

3가철 함유 흡착제를 이용한 수용액상의 중금속 및 페놀제거연구

Removal of Heavy Metal and Phenol from Aqueous Solution Using Fe(III) loaded Adsorbent

김석준 · 김원기 · 이승목[†] · 양재규* · 이남희**
 Seok-Jun Kim · Won-Gee Kim · Seung-Mok Lee[†] · Jae-kyu Yang* · Nam-Hee Lee**

관동대학교 환경공학과 · *광운대학교 교양학부 · ** (주)선진환경
 Department of Environmental Engineering, Kwandong University · *Division of General Education, Kwangwoon University
 ** Sunjin Environmental Co

(2008년 11월 10일 접수, 2009년 7월 13일 채택)

ABSTRACT : Iron coated media (activated carbon, sand and starfish) were prepared at pH 4 and applied for the treatment of landfill leachate containing organic compounds and soluble metal ions such as Zn^{2+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} in batch and column experiment. The amount of iron coated in media was analyzed with EPA 3050B method. The removal efficiency of metal ions and phenol was compared with iron coated media. The amount of iron coated in Fe-AC and ICS(iron coated sand) were 1,612 mg/kg and 1,609 mg/kg, respectively, while it was higher with 1,768 mg/kg in ICSF(iron coated starfish). The result of batch study represent the highest removal efficiency in the treatment of wastewater using iron coated starfish.

In column study, the removal efficiency of phenol and metal ions was higher in multi-layered system of ICS, Fe-AC and ICSF compared to single layered system. Breakthrough time in the effluent was relatively enhanced for Cu^{2+} and Zn^{2+} in multi-layered system while the removal efficiency of Mn^{2+} were not varied much. Therefore, multi-layered system was identified as the better system for the treatment of wastewater containing of metal ions and organic compound.

Key words : Activated Carbon, Starfish, Heavy Metal, Phenol, Adsorption

요약 : 본 연구에서는 매립장 침출수 같은 중금속과 유기물을 함께 함유하고 있는 폐수를 처리하기 위하여, Fe(III)을 활성탄, 모래, 불가사리와 같은 담체에 침착 및 코팅시킨 흡착제를 사용하였다. 제조된 Iron Impregnated Activated Carbon(Fe-AC), Iron Coated Sand(ICS), Iron Coated Starfish(ICSF)는 EPA 3050B 방법을 통하여 각 매질에 함유된 철 함량을 분석하였으며, 회분식 반응조에서의 흡착실험을 통하여 각 흡착제의 Mn(II), Zn(II) 및 Cu(II)의 제거성능을 비교하였다. Fe-AC 및 ICS의 철 함유량은 각각 1,612 mg/kg 및 1,609 mg/kg으로서 매우 유사하였으며 ICSF의 철 함유량은 1,768 mg/kg으로 ICSF의 철 코팅함량이 다른 두 가지에 비해 150 mg/kg 정도 높게 나타났다. 회분식 실험에서의 Mn(II), Zn(II), Cu(II)의 제거효율은 ICSF, Fe-AC, ICS의 순으로 높은 제거율을 보였다. 각 흡착제를 단일 및 다중층으로 충전한 칼럼반응기에 의한 연속식 실험결과, 단일 흡착제에 비해 ICS, Fe-AC, ICSF의 순으로 충전한 시스템에서 높은 중금속 및 페놀제거효율을 나타내었으며, Cu(II)와 Zn(II)에 대해서는 뚜렷한 파과능을 보였으나 Mn(II) 제거율은 상대적으로 낮게 나타났다. 각 흡착제를 병합 충전한 다중층 칼럼반응시스템은 중금속 및 phenol제거에 효과적임을 알 수 있었다.

주제어 : 활성탄, 불가사리, 중금속, 페놀, 흡착

1. 서론

국내에서 하루에 배출되는 산업폐수량은 약 640여 만 톤으로 4대강을 비롯한 소규모 하천에 많은 양이 유입되고 있으며, 그중엔 중금속과 페놀과 같은 유해유기물이 함유되어 있다. 그 중 중금속과 페놀과 같은 유해유기물이 함유된 특정폐수는 약 200만톤 이상으로 알려져 있다.¹⁾ 금속도금, 채광, 제약, 전기, 원자력산업과 같은 산

업활동에 의해 수계에 여러 가지 독성중금속의 오염이 늘어나고 있으며, 생활 및 자연환경에 배출된 중금속은 체내에 유입시 잘 배설되지 않고 축적되어 생물권을 순환하면서 먹이연쇄에 의해 높은 단계의 고농도로 축적된다. 페놀은 저농도에서는 큰 독성을 나타내지 않으며, 생물학적 처리에 의해 비교적 잘 제거 되지만 고농도 일 때 큰독성과 난분해성 물질로 알려져 있다.²⁾ 이러한 중금속과 난분해성 유기물이 함유된 폐수는 기존의 미생물을

[†] Corresponding author : E-mail : leesm@kd.ac.kr Tel : 033-649-7535 Fax : 033-642-7635

이용한 생물학적 처리로는 제거가 어려워, 이들 중금속 및 유기물을 함께 처리할 수 있는 다기능성 여과물질 및 반응물질에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 다기능성 반응물질로는 강력한 산화력 및 응집제/흡착제의 기능을 갖는 Fe(VI)에 의한 Cu(II)-CN과 같은 독성 물질제거³⁾, 다공성 활성탄에 산화철을 침착시킨 Fe-AC에 의한 Cu(II) 제거⁴⁾ 그리고 모래담체에 산화망간 및 산화철을 코팅시킨 manganese coated sand (MCS) 및 iron coated sand (ICS)를 이용한 As(III), As(V) 동시 제거^{5, 6)}와 같은 연구가 활발히 진행 중이다.

이러한 여러 다기능성 반응물질들의 경우, 처리 대상 폐수의 성상 및 특성에 따라 적용성이 제한을 갖는다. 즉 Fe(VI)의 경우 산화제 및 응집제 혹은 흡착제로서의 다기능성을 가지지만 회분식 반응조에서만 적용이 가능하고 연속실험을 위한 여재로서의 활용성은 불가능하다. 그리고 ICS와 MCS의 경우 중금속에 대한 흡착특성 및 산화상태 조절 능력을 갖고 있어서 회분식 및 여과재질로서의 사용성은 다른 다기능성 반응물질보다는 우수하지만 적은 비표면적 및 기공도에 의해 유기물에 대한 제거력은 매우 낮은 편이다. Fe-AC의 경우에는 활성탄의 큰 비표면적 및 기공성 때문에 유기물에 대해서는 우수한 제거특성^{7, 8)}을 보였지만 중금속에 대해서는 제한적인 제거능을 보여서 후속적인 연구가 이루어져야 할 필요가 있다. 이러한 각 다기능성 반응물질들의 단점을 보완하기 위한 방법으로는 개별 반응성 물질들에 대한 개선이나 이들 개별 반응성 물질들의 병합을 통하여서 가능하게 된다.

따라서 본 연구에서는 다기능성 반응물질을 부착시키는 담체로서 활성탄, 모래 및 하소시킨 불가사리를 사용하였으며, Fe(III)를 침착 및 코팅시켜 제조한 Iron Impregnated Activated Carbon(Fe-AC), Iron

Coated Sand(ICS), Iron Coated Starfish(ICSF)를 다기능성 반응재질로 사용하고 이들을 단독으로 사용한 회분식 반응조에서의 중금속들의 제거특성을 비교하였으며 또한 이들 흡착제를 단일 충전 하거나 또는 이들을 병합하여 충전한 다중층 칼럼시스템에서의 중금속과 유기물의 제거 특성을 연구하였다.

2. 실험재료 및 방법

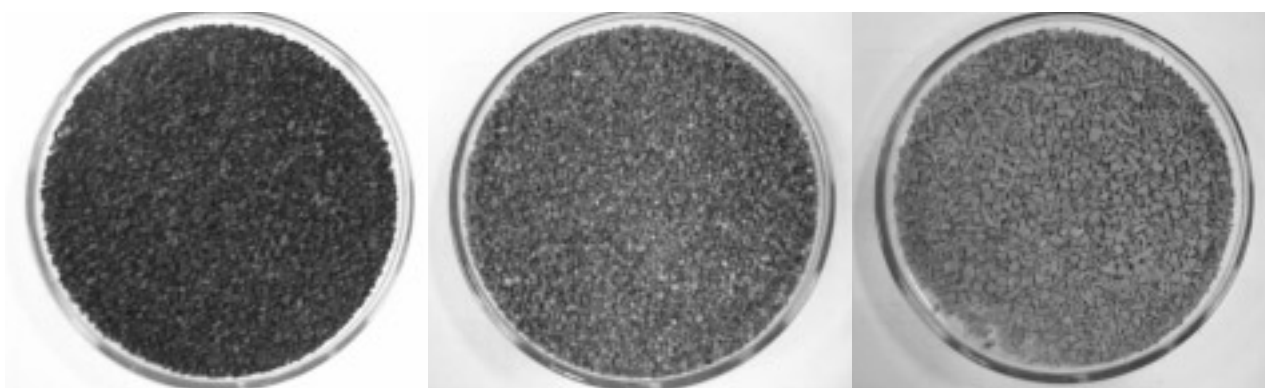
2.1. 실험재료

본 실험에서 사용한 활성탄은 입상활성탄(Calgon, 14~16 mesh)을 사용하였고, 모래는 주문진여과사를 사용하였다. 모래표면의 불순물 제거를 위해 HNO₃ 용액에 넣어 표면을 세척하였고, 증류수를 사용하여 수 회 세척한 후 건조기에 넣어 표면의 수분을 제거하였다. 불가사리는 동해 연안의 항만에서 수거된 불가사리를 사용하였다. 수거된 불가사리는 수분을 제거 한 후 5~6 cm 크기로 파쇄한 후 전기로(Chang Sin Science Co., C-MF)에 넣어 550℃에서 회화시켰다.

2.2. Fe(III)-침착 활성탄, Fe(III)-코팅 모래 및 Fe(III)-코팅 불가사리 제조

Fe-AC, ICS 및 ICSF를 제조하기 위하여 담체로서 사용한 활성탄, 모래, 불가사리는 14~16 mesh의 입경을 사용하였고, 침착 및 코팅에 사용한 철용액은 FeCl₃ · 6H₂O(Duksan Pure Chemical Co.)를 사용하였으며 초순수(Milli-Q water)를 사용하여 제조하였다.

Fe-AC, ICS 및 ICSF 제조시 pH를 4로 조절한 철용액 0.25 M 철용액 1 L를 삼각플라스크에 나누어 담아 각각 200 g씩 활성탄, 모래, 불가사리를 주입한 후에 항온



(a) Fe-AC

(b) ICS

(c) ICSF

Fig. 1. Pictures of the iron loaded adsorbents.

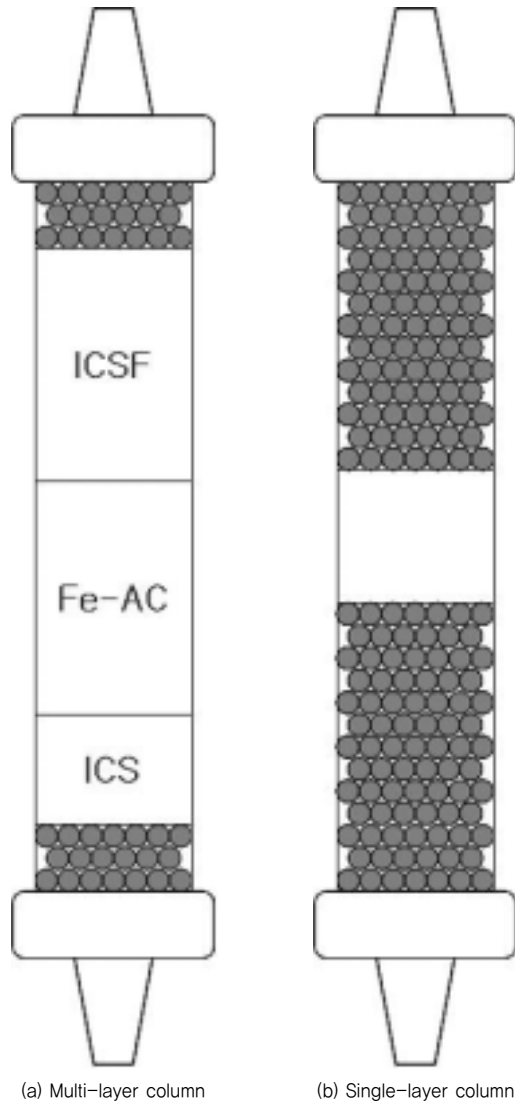


Fig. 2. Schematic diagram of the column system.

진탕기에서 100℃로 혼합하면서 수분을 증발시키기 위해 24시간 동안 진탕교반하였다. 수분이 제거된 매질에 증류수를 사용하여 침착 후 잔여 철을 세척제거 하였으며, 세척 후 105±5℃에서 24 시간 건조하여 Fig. 1과 같은 Fe-AC, ICS 및 ICSF를 얻었다.

제조한 Fe-AC, ICS 및 ICSF의 철 함량 분석은 EPA 3050B 분석법으로 원자흡광광도계(Shimadzu Co. SpectrAA-6800)를 사용하여 분석하였다.

2.3. 실험방법

회분식 장치에 의한 중금속 제거 실험은 다음과 같이 수행하였다. Mn, Zn 및 Cu 세 가지 중금속을 사용하였고, 망간용액은 Mn(NO₃)₂·6H₂O(Junsei), 아연용액은 ZnSO₄·7H₂O(Duksan Pure Chemical Co.) 그리고 구리용액은 CuCl₂·2H₂O(Kanto Chemical Co.)를 사

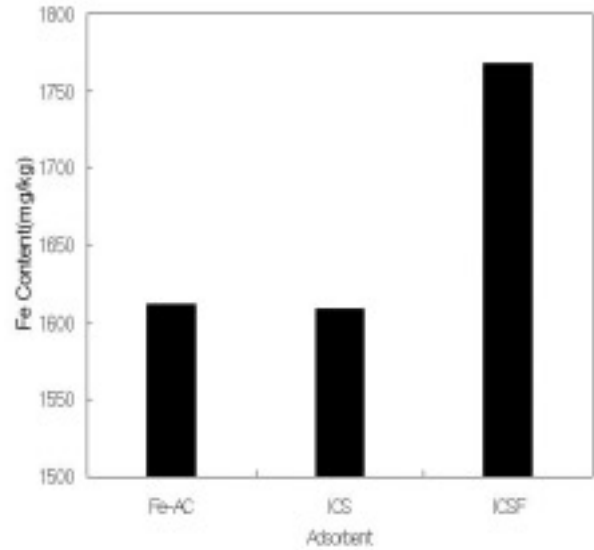


Fig. 3. Fe(III) content on Fe-AC, ICS and ICSF.

용하여 조제하였다. 먼저 125 mL 크기의 polyethylene 용기에 농도를 5 mg/L에서 30 mg/L까지 달린한 Mn(II), Cu(II), 그리고 Zn(II) 인공폐수 100 mL를 넣은 후 흡착제 0.5 g을 각각 주입한 다음 초기 pH 5.0에서 항온진탕기에서 25℃로 24시간 반응시켜 흡착을 진행한 후 여과하여 분석하였다.

Fe-AC, ICS 및 ICSF를 여과재질로 사용한 중금속의 연속식 실험은 다음과 같이 수행하였다. Mn 10 mg/L, Cu 7 mg/L, Zn 10 mg/L 그리고 phenol 50 mg/L의 합성 폐수(초기 pH 5.5) 1 mL/min의 유량으로 상향류로 주입하여 실험하였으며 각각의 매질에 의한 중금속 제거 작용과 ICS에 의한 여과작용, Fe-AC에 의한 phenol 흡착, ICSF에 의한 중금속 추가제거를 위하여 Fig. 2와 같이 직경 1 cm, 높이 12 cm의 칼럼내에 하단으로부터 유리구슬을 먼저 1 cm 높이로 채운 후 유리구슬 층 위에 다중층인 경우는 ICS, Fe-AC, ICSF의 순서로 ICS 2 g, Fe-AC 1.5 g, ICSF 1.5 g을 함께 적층하고 피스톤으로 압축한 후 다시 상단에 유리구슬을 채운 후에 실험을 실시하였다.

다중층으로 충전한 Fe-AC, ICS, ICSF의 중금속 제거 효율을 알아보기 위하여 ICS 2 g, Fe-AC 1.5 g, ICSF 1.5 g을 동일한 칼럼에 단일층으로 채워 동일조건하에서 실험을 또한 실시하였다. 실험 후 채취한 샘플 중의 용존 중금속 농도는 원자흡광광도기(Shimadzu Co. SpectrAA-6800)을 사용하였고 흡착되지 않은 phenol의 농도는 자외선흡광광도기(Optizen 2120UV)를 사용하여 분석하였다.

Table 1. Adsorption parameters and correlation coefficients for three metal ions of each adsorbent

Adsorbents	Adsorbate	Parameters and correlation coefficient		
		b(mg/kg)	a	R2
Fe-AC	Cu(II)	3,906	0.17	0.996
	Zn(II)	1,195	1.96	0.986
	Mn(II)	888	5.29	0.994
ICS	Cu(II)	1,720	1.00	0.996
	Zn(II)	690	3.38	0.982
	Mn(II)	494	6.89	0.997
ICSF	Cu(II)	6.897	0.018	0.963
	Zn(II)	2,618	0.16	0.998
	Mn(II)	1,236	1.12	0.994

3. 실험결과

3.1. Fe-AC, ICS 및 ICSF의 철 함량

Fe-AC, ICS 및 ICSF에 침착 및 코팅된 철 함량은 아래의 Fig. 3과 같이 나타났다. 0.25 M 농도에서 코팅한 Fe-AC의 철 코팅량은 1,612 mg/kg, ICS는 1,609 mg/kg 그리고 ICSF는 1,768 mg/kg으로 ICSF가 다른 두 가지 여재에 비해 약 150 mg/kg 정도 철 코팅함량이 높게 나타났다.

3.2. 회분식 반응조에서의 중금속 제거

ICS, Fe-AC, 그리고 ICSF 흡착제의 주입량 5 g/L에서 초기 pH를 5.0으로 고정시킨 Mn(II), Zn(II), Cu(II)의 용액의 주입 농도를 5 mg/L 에서 최대 30 mg/L까지 변화시키면서 등온 흡착 실험을 실시하여 Fig. 4~6와 같은 결과를 얻었다. 등온흡착 실험결과를 평가하기 위해 Langmuir 등온흡착식을 사용하였다. Langmuir isotherm은 다음의 식 (1)으로 표현할 수 있다.

$$q = \frac{abC_e}{1 + aC_e} \quad (1)$$

q는 흡착제 단위 질량당 흡착된 양(mg/kg), C_e 는 흡착 평형 후의 농도(mg/L), a는 흡착 강도와 관련된 상수이고, b는 최대흡착량(mg/kg)를 나타낸다. 위 식으로 C_e/q 와 C_e 에 대한 직선식으로 표현하면 식(2)와 같다.

$$\frac{C_e}{q} = \frac{1}{ab} + \frac{1}{b} C_e \quad (2)$$

Table 1에는 Langmuir 등온흡착식의 흡착등온상수와 상관계수(R^2)를 나타내었다. Fe-AC는 단위 kg 당 3,906 mg의 Cu(II), 1,195 mg의 Zn(II), 그리고 888 mg의 Mn(II) 제거가 가능함을 알 수 있었다. ICS는 단위 kg 당 1,720 mg의 Cu(II), 690 mg의 Zn(II), 그리고

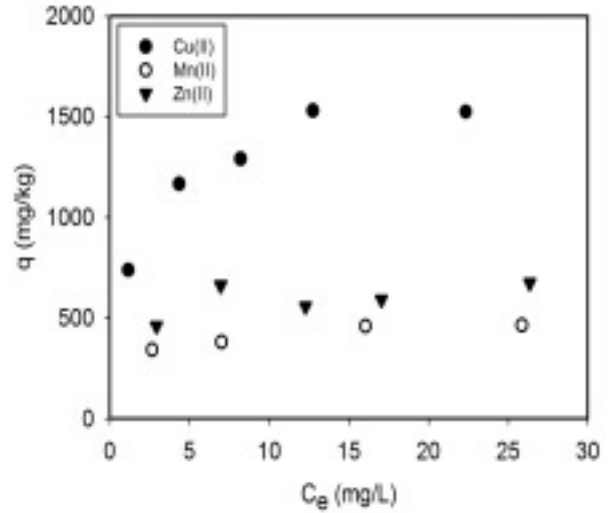


Fig. 4. Adsorption isotherm of Cu(II), Mn(II) and Zn(II) by ICS.

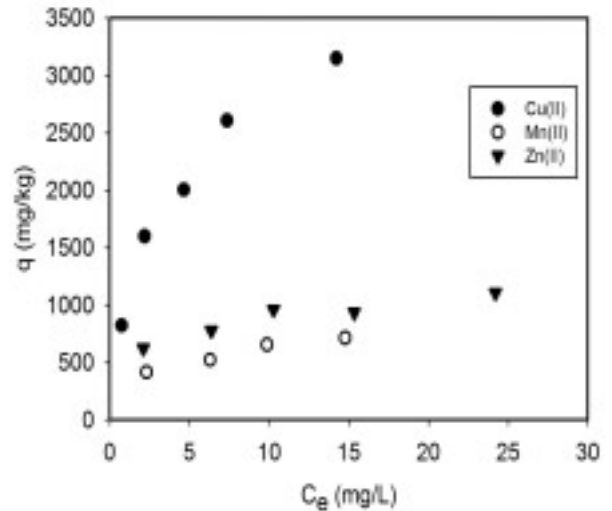


Fig. 5. Adsorption isotherm of Cu(II), Mn(II) and Zn(II) by Fe-AC.

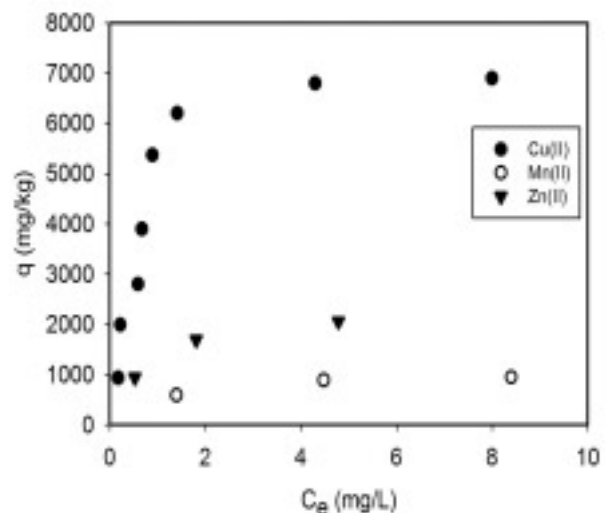


Fig. 6. Adsorption isotherm of Cu(II), Mn(II) and Zn(II) by ICSF.

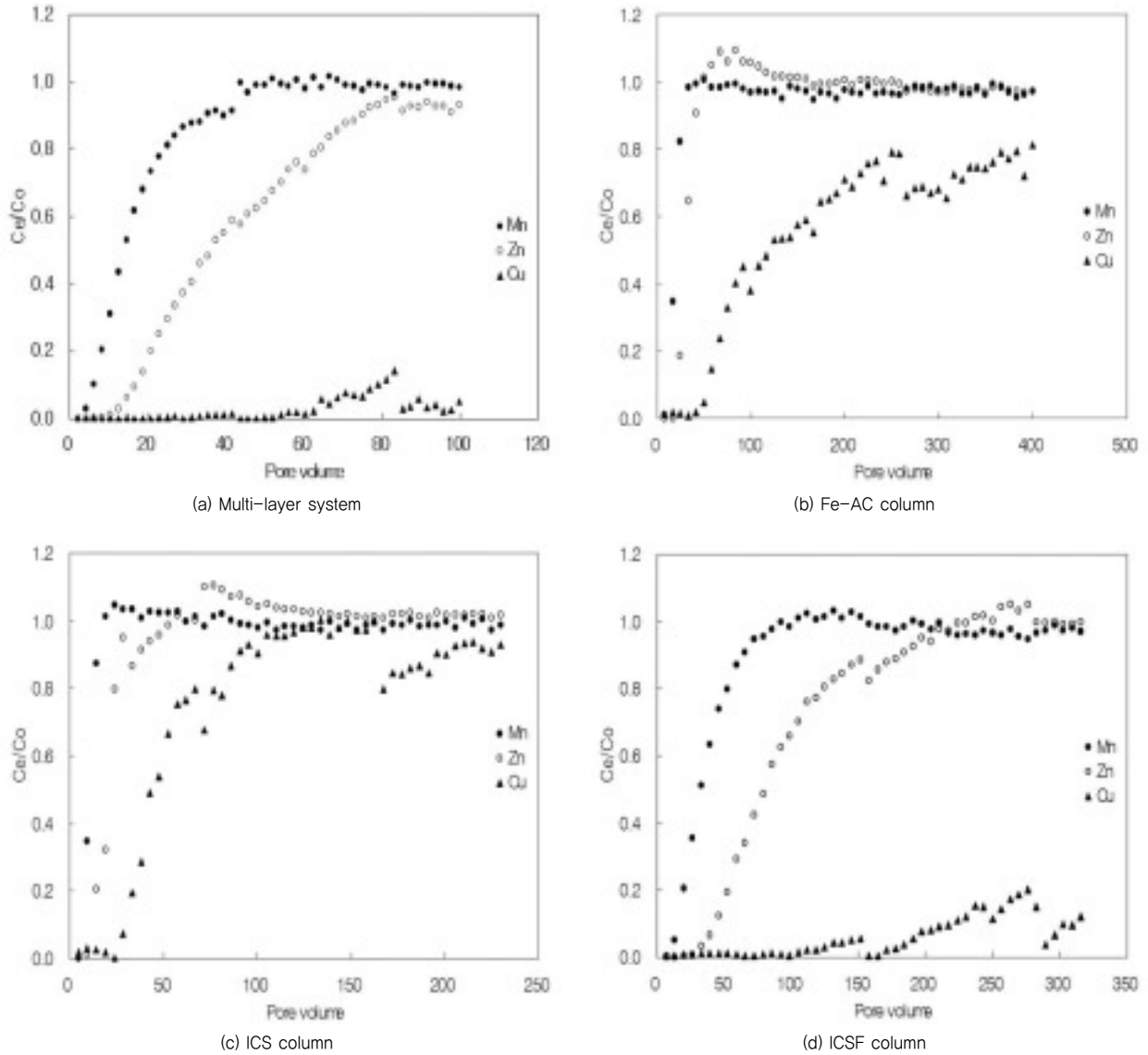


Fig. 7. Breakthrough curves for heavy metal in continuous system.

494 mg의 Mn(II) 제거가 가능함을 알 수 있었다. 그리고 ICSF는 단위 kg 당 6,897 mg의 Cu(II), 2,618 mg의 Zn(II), 그리고 1,236 mg의 Mn(II) 제거가 가능함을 알 수 있었다. 등온흡착 실험결과, 세 흡착제 모두 Cu(II) > Zn(II) > Mn(II) 순서로 제거율이 높았으며, 전체적인 중금속 제거경향은 ICSF > Fe-AC > ICS의 순으로 나타났다. ICSF 및 Fe-AC에 의한 Cu(II)의 최대흡착량 3,906

mg/kg은 Agrawal 등⁹⁾이 제거능은 비산재를 이용한 구리 제거량 (1,980 mg/kg) 및 Lai 등¹⁰⁾이 철코팅모래를 가지고 실시한 구리제거량 (259 mg/kg)보다는 우수한 결과를 나타내었다. ICSF가 가장 높은 중금속 제거율을 나타낸 것은 불가사리 담체에 코팅된 산화철의 함량이 다른 두 흡착제에 비해서 상대적으로 많은 것과 함께 담체인 SF가 갖는 고흡착성에 의한 영향으로 판단된다. ICS와 비교시 산화철 침착량이 유사한 Fe-AC 사용시 세 가지 중금속 모두에서 ICS보다 높은 제거능을 보이는 것 역시 담체로 사용한 활성탄 자체가 주문진사보다 비표면적이 크고 중금속에 대한 흡착능이 큰 이유에 기인 한 것으로 여겨진다. 담체로 사용한 활성탄 그리고 SF에 비해 산화철을 침착 및 코팅한 Fe-AC 그리고 ICSF가 상대적으로 중금속이온에 대한 높은 제거력을 나타내는 것은 기존

Table 2. The removed amount of heavy metals from iron loaded material in column experiments

	Mn(II)(mg/kg)	Zn(II)(mg/kg)	Cu(II)(mg/kg)
Multi-layer	2,378	4,318	9,924
ICSF alone	1,686	2,900	9,610
Fe-AC alone	884	672	4,558
ICS alone	569	631	2,634

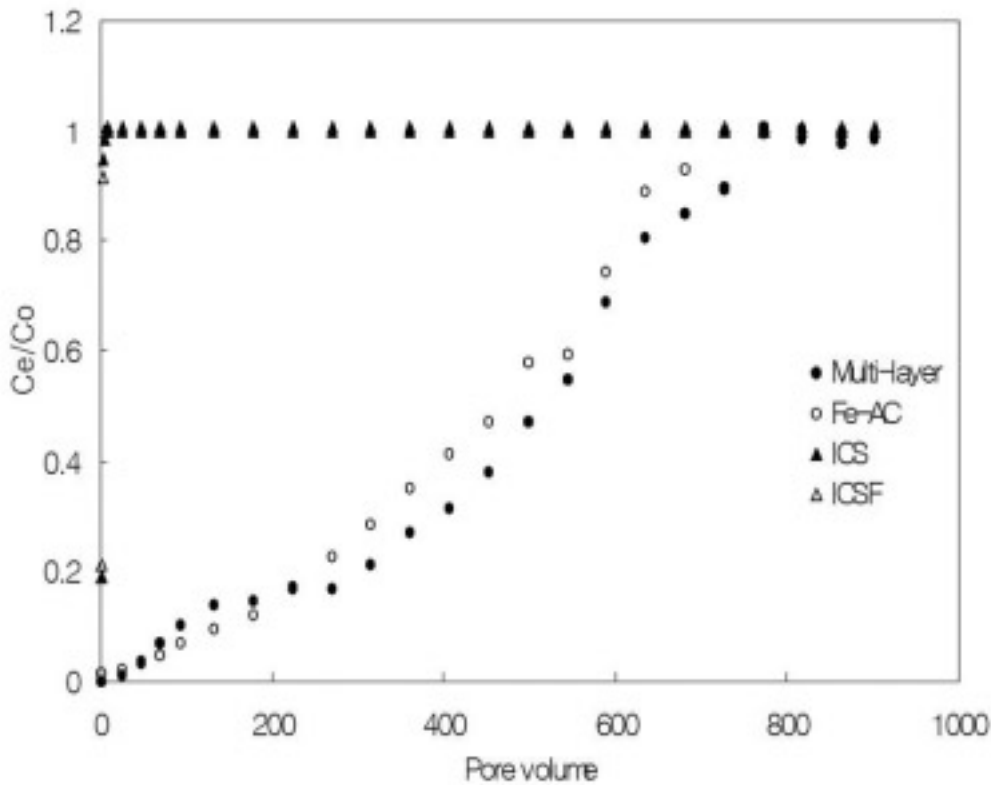
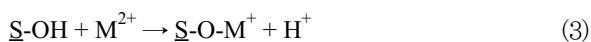


Fig. 8. Breakthrough curve for phenol in continuous system.

연구에서 알려져 있다. 4, 11, 12)

동일한 조건에서 산화철을 함유하지 않은 활성탄(AC) 및 불가사리(SF) 담체 만에 의한 수용액상의 Cu(II)를 제거하기 위한 선행연구^{11, 12)}의 결과와 비교하였을 때, 산화철을 코팅함으로써 Cu(II)의 제거효율 증가는 Fe-AC 및 ICSF에서 각각 9.4% 그리고 2.5%로 나타났다. 반면 산화철을 코팅함으로써 Mn(II)의 제거효율 증가는 Fe-AC 및 ICSF에서 각각 170.6% 그리고 5.6%로 나타났다. 이러한 실험결과, 산화철을 코팅함으로써 Cu(II)보다는 Mn(II)의 처리효율이 더 크게 증가되었음을 알 수 있었다. 금속산화물이 담체에 침착 및 코팅됨에 따른 부가적인 중금속이온의 제거능은 아래의 식 (3)과 같은 금속산화물 표면(S-OH)과의 흡착반응에 의해서 이루어지는 것으로 알려져 있다.^{13, 14)} 이러한 반응의 경우 일반적으로 용액의 pH가 증가할수록 증가한다. 알카리도가 높은 ICSF 이외의 Fe-AC 및 ICS를 이용한 흡착실험에서는 초기반응용액의 pH에 비해 반응이 종결되었을 때의 용액의 pH는 0.2-0.3 단위씩 감소하였다.



3.3. 연속식 장치에서의 중금속 제거

다중층으로 충전한 연속식 실험과 단일층을 이용한 연속식 실험의 결과는 아래의 Fig. 7과 같이 나타났다. 연속식 실험의 결과 다중층>ICSF>Fe-AC>ICS의 순으로 중금속 제거효율을 나타냈으며, Cu(II)는 모든 여재의 연속식 실험에서 효율적인 제거가 일어나 3가철 함유 모든 여재는 Cu(II)제거에 효과적임을 알 수 있었으며, 12 시간의 연속식 실험에서 물질수지식에 의해 제거된량은 Table 2와 같다. 다중층에서의 Mn(II) 제거총량은 2,378 mg/kg, Cu(II)는 9,924 mg/kg, Zn(II)는 4,318 mg/kg으로 나타났지만 Mn(II)은 모든 여재에서 가장 낮은 제거율을 보였다. 이것은 산화철 함유 여재를 사용하여 용존 망간을 흡착반응에 의해 제거하는 것은 상대적으로 효과적이지 못하다는 것을 제시하는 것이며 용존 Mn(II)의 산화에 의한 침전형성이 필요함을 나타낸다. Zn(II)은 다중층과 ICSF에서 매우 큰 제거가 일어났다. 여러 칼럼반응시스템의 비교결과, 다중층 여재의 연속실험의 경우 가장 효율적인 중금속 제거능을 보였으며, Fig. 8의 결과와 같이 다중층 내의 Fe-AC에 의한 phenol의 동시제거도 가능하였다. 단일층으로 구성된 3가철 침착 여재의 연속식 실험을 수행한 결과에서는 ICSF>Fe-AC>ICS의 순으로 중금속 제거 효율을 나타내었다. 다중층 및 ICSF 층에서의 단위 흡착제 단위 kg

당 중금속 제거율이 회분식 실험에서보다 높게 나타난 것은 흡착반응의 pH가 연속식 실험에서 더 큰 것에 기인한 것으로 판단된다. ICSF의 경우 중금속 제거를 위해서는 효과적으로 적용시킬 수 있으나, 유기물이 함유된 폐수처리에는 적용이 불가능하였다. Fe-AC의 경우 ICSF에 비해 Mn(II) 및 Cu(II) 제거량은 50% 정도였지만 폐놀은 매우 효과적으로 처리할 수 있어서 중금속 및 유기물이 복합적으로 함유된 폐수처리에는 반드시 Fe-AC를 사용하여 전체적인 복합오염물질 제거효율을 높일 수 있음을 알 수 있었다. 다중층으로 구성된 처리시스템은 금속 산화물 표면에 의한 중금속 흡착제거와, 활성탄공공에 의한 유기물의 흡착제거 그리고 ICSF의 고알카리도에 의한 침전화 효과 등에 의해 매립장침출수 및 광산폐수 등 복합오염 폐수의 처리에 효과적으로 적용할 수 있음을 제시할 수 있었다.

4. 결론

3가철 함유 여재에 의한 중금속의 회분식 실험과 연속식 실험에 의한 중금속, 유기물 제거에 다중층과 단일층을 비교 하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) Fe-AC, ICS, ICSF의 회분식 실험에서 중금속의 제거효율은 ICSF>Fe-AC>ICS 순으로 나타났으며, 철 코팅량은 Fe-AC 1,612 mg/kg, ICS 1,609 mg/kg, ICSF 1,768 mg/kg으로 중금속제거 경향과 일치하는 결과를 나타냈다.
- 2) 등온흡착 실험결과, 세 흡착제 모두 Cu(II) > Zn(II) > Mn(II) 순서로 제거율이 높았으며, 전체적인 중금속 제거경향은 ICSF>Fe-AC>ICS의 순으로 나타났다. ICSF가 가장 높은 중금속 제거율을 나타낸 것은 불가사리 담체에 코팅된 산화철의 함량이 다른 두 흡착제에 비해서 상대적으로 많은 것과 함께 담체로 사용한 SF 자체의 고흡착성에 의한 것으로 나타났다.
- 3) 연속식 실험 수행결과 전체적인 중금속 제거는 다중층>ICSF>Fe-AC>ICS의 순으로 나타났으며, phenol의 제거 실험에서는 다중층 칼럼과 Fe-AC가 유사한 결과를 나타내어 폐놀의 제거는 주로 다공성을 갖는 활성탄에 의해 주로 발생함을 알 수 있었으며 중금속과 유기물이 복합적으로 오염된 폐수처리에는 반드시 Fe-AC를 사용하여야 전체적인 복합오염물질 제거효율을 높일 수 있음을 알 수 있었다.

- 4) 산화철 함유 여재를 다중층으로 활용한 연속식 실험으로 중금속 및 phenol의 제거에 효과적으로 적용시킬 수 있음을 나타냈으며, 특히 재활용성이 낮았던 불가사리 폐기물의 우수한 중금속 제거능의 결과는 실공정 적용성에 대한 연구가치가 높아 지속적인 연구가 필요하다고 판단된다.

KSEE

사 사

본 연구는 지식경제부 지역혁신 인력양성사업 (과제번호: TG-05-03) 지원과 지방기술혁신사업(RTI05-01-02) 지원의 일부로 수행된 연구이며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 윤영삼, 최순범, 원성욱, "중금속 폐수처리를 위한 기술개발 현황 및 장단점 분석," 환경공학연구정보센터, Techinfo Part I, **3**(7), 68~85(2004).
2. Lin, K., Cooper, W. J., Nickelsen, M. G., Kurucz, C. N., and Waite, T. D. "Decomposition of aqueous solutions of phenol using high energy electron beam irradiation-A large scale study," *Appl. Radiat. Isot.*, **46**, 1307~1316(1995).
3. Tiwari, D., Kim, H. U., Choi, B. J., Lee, S. M., Kwon, O. H., Choi, K. M., and Yang, J. K., "Ferrate(VI): A green chemical for the oxidation of cyanide in aqueous/waste solutions," *J. Environ. Sci. Health, Part A.*, **42**, 803~810(2007).
4. 양재규, 이남희, 이승목, "pH를 달리하여 제조한 3가철 침착 활성탄에 의한 구리 제거특성 평가," 대한환경공학회지, **30**(3), 345~351(2008).
5. 장윤영, 김광섭, 정재현, 이승목, 양재규, 박준규, "철코팅 모래흡착제 제조 및 비소흡착," 대한환경공학회지, **27**(7), 679~703(2005).
6. 장윤영, 김광섭, 송기훈, 양재규, "철 및 망간코팅사 충전비를 달리한 여과시스템에서 3가 비소 제거의 최적 조건," 대한환경공학회지, **28**(11), 1186~1191(2006).
7. 이송우, 배상규, 권준호, 나영수, 안창덕, 윤영삼, 송승구, "활성탄의 세공구조와 Acetone Vapor 흡착특성의 상관관계," 대한환경공학회지, **27**(6), 620~625(2005).
8. Nakagawa, K., Namba, A., Mukai, S. R., and Tamon, H., "Adsorption of Phenol and Reactive dye from Aqueous Solution on Activated Carbons Derived from Solid Wastes," *Water Res.*, **38**(7), 1791~1798(2004).
9. Agrawal, A., Sahu, K. K., and Pandey, B. D., "A Comparative Adsorption Study of Copper on Various Industrial Solid

- Wastes," *AIChE*, **50**, 2430~2438(2004).
10. Lai, C. H., and Chen, C. Y., "Removal of metal ions and humic acid from water by iron-coated filter media," *Chemosphere*, **44**, 1177~1184(2001).
 11. 양재규, 유목련, 이승목, "3가철 코팅 불가사리 흡착제 제조 및 구리 제거 특성 평가," *한국물환경학회지*, **22**(1), 172~177(2006).
 12. 유목련, 양재규, 이승목, 김근한, "3가철 침착활성탄의 안정성 및 구리흡착특성 평가," *한국물환경학회지*, **22**(2), 328~332(2006).
 13. 양재규, 이승목, "Cu(II)/EDTA 몰비 변화에 따른 TiO₂에 의한 Cu(II)의 흡착," *대한환경공학회지*, **21**(12), 2235~2245(1999).
 14. 김근한, 신인수, 최봉종, 이승목, 양재규, "TiO₂에 의한 Cu(II)-EDTA 흡착에서 음이온물질 및 pH의 영향," *대한환경공학회지*, **25**(5), 644~649(2003).