

중금속 함유 실험실 폐수처리를 위한 폐달걀껍질의 재활용

김은호, 김형석, 성낙창

동아대학교 환경공학과, 신라대학교 환경학과*

Recycling of Waste Egg Shells for Treatment of Laboratory Wastewater containing Heavy Metals

Eun-Ho, Kim, Hyeong-Seok Kim, Nak-Chang Seong

Department of Environmental Engineering, Dong-A University

* Department of Environmental Science, Silla University

ABSTRACT

The purposes of this research were to evaluate the character of laboratory wastewater, and to examine the utilization of waste egg shells for neutralization and removal of heavy metals. Waste egg shells are excellent at neutralizing acidic wastewater, because they have alkaline minerals such as calcium. It must be seemed that removal rate of heavy metals were very influenced by adsorbent dosage and adsorbate concentrations, because waste egg shells acted as precipitation and adsorption.

If we reflected the adsorption capacity(k) and adsorption($1/n$) of Freundlich isotherm, we couldn't consider waste egg shells as a good adsorbent. In view of these results, it showed that wastes containing the similar compositions as waste egg shells could utilize the neutralization, precipitation and adsorption of heavy metals in laboratory wastewater.

Key Words : Laboratory wastewater, Waste egg shells, Precipitation, Adsorption, Recycling.

초 록

본 연구에서는 폐기물의 재활용 측면에서 폐달걀껍질에 의한 중화능을 파악하는 동시에 중금속 제거 가능성을 고찰하였다. 폐달걀껍질 자체내에 Ca와 같은 알칼리성 성분으로 인하여 pH 상승효과가 탁월하며, 또한 폐수중의 중금속은 pH 상승으로 인하여 수산화물로 침전·제거되는 것으로 여겨진다. 폐달걀껍질은 응집·침전 및 흡착제로써 역할을 하기 때문에 주입량과 흡착질 농도에 영향을 받는 것으로 여겨진다. 흡착강도 $1/n$ 값은

0.35~0.44의 범위이며 Cu>Pb>Cr의 순으로 높게 나타났으나 흡착용량 k 값은 2.61~3.26의 범위이며 Pb>Cr>Cu의 순으로 높게 나타내었다.

주제어 : 실험실폐수, 폐달걀껍질, 중화, 응집·침전, 흡착, 재활용

1. 서 론

인구의 증가와 도시의 집중화 현상, 그리고 과학 기술의 진보에 따른 산업활동의 확대에 인하여 환경오염에 대한 관심과 우려 및 환경보전의 사회적 요청이 날로 높아져 가고 있으며 그 오염방지대책이 절실하게 요망되고 있는 실정이다.

이러한 시점에서 초·중·고등학교는 연구 및 교육의 일환으로써 각종 이화학 실험실을 운영하면서 유독약품 등이 함유되어 있는 폐수를 별도수거 또는 정화시설 없이 거의 대부분이 미처리 상태로 방류하고 있어 실험실 발생폐수가 환경오염 악화의 또 다른 주범일 뿐만 아니라 주변지역 주민에게 건강상의 문제를 야기할 수도 있어 무엇보다도 이들 학교에서 환경에 대한 올바른 인식이 절실히 요청되고 있다(김대오, 1995). 일부에서는 실험실폐수를 위탁수거·처리하거나 자체 처리시설 등으로 적법처리하고 있지만 거의 대부분이 미처리 상태로 하수구에 회석방류되거나 건조 및 소각 등의 형식적인 방법으로 처리하고 있어 미량일지라도 중금속 등을 함유하고 있어 잔류성이나 독성에 의한 오염이 크게 대두되고 있다(김대오, 1995).

실험실폐수는 그 발생량이 적을지라도 지속적으로 발생하기 때문에 미처리 상태로 무단방류될 경우에 그들의 잔류성이나 독성으로 인하여 인근지역 주민의 보건위생상 위해하거나 인근 하수처리장에 악영향을 미치게 된다고 하였다(Takatsuki, H, 1990).

일반적인 중금속 처리방법으로써는 화학적 응집 침전(Precipitation), 흡착(Adsorption), 이온교

환(Ion Exchange), 역삼투(Reverse Osmosis) 등이 널리 이용되고 있지만, 이들은 처리비용이 과다하게 소요되는 단점이 있으며 특히 응집·침전의 경우에는 슬러지 발생량이 많아 심각한 2차 환경오염을 유발할 수도 있어 새로운 방법의 모색이 절실하게 대두되고 있다(이홍근, 1995).

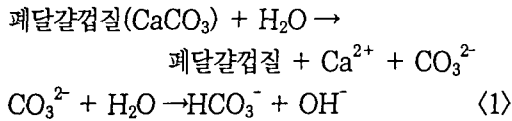
최근에 폐기물의 재활용 측면에서 폐달걀껍질, 계껍질, 폐콘크리트 등을 이용하여 산성이면서 고농도 중금속을 함유하고 있는 폐수를 처리하려는 시도가 다양하게 진행되고 있지만, 이들과 유사한 특성을 지니고 있는 폐달걀껍질의 처리방안과 자원으로의 재활용에 대한 연구가 거의 전무한 실정으로 보다 적극적인 연구가 이루어져야 할 것으로 여겨진다(성낙창, 1996; 이무열, 1995; 성낙창, 1997).

'96년 현재 달걀 생산량은 총 469,873ton/year 정도으로써 달걀껍질 발생량은 약 52,626ton/year으로 산출된다(축협중앙회, 1997). 폐달걀껍질은 다량의 칼슘성분 등으로 구성되어 있어 폐수처리에 응용할 경우 CaCO_3 의 용해에 의하여 CO_3^{2-} 이온 농도의 증가로 인한 pH의 상승으로 중금속을 수산화물 및 산화물로 침전시키므로 처리효율의 최적화를 위한 pH 조절이 특별히 필요하지 않아 폐수처리 비용절감효과 뿐만 아니라 처리에 곤란을 겪고 있는 폐기물의 재활용이라는 측면에서 매우 바람직하다고 여겨진다. 본 연구에서는 실험실에서 발생하는 산성의 중금속 성분을 많이 함유하고 있는 폐수의 특성을 파악하고 폐기물 재활용측면에서 폐달걀껍질에 의한 중화능과 중금속 제거 가능성을 고찰해보고자 한다.

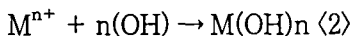
2. 이론적 배경

2.1 폐달걀껍질에 의한 중화 및 중금속 제거 메커니즘

산성폐수에 중금속이 함유되어 있을 경우에 폐달걀껍질을 첨가하면 식 (1)과 같이 CaCO₃의 용해에 인하여 CO₃²⁻ 이온농도의 증가와 더불어 pH가 상승하게 된다(이무열, 1995).



폐달걀껍질은 Ca, Mg, Mn 등의 총알칼리도를 지니고 있으며 중금속 이온 흡착제로 사용할 경우에 초기에는 CaCO₃에 의한 pH 상승작용으로 인하여 식 (2)의 형태로 침전을 생성하게 되고 후기에는 폐달걀껍질의 표면화학적 작용에 의한 흡착현상이 일어나게 될 것이므로 보다 우수한 중금속 제거제로 가능성이 있을 것으로 여겨진다(이무열, 1995).



대상 중금속의 침전형태를 보면 Cr(OH)₃, Cu(OH)₂, Pb(OH)₂이다(송충열, 1981). 일반적으로 중금속의 침전은 중성범위에서 일어나는 것이 아니라 중금속 특유의 고유 pH 영역을 지니고 있다. 특히, Cr⁶⁺는 pH 2~3에서 Cr³⁺로 환원되며 pH 7.5~9.5에서 Cr(OH)₃로 침전하게 된다. Cr, Cu와 Pb의 침전에 미치는 최적 pH를 보면 각각 4.5~8.5, 5.5~8.5와 5.0~8.0에서 효율적이라고 한다(이규성, 1990).

2.2 흡착등온식

일반적으로 수중에서의 성분이 흡착체에 흡착하여 생기는 흡착층은 단분자층이며 Freundlich는

흡착되는 용질의 양과 용액의 농도사이의 관계를 정량적으로 나타낼 수 있는 실험식을 제시하였다. Freundlich 흡착등온식은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다(김용권, 1995).

$$\text{Freundlich isotherm} : \frac{X}{M} = kC^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

X/M : 피흡착제/흡착제(g/g)

C : 용액내의 용질의 질량(mg/L)

k, n : 경험적 상수

식 (3)에 대수를 취하면

$$\text{Log } X/M = \text{Log } k + 1/n \text{ Log } C \quad (4)$$

식 (4)에 의하여 Log C와 Log X/M의 관계를 직선적으로 표현할 수 있다. 직선으로 부터 기울기와 절편을 구하여 흡착강도(1/n)과 흡착용량(k)를 결정할 수 있으며, 직선의 기울기가 작을 경우 저농도에서부터 고농도에 걸쳐 흡착이 잘되며 기울기가 크면 고농도에서의 흡착량이 큰 반면에 저농도에서는 흡착량이 작아진다(김용권, 1995).

3. 실험

3.1 재료

일반폐기물로서 폐기처분되고 있는 달걀껍질을 수집하여 불순물을 제거하기 위하여 증류수로 깨끗하게 세척한 후에 상온에서 48시간 정도 건조시킨 다음에 충분히 자연건조된 폐달걀껍질을 Ball mill에 넣어 분쇄하여 분말로 조제하였다. 조제된 폐달걀껍질은 Drying Oven에서 약 105℃를 유지하면서 약 24시간 건조시켜 흡습하지 않도록 데시케이터속에서 냉각보관한 것을 표준시료로 사용하였다.

본 실험에 사용된 Cr, Cu 및 Pb 이온의 합성시

료는 Junsei Chemical Co. Ltd.의 1,000mg/L 표준용액을 사용하여 각 이온의 농도에 따라 10mg/L, 25mg/L 및 50mg/L로 조제하여 사용하였다. 그리고, pH 완충용액은 일본의 순정화학회사제품인 NaOH(95%)와 HCl(35%)를 사용하여 0.1N-NaOH과 0.1N-HCl를 조제하여 사용하였다.

3. 2 방법

3. 2. 1 페달갈껍질의 화학적 성상분석

페달갈껍질의 화학적 성상은 표준시료를 약 3~5분 동안에 200mesh 미만으로 분쇄한 후에 약 10초 동안에 20~30ton의 무게로 가압성형하여 형광 X선 분석을 행하였다(이형순, 1993).

3. 2. 2 페달갈껍질에 의한 중화능

페달갈껍질에 의한 산성폐수의 중화능을 파악하기 위하여 500mL 비이커 3개에 증류수 250mL과 페달갈껍질 3g, 5g 및 7g을 각각 첨가하고 Jar Tester를 이용하여 약 130rpm으로 교반시키면서 반응시간 10분, 30분, 60분, 90분, 120분, 150분 및 180분 경과후 pH Meter(ORION MODEL 520A)를 이용하여 측정하였다.

3. 2. 3 페달갈껍질 주입량의 영향

페달갈껍질 주입량이 중금속 제거에 미치는 영향을 조사하기 위하여 미리 조제한 합성시료 각 중금속별 농도 25mg/L를 500mL 비이커에 250mL 넣고, 여기에 페달갈껍질 분말 3g, 5g 및 7g을 첨가한 후에 반응시간을 10분, 30분, 60분, 90분, 120분, 150분 및 180분 경과후 원심분리하여 상등액을 검액시료로 이용하였다.

3. 2. 4 흡착질 농도가 미치는 영향

중금속의 농도변화에 따른 중금속의 제거 가능성을 알아보기 위하여 미리 조제한 합성시료 5mg/L, 25mg/L 및 50mg/L를 각 중금속별로 500mL 비이

커에 250mL 넣고, 여기에 각각의 비이커에 페달갈껍질 5g을 가하여 Jar Tester를 이용하여 약 130rpm으로 반응시간 180분으로 교반한 후에 채취하여 원심분리시켜 상등액을 검액시료로 이용하였다.

3. 3 분석

중금속 분석을 위한 전처리로서 검액시료 50mL에 HCl 2mL을 넣고 혼합하여 완전하게 용해시킨 후에 시료 50mL을 피펫으로 100mL 비이커에 넣고 왕수(HNO₃ : HCl = 1 : 3) 10mL를 첨가한 후 가열하여 약 30mL가 될때까지 농축한 후에 방냉을 하였다. 그 다음에 No. 5 여과지를 이용하여 100mL 메스플라스크에 여과하고 100mL 증류수로 비이커 및 깔때기를 2~3회 세척하고 100mL가 되도록 맞추었다(환경처, 1991).

이상의 방법으로 전처리를 한 후에 환경오염공정시험법에 준하여 중금속 잔류농도를 유도결합플라즈마발광광도기(Inductively Coupled Plasma ICP) : JOBINYVON, SY 500P)를 이용하여 분석하였다(환경처, 1991).

4. 결과 및 고찰

4. 1 실험실폐수의 특성

Table 1은 P 시에 위치해 있는 중학교에서 배출되고 있는 실험실폐수의 분석결과를 나타내고 있다. 실험실폐수는 1차 분석결과를 제외하고는 중금속 농도는 거의 일정하면서 높은 것을 알 수 있다. pH의 경우에는 평균 2.1로써 강산성을 띄고 있으며, 다른 중금속에 비하여 Fe 농도가 평균 41.1mg/L로 가장 높았으며 그 다음으로 Zn이 28mg/L로 높았다. Cu, Pb 및 Cr은 모두 약 15mg/L 정도를 나타내었으며 Cd는 0.07mg/L로 낮게 나타났다.

Table 1. Results of the Laboratory Wastewater Analyses

Items \ Samplings	1st	2nd	3rd	Avg.
pH(-)	2.5	1.9	2.0	2.1
Cd(mg/L)	0.13	ND	0.08	0.07
Cu(mg/L)	9.40	19.2	16.5	15.0
Zn(mg/L)	22.2	36.1	25.6	28.0
Pb(mg/L)	15.8	17.3	13.7	15.6
Cr(mg/L)	14.5	15.8	19.6	16.6
Fe(mg/L)	24.5	57.3	41.6	41.1
Mn(mg/L)	4.60	4.15	6.30	5.02

ND : Not detectable

Table 2. Chemical Properties of Waste Egg Shells

Items \ Adsorbents	Egg shells	Oyster shells
CaO(%)	63.2	74.49
SiO ₂ (%)	10.2	12.02
Al ₂ O ₃ (%)	0.92	1.08
Fe ₂ O ₃ (%)	0.12	0.14
MgO(%)	0.053	0.062
MnO(%)	0.017	0.02
Na ₂ O(%)	1.36	1.6
K ₂ O(%)	0.42	0.5
TiO ₂ (%)	-	ND
P ₂ O ₅ (%)	0.24	0.28

4.2 폐달걀껍질의 화학적 성상분석

본 연구에서는 폐달걀껍질의 재활용 가능성을 파악하기 위하여 최근에 폐기물의 재활용 측면에서 이용되고 있는 폐굴껍질(성낙창, 1996, 1997)과 화학적 성상을 비교하여 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 알 수 있듯이, 폐굴껍질은 비교적 높은 CaO 성분을 함유하고 있어 중화 및 중금속 제거를 위한 흡착제로 이용하여 높은 효율을 얻은 바 있는데, Cr과 Cu의 경우에 폐굴껍질을 약 9g 정도 주입하여 약 90분 정도 교반후에 Cr과 Cu 모두 약 95% 이상의 높은 제거효율을 나타내었다고 하였다(성낙창, 1996, 1997). 이는 초기에 폐굴껍질 자체

탄산칼슘이 용해되면서 pH를 상승시켜 중금속이 수산화물로 침전되었으며 그 이후에는 폐굴껍질 입경내에 중금속이 흡착되었다고 하였다(성낙창, 1996, 1997).

이와 마찬가지로 폐달걀껍질 또한 CaO 성분을 약 63.2% 정도로 비교적 높아 폐굴껍질과 유사한 성분을 함유하고 있기 때문에 중화 및 중금속제거를 위하여 재활용 가능성이 충분할 것으로 여겨진다.

4.3 폐달걀껍질에 의한 중화능

폐달걀껍질 주입량을 각각 3g, 5g 및 7g으로 구분하여 시간경과에 따른 중화능을 파악하기 위하여

중류수의 pH를 2로 조절하여 실험을 행하여 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다

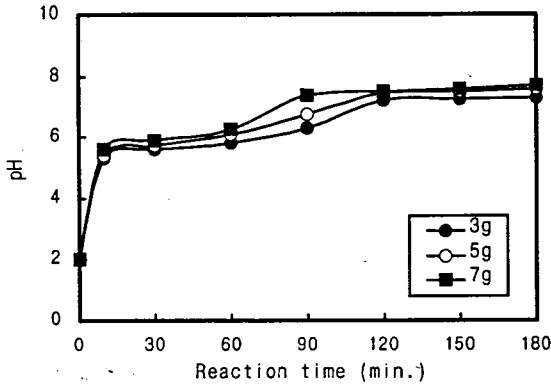


Fig. 1. Neutralization of acidified distilled water with reaction times and dosages.

Fig. 1에서 알 수 있듯이, 주입량에 거의 관계없이 pH는 반응초기 약 10분 경에 아주 급격하게 증가하여 pH 5.3~5.6을 나타내다가 주입량 3g과 5g의 경우 반응시간 120분 경에 각각 pH 7.2와 7.4 정도를 나타내다가 그 이후에 약간 증가하여 반응 종료 180분까지 거의 pH 변화를 나타내지 않고 최종 pH 7.3과 7.55 정도를 나타내었다. 또한, 주입량 7g의 경우에는 주입량 3g 및 5g 보다 반응시간이 약 30분 정도 빠른 90분 경에 약알칼성인 pH 7.4 정도를 나타낸 후에 지속적인 증가현상을 보여 반응종료 180분경에는 pH 7.7 정도로 다소 높은 것을 알 수 있다. Fig. 1에서 알 수 있듯이, 전반적으로 pH는 폐달갈껍질의 주입량이 증가할수록 반응시간이 경과함에 따라 산성액의 중화효과가 어느 정도 나타났다. 이러한 현상은 폐달갈껍질 자체내에 중화효과를 유발할 수 있는 Ca 성분을 다량으로 함유하고 있기 때문이라고 하였다(송동근, 1997). 이상의 결과로 비추어 볼때, 폐달갈껍질은 칼슘성분을 약 98.2% 정도 함유하고 있다는 점을 감안하면 산성폐수의 중화능을 지니고 있는 것을 알 수 있을 것으로 여겨진다.

4.4 흡착제 주입량의 영향

폐달갈껍질 주입량이 중금속 제거에 미치는 영향을 조사하기 위하여 미리 조제한 합성시료 각 중금속별 농도 25mg/L를 500mL 비이커에 250mL 넣고, 여기에 폐달갈껍질 분말 3g, 5g 및 7g을 첨가한 후에 반응시간을 10분, 30분, 60분, 90분, 120분, 150분 및 180분 경과후 원심분리하여 상등액의 중금속 잔류농도를 측정하는 방식으로 중금속 Cr, Cu 및 Pb를 대상으로 실험을 행하여 그결과를 Fig. 2~Fig. 4에 나타내었다. Fig. 2에 의하면, Cr의 경우에 전반적으로 주입량에 관계없이 반응시간이 경과할수록 거의 비슷한 양상으로 제거효율이 증가하는 것을 알 수 있으며, 주입량 3g의 경우에는 반응시간 90분경에 약 85% 이상의 높은 제거효율을 나타내며 거의 완만한 증가현상을 보이거나 평형상태를 유지하지만 주입량 5g과 7g의 경우 반응시간 60분경에 각각 83%와 82% 정도의 높은 제거효율을 나타내며 주입량 3g과는 달리 계속적으로 증가하는 경향을 보이고 있다.

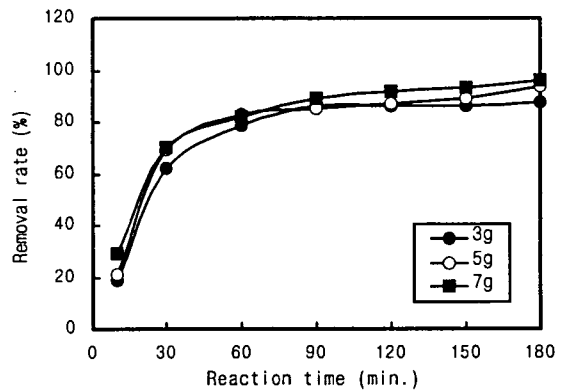


Fig. 2. Removal rate of Cr at different adsorbent dosages.

Fig. 3을 보면 Cu의 경우 Cr과 유사한 현상을 보이고 있으며 반응초기에 급격하게 증가하여 반응시간 90분경에 거의 평형상태를 유지하고 있는 것을 알 수 있다.

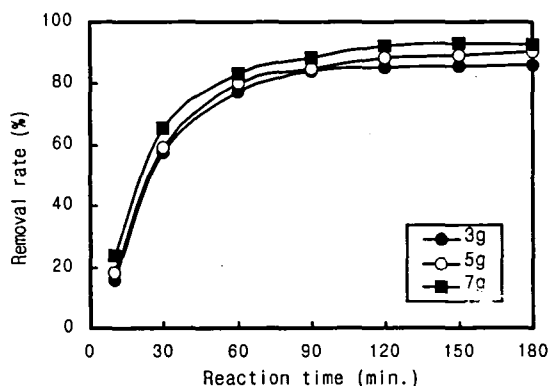


Fig. 3. Removal rate of Cu at different adsorbent dosages.

Fig. 4를 보면 Pb의 경우 주입량 3g일때 반응시간 150분경에 약 82% 정도의 제거효율을 나타내며 평형을 유지하고 있으며 주입량 5g과 7g일때에는 반응시간 각각 120분과 90분경에 약 82%와 86% 정도의 높은 제거효율을 보이며 거의 평형상태를 나타내고 있다.

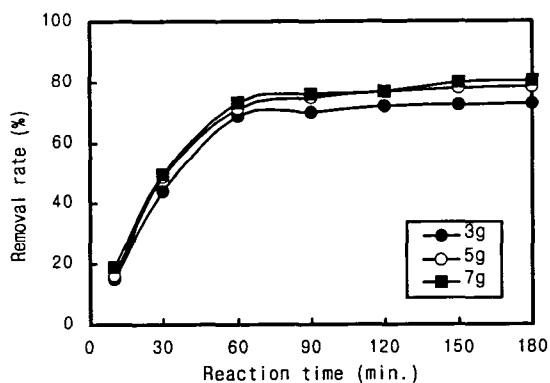


Fig. 4. Removal rate of Pb at different adsorbent dosages.

이상의 결과로 볼때, 전반적으로 주입량이 증가할수록 반응시간이 경과함에 따라 중금속 제거효율이 증가하는 것을 알 수 있는데, 이는 주입량이 많

아짐에 따라 충분한 응집·침전 및 흡착이 이루어지고 있는 것으로 추정된다.

4.5 피흡착물 농도변화가 미치는 영향

폐수농도의 변화에 따른 폐달걀껍질의 중금속 제거량을 알아보기 위하여 폐달걀껍질 5g과 단일시료의 농도 5mg/L, 25mg/L 및 50mg/L를 정확하게 각각 250mL 취하여 500mL의 비커 3개에 첨가하여 약 130rpm으로 반응시간 180분 동안에 교반한 후에 원심분리하여 상등액의 중금속 잔류농도를 측정하는 방식으로 중금속 Cr, Cu 및 Pb를 대상으로 순차적으로 실험을 행하여 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

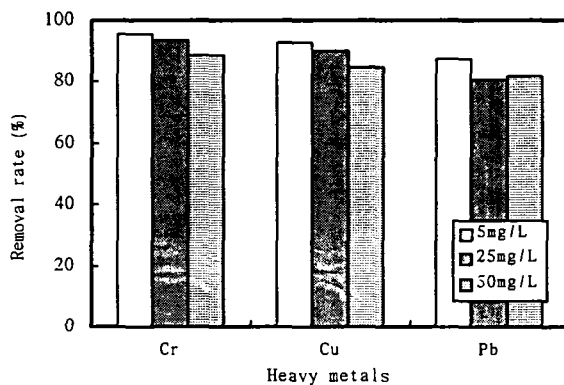


Fig. 5. Removal rate of heavy metals with adsorbate concentrations.

Fig. 5에서 알 수 있듯이, 대상중금속 Cr, Cu 및 Pb는 저농도에서 고농도에 이르기까지 주입농도가 증가할수록 제거효율이 다소 낮은 양상을 나타내지만 거의 80% 이상의 아주 높은 제거효율을 나타내고 있다.

이상의 결과 부터 종합해 보면 중금속의 주입농도가 낮을수록 충분한 응집·침전 및 흡착이 이루어지는데 그 원인이 있는 것으로 추측된다.

4.6 흡착등온식

페달갈껍질 주입량의 영향에서 180분을 기준으로 Freundlich 흡착등온식을 적용해본 결과, Table 3에 요약하였다.

Cr, Cu 및 Pb의 상관계수(R)의 범위는 0.94~0.98인데, 상관계수는 일반적으로 $-1.0 \leq R \leq 1.0$ 사이에서 변하게 되며 $R = -1.0$ 또는 1.0 인 경우 완전한 상관, $R = 0$ 인 경우 Y와 X는 서로 상관이 없다고 알려져 있다(선우중호, 1991). 또한, 흡착강도 $1/n$ 값은 0.35~0.44의 범위이며 Cu>Pb>Cr의 순으로 높게 나타났다.

반면에 흡착용량 k 값은 2.61~3.26의 범위이며 Pb>Cr>Cu의 순으로 높게 나타내었다. Freundlich 흡착등온식에 의하면 $1/n$ 이 0.1~0.5일 때 아주 양호한 흡착제로 평가하고 있다(김용권, 1995). 이상의 결과로 볼때, 페달갈껍질은 실험실에서 발생폐수의 중화와 더불어 비교적 양호한 중금속 제거제로써 향후 페달갈껍질을 비롯한 유사한 성분을 함유하고 있는 폐기물의 재활용 가능성이 있을 것으로 여겨진다.

Table 3. Results of Freundlich Isotherm

Heavy metals	1/n	k	R
Cr	0.35	3.11	0.98
Cu	0.44	2.61	0.94
Pb	0.41	3.26	0.95

5. 결 론

본 연구에서는 폐기물의 재활용 측면에서 페달갈껍질에 의한 중화능을 파악하는 동시에 중금속 제거 가능성을 고찰해본 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 페달갈껍질은 Ca와 같은 알칼리성 성분으로 인하여 pH는 주입량이 증가할수록 반응시간이 경과함에 따라 산성액의 중화효과가 어느정도 나타

났다.

2. 페달갈껍질의 주입량이 증가하고 중금속 주입농도가 낮을수록 반응시간이 경과함에 따라 충분한 응집·침전 및 흡착이 이루어지고 있어 중금속 제거효율이 증가하였다.
3. 흡착강도 $1/n$ 값은 0.35~0.44의 범위이며 Cu>Pb>Cr의 순으로 높게 나타났으나 흡착용량 k 값은 2.61~3.26의 범위이며 Pb>Cr>Cu의 순으로 높게 나타내었다.

참 고 문 헌

김대오, 1995, "부산매일".
 김용권, 1995, "활성탄 수처리기술과 관리", 신광문화사, pp.79~85.
 선우중호, 1991, "수문학", 동명사, pp.266~267.
 성낙창, 김은호, 김정권, 1997, "폐콘크리트에 의한 중화능 및 중금속제거를 위한 재활용에 관한 연구(I)", 한국환경과학회지, 제 6권 제 5호, pp.497~503.
 성낙창, 김은호, 김형석, 김정권, 1996, "굴껍질을 이용한 도금폐수의 중화 및 중금속이온 제거", 한국환경위생학회지, 제 22권 제 3호, pp.81~87.
 송동근, 1997, "폐굴껍질에 의한 중금속 흡착특성과 중화능", 동아대학교 대학원 석사논문.
 송충열, 1981, "분석화학", 형설출판사, pp.596.
 이규성, 1990, "특정유해물질중 크롬처리기술", 환경관리인, pp.28~29.
 이무열, 1995, "계껍질을 이용한 납의 생물 흡착 제거", 한국과학기술원 화학공학과 대학원 석사논문.
 이흥근, 1995, "응집을 이용한 도금공장폐수의 중

- 금속제거의 최적조건에 관한 연구”, 대한환경위생학회지, 제 9권 제 2호.
- 이형순, 1988, “형광 X선 분석”, 삼양문화사.
- 축협중앙회, 1997, “’96년 축산물가격 및 수급자료”.
- 환경처 고시 제 91-97호, 1991, “환경공정시험법 (수질오염·폐기물편)”.
- Takatsuki, H. and Sakai, S., 1990, “treatment of and resource recovery from laboratory hazardous wastewater”, Asia and Pacific regional workshop on hazardous waste minimization and reduction, Kyoto, Japan, 3-7 Dec.