

## 폐콘크리트의 중화 및 중금속 제거를 위한 재활용에 관한 연구 (I)

김은호·김정권·성낙창  
동아대학교 환경공학과  
(1997년 4월 15일 접수)

## A Study on Recycle of Waste Concretes for Neutralization and Removal of Heavy Metals (I)

Eun-Ho Kim, Jung-Kwon Kim, and Nak-Chang Sung  
*Dept. of Environmental Engineering, Dong-A University*  
(Manuscript received 15 April 1997)

This study was performed to investigate the utilization of waste concretes for neutralization and removal of heavy metals in plating wastewater, because waste concretes have been known to be very porous, to have high specific surface area and to have alkaline minerals such as calcium.

The results obtained from this research showed that waste concretes had a buffer capacity to neutralize an acidic alkali system in plating wastewater. Generally, neutralization and removal rate of heavy metals were excellent in the increase of waste concrete amounts and a small size. Because a coefficient of correlation was high, it seemed that removal of heavy metals could be explained by Freundlich and Langmuir isotherms. If we reflected the adsorption capacity( $k$ ) and adsorption intensity( $1/n$ ) of Freundlich isotherm, we couldn't consider waste concretes as a good adsorbent. But, we could know that waste concretes were capable of removing a part of heavy metals. In point of building waste debris, if waste concretes substituted for a valuable adsorbent such as activated carbon, they could look forward to an expected economical effect.

**Key words :** waste concretes, neutralization, heavy metals, plating wastewater

### 1. 서 론

최근 재개발 및 건축에 따른 건축물의 노후화와 기능저하에 의한 콘크리트 구조물의 해체공사에서 폐콘크리트가 다량으로 발생하여 매립지의 부족 및 무단투기로 인한 각종 건설공해 발생요인이 되고 있다.

이러한 폐콘크리트를 재활용함으로써 주거환경과피의 주범인 건설공해를 방지할 수 있으며,

특히 지방자치제 실시 이후의 건설사업은 전국의 매립지 선정에 많은 어려움이 예견되므로 자원화하거나 재활용할 수 있는 방안을 강구하면 쾌적한 환경조성에 매우 유익한 결과를 가져올 수 있을 것이다.

국내 폐콘크리트 발생량은 정확하게 산출하기에는 다소 무리가 따르지만 약 700만톤/년 정도로써 건설 폐기물(869만톤/년)중 약 60~

70% 정도를 차지하고 있으며, 그 발생량이 점차적으로 증가할 것으로 예상된다고 한다(임남웅 등, 1995).

페콘크리트의 화학적 조성은 중량비로 CaO 약 27.8% 정도이며 그의 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등도 소량 함유되어 있다.

페콘크리트는 다공질 형태의 비표면적을 가지고 있고, 알칼리성 물질, 즉 칼슘 성분을 함유하고 있어 폐수중에서 중화와 중금속 침전반응이 동시에 일어난다는 점을 고려한다면 재활용 측면에서 우수한 수처리제로써 충분한 이용가능성이 있을 것으로 판단된다.

반면에 '96년 현재 전국적으로 산재되어 있는 영세한 도금업체는 약 1,500여개소로써 여기에서 발생하는 폐수는 강산성이며 다량의 중금속을 함유하고 있지만, 도금업의 영세성으로 인하여 원활한 폐수처리를 수행하지 못하고 있다.

이와 같은 이유로 불완전한 폐수처리가 되어 오염물질이 배출허용치를 초과한 상태로 방류될 가능성이 높고, 이로 인해 막대한 배출부과금을 지불한다면 기업의 자금압박을 가중시켜 국제경쟁력강화에도 뒤지게 될 뿐만 아니라 생태계를 파괴시키는 주범으로 처리에 시급을 요하는 실정이다.

이에 부응하고자 본 연구에서는 최근에 그 발생량이 급격하게 증가하고 있는 페콘크리트의 재활용 측면에서 도금폐수 중 강산성이며 비교적 고농도의 중금속을 함유하고 있고 산알칼리계 폐수를 대상으로 중화 및 중금속 제거의 가능성을 검토해보고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 실험재료

표준시료는 다량으로 폐기처분되고 있는 페콘크리트를 회수하여 증류수로 깨끗이 세척한 후에 충분히 자연건조시켜 ball mill로 분쇄하여 소입경(600 $\mu$ m), 중입경(2.38mm), 대입경(4.76mm)로 분리한 다음 Dry Oven에서 약 105 $^{\circ}$ C를 유지하면서 약 24시간 가열증발건조시켜 흡습하지 않도록 데시케이터속에서 냉각 보관하여 사용하였다.

대상폐수로서는 부산광역시 장림공단내에 위치해 있는 장림도금협동조합 도금폐수 처리장으로 부터 강산성이며 비교적 고농도의 중금

속을 함유하고 있는 산알칼리계 폐수를 선정하였다.

### 2.2 실험방법

#### 2.2.1 페콘크리트 성상분석

페콘크리트의 성상분석을 위하여 표준시료를 정확히 7g(건조중량 기준)을 취하여 500mL beaker에 HCl 30mL와 HNO<sub>3</sub> 10mL를 첨가한 후에 서서히 가열하여 유기물을 분해하고 약 10mL 정도까지 농축시켰으며, 또한 다시 HNO<sub>3</sub> 5mL를 넣어 잔여 유기물을 분해하였다.

대부분의 유기물은 분해되고 시료용액이 5mL가 되면 가열을 중지하고 실온까지 냉각시킨 후에 세척용 Polyethylene bottle을 사용하여 세척한 다음 100mL volumetric flask의 눈금까지 채워서 격렬하게 혼든 후에 정치시켜 거름종이로 침전물을 여과하고 여과액을 적당량 취하여 폐기물공정시험법(김삼권, 1995)에 준하여 중금속을 ICP(Inductively Coupled Plasma)를 이용하여 분석을 행하였다.

#### 2.2.2 페콘크리트내 중금속 용출실험

본 연구에서는 pH 변화에 따른 페콘크리트내 중금속의 용출특성을 파악하기 위하여 0.1N NaOH와 0.1N HCl을 사용하여 pH를 4, 5, 6, 7, 8 및 9로 각각 조정한 후에 6개의 분액여두에 각각 증류수 200mL과 소입경을 정확하게 5g을 취하여 상온상압하에서 진폭 4~5cm인 진탕기를 200회/분으로 약 6시간 진탕한 후에 여과(No. 5 A여지)하고 여과액을 적당량 취한 후에 폐기물공정시험법(김삼권, 1995)에 준하여 중금속을 ICP로 분석하였다.

#### 2.2.3 페콘크리트에 의한 중화능 및 중금속 제거실험

본 연구에서는 300mL 삼각플라스크를 반응기로 사용하여 우선 일정량의 페콘크리트 시료를 채운후에 대상폐수 200mL을 가하여 상온상압하에서 Jar tester를 이용하여 130rpm으로 교반하면서 회분식실험을 행하였다.

페콘크리트를 소입경(600 $\mu$ m), 중입경(2.38mm), 대입경(4.76mm)의 3분류로 변화시키고 소입경을 대상으로 주입량을 3g, 5g, 7g 및 9g으로 변화시켜 중화능 및 중금속 제거특성을 검토하였다.

분석용 시료는 10분, 30분, 60분, 90분, 120분, 150분 및 180분 간격으로 채취하였으며, 채취된 시료는 pH meter을 이용하여 바로 pH를 측정하였다.

그리고, 채취한 시료를 농후한 염산을 정확하게 2mL을 넣고 격렬하게 혼합하여 완전하게 용해시킨 후에 시료 50mL을 피펫으로 100mL 비이커에 넣고 왕수(질산 : 염산 = 1 : 3) 10mL를 첨가한후, 가열하여 약 30mL이 될 때까지 농축한 후에 방냉을 하였다.

그 다음에 100mL 메스플라스크에 여과(No. 5 여지를 이용)를 하고 증류수로 비이커 및 깔때기를 2~3회 세척을 하고 100mL이 되도록 맞추었다.

이상의 방법으로 전처리를 한 후에 ICP를 이용하여 중금속을 분석하였다.

#### 2.2.4 페콘크리트에 의한 흡착등온 실험

흡착제에 영향을 미치는 주요인자인 흡착질에 대해서는 농도, 분자의 크기, 분자량, 분자구조, 분자공극, 입체구조 등이 있고, 흡착제에 대해서는 표면적, 표면의 물리화학적 성질, 흡착제의 물리적 입경이나 형태 등이 있다(김용무 등, 1995).

또한, 흡착제의 흡착능에는 온도, pH, 반응시간 등의 영향도 고려되어진다고 한다(김용무 등, 1995).

본 연구에서는 페콘크리트에 의한 흡착능 평가를 위하여 페콘크리트 주입량에 따른 중금속 제거실험의 결과를 Freundlich와 Langmuir 흡착등온식(김용권 등, 1995)을 적용하여 해석하였다.

Freundlich 흡착등온식은 <1>과 같다.

Freundlich isotherm

$$: X/M = kC^{1/n} \quad <1>$$

X/M : 피흡착제/흡착제(g/g)

C : 용액내의 용질의 질량(mg/L)

k, n : 경험적 상수

<1>에 대수를 취하면

$$\text{Log } X/M = \text{Log } k + 1/n \text{ Log } C \quad <2>$$

<2>에 의하여 Log C와 Log X/M의 관계를 직선적으로 표현할 수 있다.

직선으로 부터 기울기와 절편을 구하여 1/n 과 k 값을 결정할 수 있으며, 직선의 기울기가 작을 경우 저농도에서 고농도에 걸쳐 흡착이 잘

되며 기울기가 크면 고농도에서의 흡착량이 큰 반면에 저농도에서 흡착량이 작아지게 된다.

그리고 Langmuir 흡착등온식은 <3>과 같이 표현할 수 있다.

Langmuir isotherm

$$: q = q_m kC / (1 + kC) \quad <3>$$

q : 피흡착제/흡착제(g/g)

C : 피흡착제의 평형농도(mg/L)

$q_m, k$  : 경험적 상수

<3>을 역수를 취하면

$$1/q = (1 + kC) / q_m kC$$

$$= 1/q_m + 1/q_m k \cdot 1/C \quad <4>$$

<4>에서 1/q에 대한 1/C를 plot하여 직선을 얻을 수 있다.

이 직선의 절편과 기울기가 각각 1/ $q_m$ 와 1/ $q_m k$ 를 나타내며, 여기에서  $q_m$ 과 k가 결정된다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 페콘크리트 성상분석

본 연구에서는 최근 재개발 및 건축에 따른 건축물의 노후화와 기능저하에 의한 구조물의 해체공사로 인하여 다량으로 발생하는 페콘크리트를 중화 및 중금속제거제로써 재활용 가능성을 검토한 결과, Table 1에 나타난 바와 같으며 시멘트의 화학적 조성의 비교하였다.

시멘트의 화학적 조성은 중량비로 CaO 63.0%, SiO<sub>2</sub> 20.0%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 6.0%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3.0% 등으로 구성되어 있으며 이를 이용하여 제조한 콘크리트 중에는 그 혼합비에 따라 다소 상이하지만 약 10~17wt% 정도 함유되어 있다.

페콘크리트의 화학적 조성은 중량비로 CaO 29.7%, SiO<sub>2</sub> 51.1%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3.87%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2.39%, MgO 1.24% 등의 비율로 구성되어 있으며, 또한 비표면적은 6.0~16.3×10<sup>3</sup>m<sup>2</sup>/kg으로 조사되었다.

이상의 결과를 검토해볼때 최근에 급격하게 증가하고 있는 건축폐기물중 페콘크리트는 비교적 다량의 칼슘성분을 함유하고 있으며, 또한 다공질 형태의 넓은 비표면적을 지니고 있어 건축폐기물의 재활용 측면에서 중화 및 중금속제거에 탁월한 특성을 지니고 있는 것으로 추정된다.

#### 3.2 페콘크리트내 중금속 용출특성

본 연구에서는 국내 강우의 pH를 고려하여 용출실험을 행한 결과, Table 2에 나타내었다.

Table 1. Compositions of waste concrete and cement

(Unit : %)		
Compositions	Waste concrete	Cement
CaO	29.7	63.0
SiO <sub>2</sub>	51.1	20.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.87	6.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.39	3.0
MgO	1.24	-
Others	11.5	0.8

Table 2. Dissolution mass of heavy metals with pH variation

(Unit : mg/L)						
Items \ pH	4	5	6	7	8	9
Zn	0.06	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03
Mn	0.09	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Fe	2.52	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13
Cu	0.11	0.10	0.09	0.08	0.08	0.09
Al	3.45	1.54	1.73	1.85	2.00	1.96
As	0.15	0.03	0.01	0.07	0.05	0.04
Cr	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Pb	ND*	ND	ND	ND	ND	ND

\* ND : under the 0.0001mg/l

우리나라의 용출시험기준치를 보면 Cu 3.0mg/L, As 1.5mg/L, Cd 0.3mg/L, Cr<sup>6+</sup> 1.5mg/L, Pb 3.0mg/L, Hg 0.005mg/L이다(환경부고시, 1995).

Table 2에서 알 수 있듯이, 국내 강우의 pH와 유사하게 pH 4의 범위에서 As의 경우 용출시험기준의 약 2배 정도 높게 나타났으며, Fe의 경우에도 용출시험기준에 포함되어 있지 않지만 2.52mg/L로 다소 높은 경향을 보이고 있다.

또한, 그의 항목에서는 대부분 용출시험기준을 초과하지 않는 것으로 나타났지만 극미량으로 용출되고 있음을 알 수 있다.

그러나, 이상의 용출시험결과에서 알 수 있듯이, 최근 국내 강우 pH가 빈번하게 산성을 나타내고 있음을 고려해볼때 현재 폐콘크리트가 매립 또는 장기적으로 무단방치되고 있는 점을 감안하면 극미량일지라도 중금속의 용출량이 증가하여 상대적으로 동식물이나 자연생태계에 치명적인 영향을 끼칠 수 있는 등 심각한 환경문제를 야기할 수도 있을 것으로 예상된다.

### 3.3 폐콘크리트에 의한 중화능

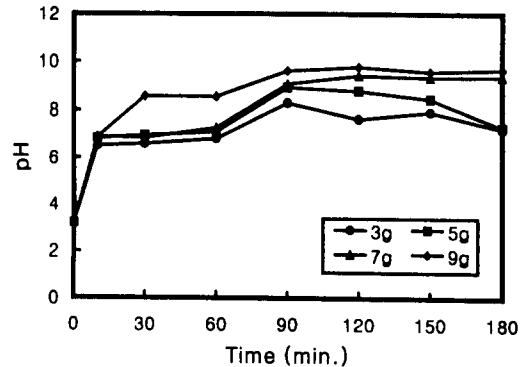


Fig. 1. pH variations with waste concrete amounts.

#### 3.3.1 주입량 변화

Fig. 1에서 알 수 있듯이, 입경(소입경 600 $\mu$ m)을 일정하게 하고 주입량을 달리하였을 경우 3g과 5g은 반응시간 90분에 각각 pH 8.28과 8.9로써, 그리고 7g과 9g은 반응시간 120분에 각각 pH 9.4와 9.77로써 최대를 나타낸 후에 완만하게 감소하는 현상을 보이고 있다.

폐콘크리트의 주입량에 의한 중화능을 살펴본 결과, 주입량에 관계없이 pH는 반응초기에는 아주 급격하게 증가하는 현상을 보이다가 그 이후에 완만하게 증가하는 현상을 보이고 있으며, 전반적으로 주입량이 증가할수록 반응시간이 경과함에 따라 중화능이 뛰어난 것을 알 수 있다.

이러한 현상은 폐콘크리트내에 pH 상승효과를 유발할 수 있는 알칼리성 성분을 다량으로 함유하고 있으며, 양이온교환체로써 중금속 뿐만 아니라 H<sup>+</sup> 이온도 동시에 흡착교환시키기 때문으로 여겨진다.

#### 3.3.2 입경 변화

Fig. 2에서 알 수 있듯이, 주입량을 일정하게 하고 입경을 달리하였을 경우 소입경과 중입경에서의 pH 변화를 보면 대입경과는 달리 각각 반응시간 60분과 120분에 중성에 도달하였으며, 특히 소입경의 경우 반응시간 90분에 최대 pH 8.9를 나타내면서 150분까지 약 pH 8.5 $\pm$ 0.2 정도를 유지하고 그 이후에 약간 감소하는 현상을 보이는 반면에 중입경의 경우 반응시간 150분에 pH 7.1로 최대를 나타내고 그 이후에 소입경과 유사한 경향을 보이고 있다.

대입경의 경우 반응시간 60분 이후부터 pH 6.2 $\pm$ 0.2 정도를 유지하고 있다.

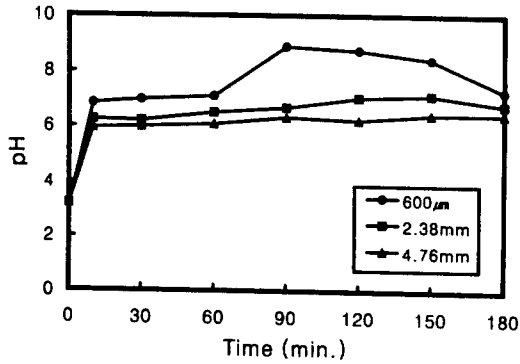


Fig. 2. pH variations with waste concrete particle size.

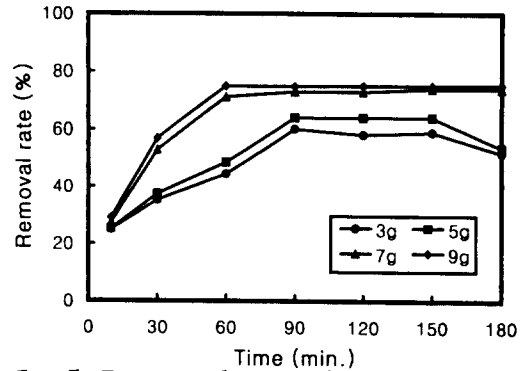


Fig. 5. Zn removal rate with waste concrete amount and reaction time.

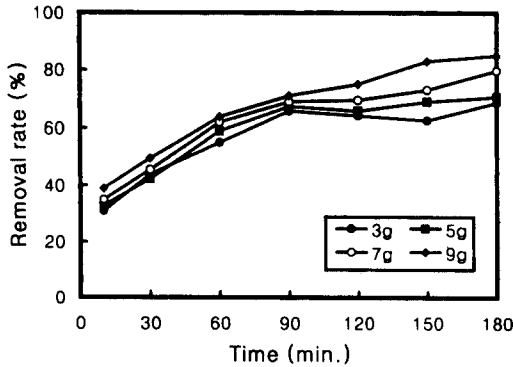


Fig. 3. Fe removal rate with waste concrete amount and reaction time.

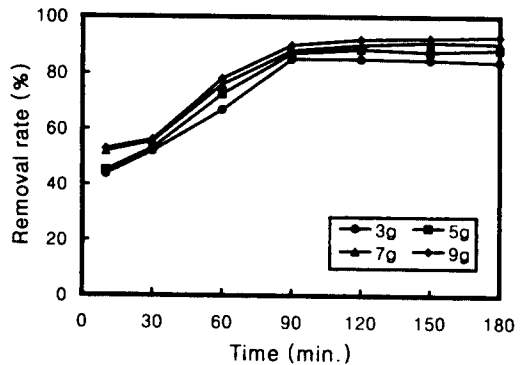


Fig. 4. Cu removal rate with waste concrete amount and reaction time.

입경에 관계없이 Fig. 1과 유사한 경향을 보이고 있으며 입경이 작을수록 중화능이 탁월한 것을 알 수 있다.

### 3.4 페콘크리트에 의한 중금속 제거

#### 3.4.1 주입량 변화

Fig. 3~5는 입경을 일정하게 하고 주입량을 달리하였을 경우의 실험결과이다.

Fig. 3에서 보면 Fe의 경우 주입량이 증가함에 따라 반응시간이 경과할수록 거의 비슷한 양상으로 제거효율이 증가하는 것을 알 수 있으며, 3g과 5g의 경우 반응시간 120분에 일시적인 탈착현상을 보이다가 각각 180분과 150분에 다시 제거효율이 증가하는 현상을 나타내고 있다.

Fig. 4를 보면 Cu의 경우도 Fe와 비슷한 양상을 보이고 있으며, 3g과 5g의 경우 반응시간 150분에 일시적인 탈착현상을 보인후에 시간이 경과함에 따라 다시 제거효율이 증가하거나 평형상태를 유지하고 있다.

Fig. 5는 Zn의 제거특성을 나타낸 것으로써 주입량의 증가에 따라 현저하게 높은 제거효율을 나타내고 있으며 3g과 5g의 경우 반응시간 90분에서 150분까지 평형상태를 나타낸 후에 반응시간 180분에 탈착현상을 보이면서 다소 감소하는 경향을 보이고 있다.

또한, 7g과 9g의 경우 반응시간 60분 이후에 평형상태를 유지하고 있다.

Fig. 3과 5에서 약간의 탈착현상은 페콘크리트와 중금속 사이의 평형에 도달할때까지는 제거량이 계속적으로 증가하여 효율이 증가하지만 일단 평형에 도달한 후에는 결합력이 약한 물리적으로 결합된 중금속의 일부가 교반강도에 의하여 다시 탈착되기 때문으로 여겨진다.

#### 3.4.2 입경 변화

Fig. 6~8은 주입량을 일정하게 하고 입경을 달리하였을 경우의 실험결과이다.

그림에서 알 수 있듯이 주입량 변화에 의한 제

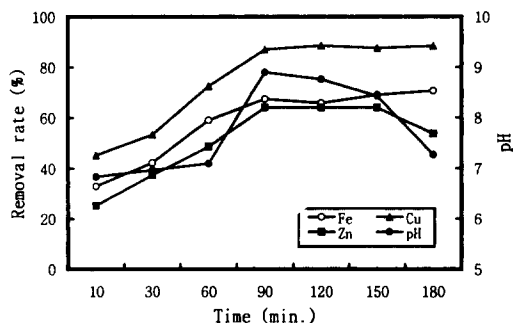


Fig. 6. Removal rate of heavy metal with pH and reaction time(600µm).

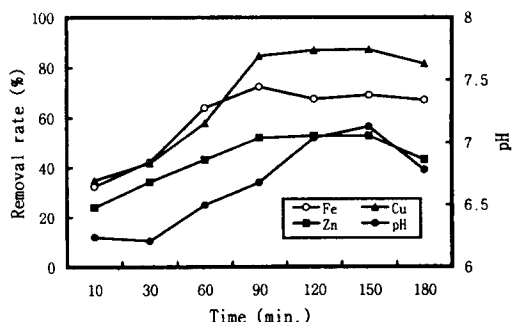


Fig. 7. Removal rate of heavy metal with pH and reaction time(2.38mm).

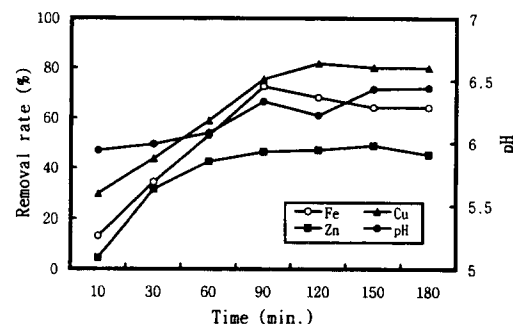


Fig. 8. Removal rate of heavy metal with pH and reaction time(4.76mm).

거특성과 마찬가지로 전반적으로 입경이 작을수록 반응시간이 경과함에 따라 중금속 제거효율이 증가하는 것을 알 수 있으며 전체 입경에 걸쳐 반응시간 90분 이후에 거의 평형을 유지하거나 일시적으로 감소하는 경향을 보이고 있다.

한편, 이(1990)에 의하면 중금속의 침전은 특유의 pH 범위를 지니고 있으며, 본 연구대상 중금속의 pH 영역은 Cu 5.5~8.0, Fe 1.7~4.

3 및 Zn 6.5~8.5라고 한다.

Fig. 6~8을 보면 반응시간의 경과에 따라 전 입경에서의 pH가 5.94~8.9를 나타내고 있어 Fe를 제외한 Cu와 Zn의 침전에 아주 적합함을 알 수 있다.

그러나, Fig. 6~8에서 알 수 있듯이, Zn의 경우 Cu와 Fe에 비하여 아주 낮은 제거효율을 보이고 있는데, 이러한 현상은 Cu와 Zn이 비슷한 pH 영역에서 경쟁반응을 하여 Cu가 우세하기 때문으로 여겨진다.

이상의 결과로부터 알 수 있듯이, 페콘크리트의 입경이 작을수록 흡착효율이 높고 평형상태도 비교적 빠른 시간에 일어남을 알 수 있다.

이러한 현상은 입경이 작을수록 흡착제의 비표면적이 증가하여 피흡착제와 보다 더 많은 접촉을 할 수 있어 효율이 좋은 것으로 판단된다.

### 3.5 흡착등온식

본 연구에서는 Fe, Cu 및 Zn에 대한 페콘크리트의 흡착능과 Freundlich와 Langmuir 흡착등온식의 적용 가능성을 평가하였다.

Fig. 9~10의 예는 Fe에 대한 Freundlich와 Langmuir 흡착등온식을 나타내고 있으며, 그의 항목에 대해서도 이와 동일한 방법으로 해석하여 그 결과를 Table 3에 요약하였다.

선(1991)에 의하면 상관계수 R이  $-1.0 \leq R \leq 1.0$ 의 사이에서 변하게 되며, R=1.0 또는 -1.0인 경우에 완전한 상관, R=0인 경우 y와 x는 서로 상관이 없다고 한다.

Table 3에서 높은 R 값을 보면 페콘크리트에 의하여 중금속의 제거가 Freundlich와 Langmuir 흡착등온식으로 흡착현상을 해석할 수 있음을 알 수 있다.

그러나, Freundlich 흡착등온식으로 해석해보면  $1/n$  값은 0.1~0.5이고 k 값이 클수록 흡착효율이 양호한 반면에  $1/n$ 이 2이상이면 난흡착성 물질이라고 하는 바, 이러한 점을 고려한다면 페콘크리트에 의한 중금속의 제거에는 그다지 양호한 흡착제로 평가될 수는 없지만 폐수내 함유되어 있는 일부 중금속을 제거하는데 적용할 수 있을 것으로 여겨진다.

왜냐하면, 페콘크리트내 알칼리성 성분의 용해로 인하여 폐수의 pH가 상승하여 중금속을 불용성의 수산화물로 침전제거될 수 있으며, 또한 폐수내 중금속이 페콘크리트 구성물질의 용해에

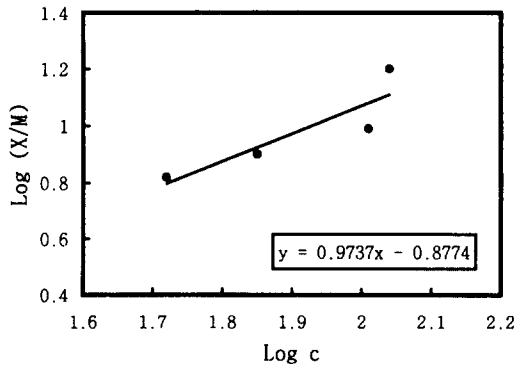


Fig. 9. Freundlich isotherm for Fe removal utilizing waste concretes.

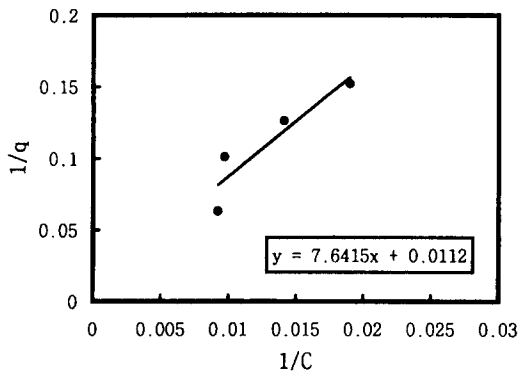


Fig. 10. Langmuir isotherm for Fe removal utilizing waste concretes.

Table 3. Results of adsorption equilibrium experiments

HM	Freundlich			Langmuir		
	k	1/n	R	q <sub>m</sub>	k	R
Fe	0.13	0.97	0.89	89.3	0.002	0.92
Cu	0.19	1.21	0.99	-19.9	-0.013	0.99
Zn	1.89	0.41	0.61	30.2	0.006	0.61

\* HM : Heavy metals

의하여 형성되는 양이온에 의하여 교환될 수 있기 때문이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 폐콘크리트의 재활용 측면에

서 도금폐수 중 강산성이며 고농도의 중금속을 함유하고 있고 산알칼리계 폐수를 대상으로 중화 및 중금속 제거의 가능성을 검토해본 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) pH 4의 범위에서 As와 Fe가 비교적 높은 용출을 나타낸 반면에 그의 pH 영역에서는 전항목에서는 극미량 용출되었다.

2) 폐콘크리트내에 함유되어 있는 알칼리성 성분으로 인하여 주입량이 증가하고 입경이 작을수록 중화능이 탁월하였다.

3) 간헐적으로 탈착현상을 보이지만 주입량이 증가하고 입경이 작을수록 중금속 제거효율이 좋았다.

4) 상관계수(R)가 높아 Freundlich와 Langmuir 흡착등온식으로 해석할 수 있을 것으로 여겨지며, Freundlich 흡착등온식의 1/n와 k 값을 고려해볼때 양호한 흡착제로 평가하기에는 다소 무리가 따르지만 일부 중금속의 제거에는 적용가능함을 알 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- 김삼권, 1995, 폐기물처리공정시험법해설, 동화기술, 32pp.
- 김용무, 김미경, 1995, 석탄흡착제의 제조와 중금속이온의 흡착특성, 관동대학교 환경연구소, 14~31.
- 北川曉夫, 김용권, 1995, 활성탄 수처리기술과 관리, 신광문화사, 79~85.
- 선우중호, 1991, 수문학, 동명사, 266~267.
- 이규성, 1990, 특정유해물질중 크롬처리기술 <1>, 환경관리인연합회보, 9, 28~29.
- 임남용, 조중제, 1995, 건설폐기물의 처리 및 재활용 기술 세미나 제 3회(폐콘크리트의 도로포장 재료로서의 활용방안), 중앙대학교 건설대학원, 1~17.
- 환경부고시 1994-57호, 폐기물공정시험법, 1994.