

폐기물을 이용한 실험실폐수의 중화 및 철제거에 관한 기초연구

김은호 · 김석택
동아대학교 환경공학과

A fundamental study on neutralization and Fe removal in laboratory wastewater using wastes

Ean-Ho Kim · Seok-Taek Kim
Dept. of Environmental Engineering, Dong-A University

Abstract

In point of recycling wastes, batch test was conducted to examine the neutralization and Fe removal from laboratory wastewater using wastes. Oyster shell and slag had a buffer capacity to neutralize an acidic wastewater but tire rubber didn't. With increasing reaction time, dosage and agitation speed, Fe was well removed by wastes. As a result on the experiments of Freundlich isotherm, the adsorption intensities($1/n$) were 0.32~0.46 and the adsorption capacities(k) were 4.3~4.6 for removing Fe from laboratory wastewater by wastes. In view of these results, it was estimated that wastes containing the similar compositions as these could utilize the neutralization and adsorption of heavy metals in laboratory wastewater.

I. 서 론

연구 및 교육의 일환으로서 각종 이화학 실험실을 운영하고 있는 중등학교에서는 실험실습시간 등을 통하여 산성이면서 중금속 등의 각종 유해물질을 포함한 용액을 지속적으로 사용하고 있어 실험실폐수의 발생량은 소량이지만 변화가 아주 심할 뿐만 아니라 잔류성이나 독성에 의한 오염이 크게 대두되고 있다. '95년 12월 14일자 부산매일일보¹⁾의 보고자료에 의하면 P. 시에 소재해 있는 중등학교에서 교당 약 1.0~1.5 l/Month 정도로 소량의 실험실폐수가 발생한다고 보고하고 있다. 일부 학교는 위탁수거처리하거나 자체 처리시설 등으로 적법처리하고 있지만 거의 대부분이 머치

리 상태로 하수구에 회석방류되거나 건조 및 소각 등의 형식적인 방법으로 처리하고 있어 환경오염 악화의 또 다른 주범일 뿐만 아니라 주변지역 주민에게 건강상의 문제를 야기할 수도 있어 무엇보다도 환경에 대한 올바른 인식이 절실히 요청되고 있다. 특히, 중금속은 독성이 상당히 강하며 먹이 연쇄(Food Chain)를 통하여 최종적으로 인체에 고농도로 축적되어 급·만성적 중독현상을 유발할 수 있다.

일반적인 중금속 처리에는 흡착, 응집·침전, 이온교환, 역삼투, 전기화학처리, 증발회수 및 식물성 처리 등이 널리 이용되고 있으나²⁾ 이중에 처리공정이 비교적 간단하고 제거효율이 우수한 활성탄에 의한 흡착법이 가장 널리 이용되고 있다. 그러

나, 고효율의 활성탄은 고가이고 과다한 재생비용과 높은 유지관리비 등이 소요될 뿐만 아니라 원료 및 제조공정에 따라 흡착특성의 차이가 비교적 크기 때문에 저가의 고효율 활성탄의 제조가 비교적 힘든 단점이 있다³⁾. 또한, 실험실폐수의 발생량은 비교적 적기 때문에 처리에는 재정적인 어려움과 처리기술의 미숙으로 적절한 처리효과를 얻지 못하는 실정이며 또한 처리비용이 필요 이상으로 과다하게 소요되거나 슬러지 발생량이 많아 심각한 2차 환경오염을 유발할 수도 있어 새로운 방법의 모색이 절실하게 대두되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 폐기물의 재활용 측면에서 폐굴껍질, 슬래그 및 페타이어를 강산성의 실험실폐수의 중화능을 검토하고 실험실폐수내에 비교적 고농도로 존재하는 철의 제거 가능성을 고찰해보고자 한다.

II. 실험

1. 재 료

본 연구에서는 폐기처분되고 있는 폐굴껍질, 슬래그 및 페타이어를 분리·수집하여 증류수로 깨끗하게 세척한 후에 충분히 자연건조시켜 Ball mill로 분쇄하고 KS 표준체를 이용하여 $600\mu\text{m}$ 로 분리한 다음에 Dry Oven(HAN BACK SCIENTIFIC CO.)에서 약 105°C 를 유지하면서 약 24시간 동안에 가열증발건조시켜 흡습되지 않도록 데시케이터(MUN HWA CO.)속에 방냉보관하면서 표준시료로 사용하였다. 대상시료는 P. 시에 위치해 있는 고등학교로부터 강산성이고 고농도의 중금속을 함유하고 있는 실험실폐수를 사용하였다.

2. 방 법

2.1. 폐기물의 성상 및 유해성 평가

폐굴껍질 및 슬래그의 성상은 표준시료를 약 3~5분 동안에 200mesh 미만으로 분쇄한 후 약 10초 동안에 20~30ton의 무게로 가압성형하여 형광 X선 분석(Rigaku X-Ray Spectrometer RIX 2000)으로 파악하였다⁴⁾.

또한, 흡착제를 적당량 달아 증류수에 HCl을 가하여 pH 5.8~6.3으로 한 용매를 시료 : 용출액을

1 : 10(W : V) 비율로 혼합한 후에 상온·상압에서 교반회수가 매분 200회 정도, 진폭 4~5cm인 진탕기를 사용하여 약 6시간 진탕한 후에 여과($1\mu\text{m}$)하고 여과액을 적당량 취한 후에 검액시료로 사용하였으며 환경오염공정시험법⁵⁾에 준하여 중금속을 ICP(Inductively Coupled Plasma : JOBINY-VON, SY 500P)로 분석하여 유해성을 평가하였다.

2.2. 폐기물에 의한 중화능 실험

폐기물에 의한 중화능을 파악하기 위하여 500ml 비이커에 실험실폐수 250ml과 폐기물 각각 5g을 첨가하고 Jar Tester(CHANG SIN CO.)를 이용하여 약 130rpm으로 교반시키면서 10분, 30분, 60분, 90분, 120분, 150분 및 180분 간격으로 pH Meter(ORION MODEL 520A)를 이용하여 직접측정하였다.

2.3. 폐기물에 의한 중금속 제거실험

반응시간에 따른 중금속의 제거특성은 500ml 비이커에 실험실폐수 250ml과 폐기물 각각 5g을 첨가한 후에 Jar Tester를 이용하여 약 130rpm으로 교반시키면서 10분, 30분, 60분, 90분, 120분, 150분 및 180분 간격으로 채취하여 검액시료로 이용하였다. 주입량에 따른 중금속 제거특성은 500ml 비이커에 실험실폐수 250ml과 폐기물 각각 1g, 5g, 10g 및 15g을 첨가한 다음에 Jar Tester를 이용하여 약 130rpm으로 30분 동안 교반한 후에 채취하여 검액시료로 이용하였다. 교반속도에 따른 중금속 제거특성은 500ml 비이커에 실험실폐수 250mg/l과 폐기물 각각 5g을 첨가한 다음에 Jar Tester를 이용하여 교반속도 50rpm, 100rpm, 150rpm, 200rpm 및 300rpm으로 조정하여 30분 동안 교반한 후에 채취하여 검액시료로 이용하였다.

Freundlich 흡착등온식의 적용가능성을 검토하기 위하여 500ml 비이커에 실험실폐수 250mg/l와 폐기물별로 1g, 5g, 10g 및 15g을 첨가한 다음에 Jar Tester를 이용하여 약 130rpm으로 30분 동안 교반한 후에 채취하여 검액시료로 이용하였다.

중금속 분석을 위한 전처리는 검액시료에 염산 2ml을 넣고 혼합하여 완전하게 용해시킨 후에 시

료 50ml을 피펫으로 100ml 비이커에 넣고 왕수(질산:염산 = 1:3) 10ml를 첨가한 후에 가열하여 30ml가 될때까지 농축한 후에 방냉을 하였다.

그 다음에 100ml 메스플라스크에 여과(No. 5 여과지를 이용)를 하고 증류수로 비이커 및 깔때기를 2~3회 세척을 하고 100ml가 되도록 맞추었다. 이상의 방법으로 전처리한 후에 환경오염공정시험법⁵⁾과 Standard Methods⁶⁾에 준하여 중금속 잔류농도를 유도결합플라즈마발광광도기(Inductively Coupled Plasma<ICP> : JOBINYVON, SY 500P)를 이용하여 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 실험실폐수의 특성

Table 1은 P. 시에 위치해 있는 고등학교에서 배출되고 있는 실험실폐수의 분석결과를 나타내고 있다. 실험실폐수는 1차 분석결과를 제외하고는 중금속 농도는 거의 일정하면서 높은 것을 알 수 있다. pH는 평균 2.1로서 강산성을 나타내고 있으며 중금속의 평균농도를 보면 Fe가 48.1mg/l로 가장 높았으며 그 다음에 Zn이 12.5mg/l로 높은 농도를 나타내었다. 그 외에 중금속은 거의 10mg/l 이하의 농도를 나타내었다.

Table 1. Results of laboratory wastewater analyses.

Items	Samplings			
	1st	2nd	3rd	Avg.
pH(-)	2.5	1.9	2.0	2.1
Fe(mg/l)	45.5	57.3	41.6	48.1
Cr(mg/l)	14.5	5.8	0.37	6.9
Mn(mg/l)	4.6	0.15	3.04	2.6
Pb(mg/l)	0.8	17.3	13.7	10.6
Zn(mg/l)	2.06	15.8	19.6	12.5
Cd(mg/l)	0.13	ND	0.08	0.07
Cu(mg/l)	9.4	3.43	14.1	9.0

ND : Not detectable

2. 폐기물의 성상 및 유해성 평가

Table 2는 폐굴껍질 및 슬래그의 화학적 성상을 나타낸 것으로써 CaO, SiO₂, Al₂O₃ 및 Fe₂O₃ 등의 성분을 다량으로 함유하고 있다. 특히, 이들은 알칼리성 물질, CaO 성분을 각각 63% 및 29.92%를 함유하고 있는 것을 알 수 있다. 국내에 매장되어 있는 석회석내 CaO 성분⁷⁾이 40~55% 정도인 점을 고려해본다면 폐굴껍질의 경우에는 CaO 함유량이 높은 것을 알 수 있으며 슬래그의 경우에는 다소 낮은 함유량을 나타내고 있으나 김⁸⁾에 의하면 슬래그는 흡착효과와 pH 상승효과가 탁월하였다고 보고하였다. 이상의 결과로부터 폐굴껍질 및 슬래그는 산성인 실험실폐수의 중화능이 탁월하고 중금속 침전반응이 동시에 일어날 수 있어 폐기물의 활용 측면에서 우수한 수처리제로서 충분히 이용 가능성이 있을 것으로 평가되었다.

Table 2. Compositions of waste oyster shell and slag.

Items	Adsorbents	
	Oyster shell	Slag
CaO(%)	63.0	29.92
SiO ₂ (%)	20.0	30.0
Al ₂ O ₃ (%)	6.0	5.98
Fe ₂ O ₃ (%)	3.0	10.73
MnO(%)	-	3.08
MgO(%)	-	6.01
Others(%)	0.8	14.28

또한, 페타이어의 경우에는 이미 외국에서 수년 전부터 페타이어를 자원으로 재활용하기 위한 연구가 계속되고 있으며, 특히 페타이어가 폐수중에 함유되어 있는 중금속 제거를 위한 유용한 흡착제로 이용될 수 있다고 보고된 바가 있으며 이러한 이유는 페타이어중에 포함된 카본블랙이나 가황활성제로 가해진 ZnO가 흡착에 중요한 역할을 한다고 보고하였다⁹⁾. 일반적인 페타이어의 조성⁹⁾을 보면 Table 3에 나타난 바와 같으며 Elastomer이 61%로 가장 높으며 카본블랙 31% 및 ZnO 1.8%

등의 함유량을 나타내고 있다. 이상의 연구결과로 미루어볼 때 자연상태에서 잘 분해되지 않아 환경 오염을 유발시킬 뿐만 아니라 부존자원이 부족한 국내 현실에서 페타이어를 자원으로 재활용시 폐기물의 감소 및 에너지원으로서의 가치가 무한할 것으로 여겨진다. 한편, 최근 국내 강우의 pH가 빈번하게 산성이고 이러한 조건에서 용출 가능성이 그 어떠한 조건 보다 상대적으로 높기 때문에 폐굴껍질, 슬래그 및 페타이어를 장기적으로 무단방치할 경우에 극미량일지라도 유해성 물질의 용출량이 증가하여 동·식물이나 자연생태계에 치명적인 영향을 끼칠 수 있는 등 심각한 환경문제를 야기할 수도 있을 것으로 예상된다. 따라서, 폐굴껍질, 슬래그 및 페타이어의 재활용 가능성과 유해성 여부를 평가하기 위하여 용출시험을 행하여 Table 4에 나타내었다. 국내 용출기준치를 보면 Cd 0.3 mg/ℓ, Cr 1.5mg/ℓ, Cu 3.0mg/ℓ, Hg 0.005mg/ℓ 및 Pb 3.0mg/L로 규정되어 있다¹⁰⁾. 폐굴껍질과 페타이어에 비하여 슬래그에서 비교적 높은 중금속 용출특성을 나타내었으며 특히 중금속중 Cd의 경우에 슬래그에 있어서 0.534mg/ℓ로 높은 특성을 나타내었다.

Table 3. Compositions of waste tire rubber.

Compounds	Contents (%)
Elastomer (SBR, PBR, EPDM, XBR, etc)	61.0
Carbon black	31.0
Oil (Aromatic, Naphtic, Paraffin)	3.0
ZnO	1.8
Stearic acid	0.5
Antioxidant (R-Phenylenediamine)	0.5
Wax	0.5
Sulfur	1.2
Accelerator (Sulfonamide)	0.5

또한, Zn의 경우에 용출기준에 규정되어 있지 않지만 폐굴껍질과 슬래그의 경우에는 불검출이었

Table 4. Extracting characteristics of heavy metals for waste adsorbents.

Items Adsorbents	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Zn
Oyster shell	0.008	ND	ND	ND	0.006	ND
Slag	0.534	0.488	0.072	ND	0.108	ND
Tire rubber	0.01	0.01	-	-	0.03	2.01
Extraction standard	0.3	1.5	3.0	0.005	3.0	-

Notes) Unit : mg/L. ND : under 0.001mg/ℓ

으나 페타이어의 경우에는 2.01mg/ℓ의 용출특성을 나타내었다. 이 결과는 Table 3에서 알 수 있듯이 고무의 가황 활성화제로 사용된 ZnO가 산성용액에서 용출된 것으로 여겨진다. 그러나, 폐굴껍질, 슬래그 및 페타이어내 함유되어 있는 대부분의 중금속은 용출기준 이하로서 이러한 결과를 비추어볼 때 본 연구에서 사용된 폐굴껍질, 슬래그 및 페타이어는 폐기물의 재활용 측면에서 2차적인 환경문제는 그다지 야기되지 않는 것으로 평가되었다.

3. 폐기물의 중화능

초기 pH가 2.1로 강산성인 실험실폐수 250ml에 폐기물별로 5g을 첨가한 후에 반응시간의 경과에 따른 중화특성을 Fig. 1에 평가하였다.

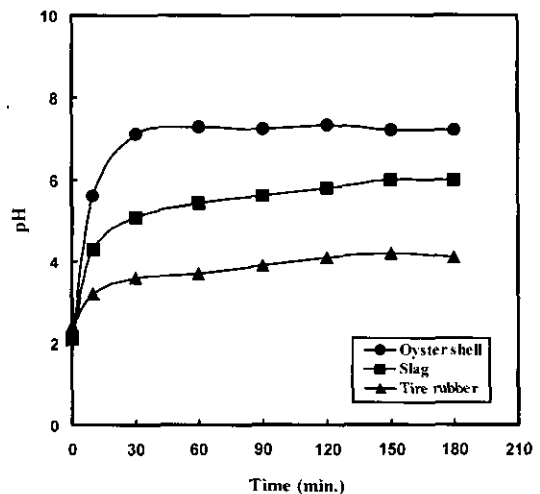


Fig. 1. Neutralizations of waste adsorbents with reaction time.

반응시간에 따른 pH 변화를 보면 폐굴껍질 5.6~7.3, 슬래그 4.3~6 및 페타이어 3.2~4.2로서 Table 3에서 알 수 있듯이 알칼리성 물질을 다량을 많이 함유하고 있는 폐굴껍질과 슬래그는 비교적 pH 중화능이 우수하였으나 페타이어의 경우에는 그다지 중화능을 나타내지 않았다. 김⁸⁾과 성¹¹⁾에 의하면 폐굴껍질과 슬래그는 중화능이 탁월하다고 보고한 반면에 Rowley 등은 pH 중화능이 거의 없는 반면에 낮은 pH에서는 납이나 크롬의 흡착효율을 좋았다고 보고하였다.

폐굴껍질과 슬래그는 자체내에 pH 상승효과를 유발할 수 있는 Ca 등의 알칼리성 성분을 다량으로 함유하고 있으며 양이온 교환체로서 폐수 중의 중금속 뿐만 아니라 H⁺ 이온도 동시에 교환흡착시키기 때문으로 양호한 흡착제로 평가되었으며 페타이어의 경우에는 그다지 pH 상승효과는 없으나 카본블랙이나 가황 활성제로 가해진 아연화(ZnO)는 실험실폐수내 함유되어 있는 Fe를 비롯한 각종 중금속의 흡착에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있어 폐기물의 재활용 측면에서 충분한 가능성이 있을 것으로 여겨진다.

4. 반응시간의 영향

흡착제의 흡착능의 변화는 흡착제와 흡착물질사이의 반응시간에 크게 의존한다¹²⁾.

Fig. 2는 실험실폐수 250ml에 폐기물 각각 5g을 첨가한 후에 10분, 30분, 60분, 90분, 120분, 150분 및 180분 간격으로 교반하여 Fe 제거특성을 보여 주고 있다.

반응시간에 따른 Fe 제거효율을 보면 10분까지 급격하게 증가하였으며 이때 Fe 제거효율을 보면 폐굴껍질 65%, 슬래그 57% 및 페타이어 51%로서 폐굴껍질에서 높은 효율을 나타내었으며 그 이후에 실험종료까지 거의 평형상태를 유지하고 있다.

평형상태에 도달한 30분부터 실험종료까지 각 폐기물별 Fe 제거효율을 보면 폐굴껍질 78~81%, 슬래그 72~77% 및 페타이어 64~71%를 나타내었으며 시간이 길어질수록 제거효율은 약간 증가하였으나 큰 폭의 증가는 없었으며 반응 30분까지 상당히 양호한 중금속 제거효율을 나타낸 것을 알 수 있다.

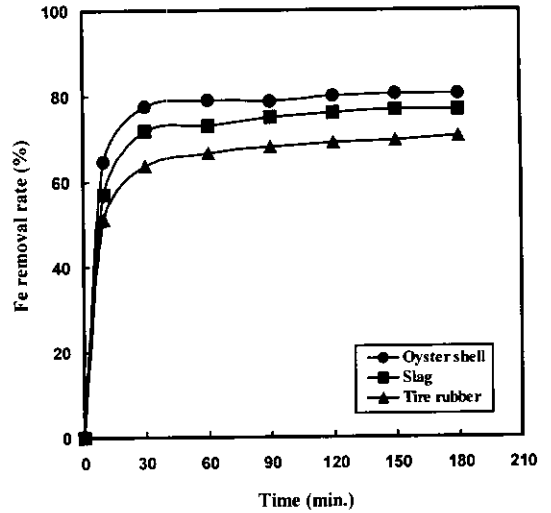


Fig. 2. Fe removal rates with reaction time by waste adsorptions.

5. 주입량의 영향

Fig. 3은 실험실폐수 250ml에 폐기물 각각 1g, 5g, 10g 및 15g을 첨가한 후에 30분 동안 교반하여 Fe 제거특성을 보여주고 있다. 주입량이 1g에서 5g까지 증가할수록 Fe 제거효율은 증가하여 5g 일 때 폐굴껍질 78%, 슬래그 72% 및 페타이어 64%를 나타내었으나 그 이후에는 주입량의 증가

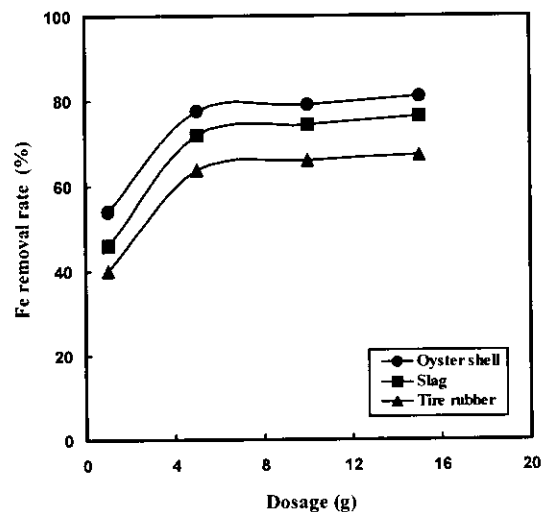


Fig. 3. Fe removal rates with dosage by waste adsorptions.

에도 불구하고 제거효율에는 거의 변화가 없었으며 10g과 15g의 경우에 Fe 제거효율을 보면 폐굴껍질 80%, 슬래그 75% 및 페타이어 66% 전·후를 보여주고 있다. 대체적으로 주입량이 증가할수록 충분한 흡착과 이온교환으로 인하여 제거효율 또한 증가하는 경향을 나타내었으나 주입량을 증가시켜도 제거효율이 직선적으로 증가하지는 않음을 알 수 있다. 즉, 폐기물 주입량의 증가에 따라 제거효율이 비례적이지는 않았지만 일정한 농도의 용액에 적절한 주입량의 사용이 효과적임을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 폐기물의 주입량이 5g일 경우에 가장 효율적인 것으로 평가되었다.

6. 교반속도의 영향

Fig. 4는 실험실폐수 250mg/l에 폐기물 각각 5g을 첨가한 후에 교반속도 50rpm, 100rpm, 150rpm, 200rpm 및 300rpm으로 변화시키면서 교반속도에 따른 Fe 제거특성을 보여주고 있다. 폐기물별 Fe 제거효율에는 다소 상이한 차이를 보이고 있을지라도 50rpm에서 100rpm까지는 교반속도가 증가할수록 Fe 제거효율 또한 급격하게 증가하여 폐굴껍질 72%, 슬래그 65% 및 페타이어 62%를 나타내고 있으나 그 이후에는 교반속도가 증가함에도 불구하고 거의 완만한 특성을 나타내고 있으며 300

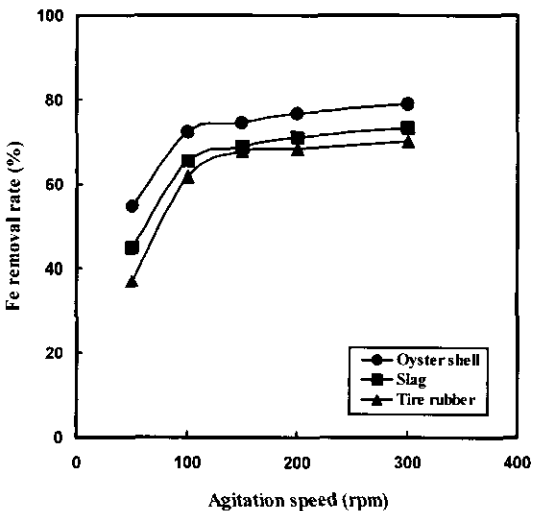


Fig. 4. Fe removal rates with agitation speed by waste adsorptions.

rpm일 때 폐굴껍질 79%, 슬래그 73% 및 페타이어 70%를 보여주고 있다. 이러한 결과는 교반속도 100rpm 이상이 되면 입자의부표면의 물질이동저항을 무시할 수 있음을 나타내는 것으로 평가되었다.

7. 흡착등온식

실험실폐수에 대해 폐기물의 흡착능을 평가하기 위하여 실험실폐수 250ml에 폐기물 1g, 5g, 10g 및 15g으로 변화시켜 30분 동안에 교반시킨 다음에 잔류 Fe 농도를 측정된 후에 Fig. 5~Fig. 7에 나타난 바와 같이 Freundlich 흡착등온식으로 해석하여 그 결과를 Table 5에 요약하였다. 폐굴껍질, 슬래그 및 페타이어 단위 g당 Fe 흡착량은 각각 1.4mg, 1.02mg 및 0.98mg으로 나타났다. 일반적으로 상관계수(R)는 $-1.0 \leq R \leq 1.0$ 사이에서 변화되며 $R=-1.0$ 또는 1.0 인 경우에 완전한 상관인 반면에 $R=0$ 인 경우에는 Y와 X는 서로 상관이 없다고 보고되어 있다¹³⁾. Table 5에서 상관계수를 보면 0.918~0.925의 범위로서 폐기물 모두 Fe 제거에 적합한 것으로 평가되었다. 흡착평형은 Freundlich 흡착등온식으로 해석할 경우에 흡착강도 $1/n$ 이 0.1~0.5일 때 아주 양호한 흡착제로 평가되며 흡착용량 k가 클수록 흡착효율이 양호한 것으로 알려져 있다¹⁴⁾. $1/n$ 은 0.32~0.46의 범위이며 k는 4.3~4.6의 범위로서 폐기물 모두 실험실폐수내 함유되어 있는 Fe의 제거에 적합한 것으로 평가되었으며 폐기물의 $1/n$ 과 k는 모두 폐굴껍질>슬래그>페타이어의 순으로 나타났다.

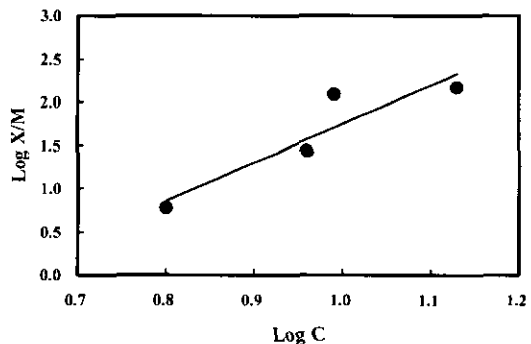


Fig. 5. Freundlich isotherm for Fe removal utilizing oyster shell.

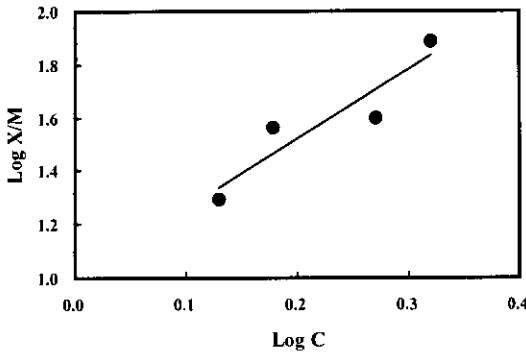


Fig. 6. Freundlich isotherm for Fe removal utilizing slag.

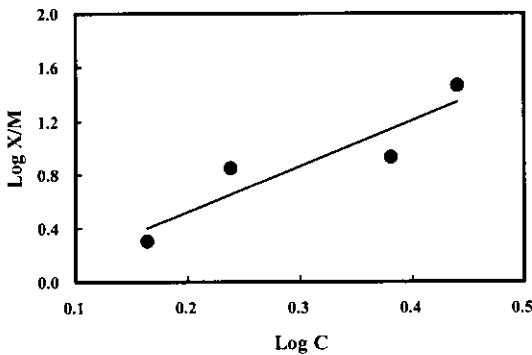


Fig. 7. Freundlich isotherm for Fe removal utilizing tire rubber.

Table 5. Results of Freundlich isotherm.

Adsorbents	1/n	k	R
Oyster shell	0.46	6.9	0.921
Slag	0.37	4.8	0.925
Tire rubber	0.32	4.3	0.918

IV. 결 론

폐기물의 재활용 측면에서 폐굴껍질, 슬래그 및 페타이어를 강산성의 실험실폐수의 중화능을 검토하고 실험실폐수내에 비교적 고농도로 존재하는 철의 제거 가능성을 검토해본 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 반응시간에 따른 pH 변화를 보면 폐굴껍질 5.

6~7.3, 슬래그 4.3~6 및 페타이어 3.2~4.2로서 폐굴껍질과 슬래그는 비교적 pH 중화능이 우수하였으나 페타이어의 경우에는 그다지 중화능을 나타내지 않았다.

2. 반응시간 30분부터 실험종료까지 거의 평형상태를 유지하였으며 각 폐기물별 Fe 제거효율을 보면 폐굴껍질 78~81%, 슬래그 72~77% 및 페타이어 64~71%를 나타내었다.
3. 주입량이 5g까지 증가할수록 Fe 제거효율은 급격하게 증가하였으나 그 이후에는 15g까지는 주입량에 관계없이 Fe 제거효율은 폐굴껍질 80%, 슬래그 75% 및 페타이어 66%를 나타내었다.
4. 교반속도 50rpm에서 100rpm까지는 증가할수록 Fe 제거효율 또한 급격하게 증가하였으나 그 이후에는 교반속도가 증가함에도 불구하고 거의 완만한 특성을 나타내고 있으며 300rpm일 때 폐굴껍질 79%, 슬래그 73% 및 페타이어 70%를 보여주고 있다.
5. Freundlich 흡착등온식으로 해석해본 결과, 1/n 은 0.32~0.46의 범위이며 k는 4.3~4.6의 범위로서 폐기물 모두 실험실폐수내 Fe 제거에 적합한 것으로 평가되었다.

참 고 문 헌

1. 김대오 : 부산매일, 1995.
2. 김형석의 3인 : 굴껍질을 이용한 도금폐수의 중화 및 중금속이온 제거, 한국환경위생학회, 22(3), 1996.
3. 김용무의 1인 : 석탄흡착제의 제조와 중금속이온의 흡착특성, 삼척산업대학교 환경논문집 1996.
4. 고덕주 : 형광 X선 분석, 1987.
5. 환경처 : 환경오염공정시험법, 1991.
6. WPCF : Standard method for examination of water and wastewater, 18th edition, USA, Public health association, Washington, D. C., 1992.
7. 대한광업진흥공사 : 석회석매장현황, 1996.
8. 김동민의 2인 : 슬래그여체에 의한 Cr⁺³ 이온의 제거효율, 흡착량 및 pH 상승효과에 관한 실험적 연구, 대한환경공학회, 3(1), 1981.

9. 전병렬: 분쇄 페타이어를 이용한 크롬의 흡착에 관한 연구, 경성대학교 환경연보, 1996..
10. 환경처: 환경관계법규, 1993.
11. 성낙창: 굴겉질에 의한 산성폐수의 중화능에 관한 연구, 동아대학교 환경문제연구소보, 18(2), 1995.
12. 김은호외 2인: 폐콘크리트의 중화 및 중금속 제거를 위한 재활용에 관한 연구(I), 한국환경과학회, 6(5), 1997.
13. 선우중호: 수문학, 동명사, 1991.
14. 김용권: 활성탄 수처리기술과 관리, 신광문화사, 1995.