICSF는 구리함유 폐수처리에 효율적인 흡착제 및 여과재질로 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

사 사

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI05-01-02) 지원의 일부로 수행되었으므로 이에 감사드리며, 실험을 도와 준 전영준 군과 오성근 군에게도 감사를 표합니다.

참고문헌

- 김근한, 신인수, 최봉종, 이승목, 양재규, TiO₂에 의한 Cu(II)-EDTA 흡착에서 음이온물질 및 pH의 영향, *대한환경공학회지*, **25**(5), pp. 644-649 (2003a).
- 김근한, 이일영, 최봉종, 이승목, 김승호, 수산폐기물과 불가사리를 이용한 폐광폐수처리, *대한환경공학회지*, **24**(3), pp. 489-497 (2002).
- 김명진, 안규홍, 정예진, 토양에서의 비소흡착: 반응속도 및 흡착평형, *대한환경공학회지*, **25**(4), pp. 407-414 (2003b).
- 장암, 김원태, 김인수, Fly ash를 이용한 폐광산 광미의 중금속 고정화, *한국폐기물학회지*, **15**(3), pp. 169-177 (1999).
- 장윤영, 김광섭, 정재현, 이승목, 양재규, 박준규, 철코팅 모래흡착제 제조 및 비소 흡착, *대한환경공학회지*, **27**(7), pp. 697-703 (2005).
- 양재규, 유대환, 이성일, 권혁기, 조주환, 성준용, Iron-Coated Sand의 독성 3가 비소 흡착성능, *대한환경공학회지*, **25**(7), pp. 853-859 (2003).
- 유대환, 이재광, 이면주, 불가사리를 이용한 하수 소화슬러지 탈수보조제 제조에 관한 연구, *대한환경공학회지*, **26**(1), pp. 64-68 (2004).
- 이일영, 김근한, 최봉종, 이승목, 수산폐슬러지 및 불가사리를 이용한 인 제거 연구, *대한환경공학회지*, **24**(1), pp. 79-87 (2002).
- Peacock, C. L. and Sherman, D. M., Copper Sorption onto Goethite, Hematite and Lepidocrocite: A Surface Complexation Model Based on ab Initio Molecular Geometries and EXAFS Spectroscopy, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **68**, pp. 2623-2637 (2004).
- Reed, B. E., Vaughan, R. L. and Jiang, L., As(III), As(V), Hg, and Pb Removal by Fe-oxide Impregnated Activated Carbon, *Journal of Environmental Engineering*, **126**(9), pp. 869-873 (2000).
- Vaughan, R. L. and Reed, B. E., Modeling As(V) Removal by a Iron Oxide Impregnated Activated Carbon Using the Surface Complexation Approach, *Water Research*, **39**(6), pp. 1005-1014 (2005).