

Sphagnum 피트모스에서의 카드뮴, 구리, 납의 흡착

방선백¹ · 이상우² · 김주용¹ · 유동일³ · 강용곤⁴ · 김경웅^{1*}

¹광주과학기술원 환경공학과, ²가톨릭대학교 생명공학부 환경공학전공, ³(주) 미래엔텍, ⁴(주) 오성NH

Adsorption of Cadmium, Copper, and Lead on Sphagnum Peat Moss

Sunbaek Bang¹, Sang-Woo Lee², Ju-Yong Kim¹, Dong Il Yu³, Yong Kon Kang⁴
and Kyoung-Woong Kim^{1*}

¹Department of Environmental Science and Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju 500-712, Korea

²Environmental Engineering Section, Division of Biotechnology, The Catholic University of Korea, Gyeonggi 420-743, Korea

³Miraeentek Co. Inc., Seongnam 461-822, Korea

⁴Ohsung NH. Co. Inc., Busan 604-817, Korea

Batch adsorption experiments were performed to adsorb cadmium [Cd(II)], copper [Cu(II)], and lead [Pb(II)] onto sphagnum peat moss. According to the results, 10-50 mg/L of Cd(II), Cu(II), and Pb(II) were effectively adsorbed and removed within 1 h by 1.0 g/L of sphagnum peat moss. The amounts of Cd(II), Cu(II), and Pb(II) adsorbed on sphagnum peat moss increased with increasing the initial concentrations. The kinetics for the adsorption of Cd(II), Cu(II), and Pb(II) on sphagnum peat moss was described well using the pseudo-second order model at different initial concentrations. The maximum adsorption capacities calculated from the Langmuir isotherm for Cd(II), Cu(II), and Pb(II) were 33.90, 29.15, and 91.74 mg/g, respectively. Experimental results showed that sphagnum peat moss was a very effective adsorbent on the adsorption of Cd(II), Cu(II), and Pb(II).

Key words : cadmium, copper, lead, peat moss, adsorption, Langmuir isotherm

Sphagnum 피트모스에서의 Cd(II), Cu(II), Pb(II)의 흡착에 대한 회분식 실험을 수행하였다. 실험결과 10-50 mg/L의 Cd(II), Cu(II), Pb(II)이 1.0 g/L의 sphagnum 피트모스에 1시간 내에 흡착되어 효과적으로 제거되었다. 초기농도에 따라 sphagnum 피트모스에 흡착된 Cd(II), Cu(II), Pb(II)의 반응속도는 유사이차 반응모델을 적용하여 설명하였다. 또한 Langmuir 등온흡착으로부터 Cd(II), Cu(II), Pb(II)에 대한 최대흡착량을 계산하여, 각각 33.90, 29.15, 91.74 mg/g가 sphagnum 피트모스에 흡착될 수 있음을 알아내었다. Sphagnum 피트모스가 Cd(II), Cu(II), Pb(II)를 흡착하는데 매우 효과적인 흡착제임을 실험결과를 통해 나타내었다.

주요어 : 카드뮴, 구리, 납, 피트모스, 흡착, Langmuir 등온흡착모델

1. 서 론

환경오염을 유발하는 중금속 오염은 산업활동에 의한 산업폐수, 광산지역의 광산폐수, 매립지의 침출수 등을 통해 발생된다. 이러한 과정에서 카드뮴, 구리 및 납 등을 포함하는 다양한 중금속이 환경생태계로 유입되어, 식물이나 동물 몸속에 축적되며, 최종적으로는

사람의 몸에 축적되어 여러 가지 질병을 발생시키게 된다(Greener and Kochen, 1983; Strubelt, 1996). 체내에 흡수된 카드뮴은 배출되지 않고, 특히 신장에 많이 축적되어 신장 기능장애와 체내의 칼슘 대사 장애로 인한 공연화증을 발생시키게 되는 중금속으로, 대표적인 공해병인 이타이이타이병을 일으켰던 물질로 잘 알려져 있다(Hagino and Yoshioka, 1961). 구리는 위

*Corresponding author: kwkim@gist.ac.kr

와 장의 통증, 간과 신장의 손상 및 빈혈증을 일으키는 물질로 구리에 과잉 노출시 알레르기성 피부질환이 심해지는 것으로 보고되고 있다. 납이 아동에게 과잉으로 섭취되었을 경우, 기억력 감퇴로 학습 및 행동장애를 일으키고 신체발육에 영향을 미치게 될 뿐만 아니라, 어른의 경우에는 고혈압과 빈혈의 경우에는 신경계에 손상을 줄 수 있다(Osterberg *et al.*, 1997).

카드뮴, 구리 및 납을 포함하는 중금속의 제거를 위해 화학적 침전, 멤브레인 필터, 이온교환, 흡착처리 기술들이 사용되고 있다. 특히 흡착처리 기술의 적용에 있어서 다양한 흡착제의 개발이 많은 연구자들 사이에서 관심의 대상이 되고 있다. Bailey 등(1999)은 자연에서 대량으로 존재하는 물질과 산업에서 나오는 부산물질 등을 경제적인 흡착제로 정의하였다. 이러한 경제적인 흡착제로는 나무껍질, 키토산, 제올라이트, 점토, 비산재(fly ash), 쌀겨, 피트모스(peat moss) 등이 포함되어 있다(Bailey *et al.*, 1999; Babel and Kurnia-wan, 2003).

Sphagnum 피트모스는 주로 스파그넘(Sphagnum)이라는 대형 물이끼 종류가 한해한 늪지대에서 생육하다 오랜 기간 동안 늪지대 바닥에 퇴적되어 탄화된 것으로 다량의 유기산(카르복실기)를 가지고 있으며 CEC (Cation Exchange Capacity)가 크고 입자의 표면은 다공성으로 높은 비표면적(>200 m²/g)을 나타내는 물질로 알려져 있다(McLellan and Rock, 1988; Babel *et al.*, 2003; Fine *et al.*, 2005). 피트모스는 비교적 가격이 저렴한 경제적인 흡착제로 다양한 중금속을 흡착하는 능력이 높다고 보고되었다(Christ, R.H. *et al.*, 1996; Bailey *et al.*, 1999; Fine *et al.*, 2005). 많은 연구자들이 피트모스를 이용하여 중금속을 처리하는 연구를 수행하고 있으며, 피트모스를 이용하여 중금속이 함유된 매립지의 침출수와(McLellan and Rock, 1988; Ringqvist *et al.*, 2002) 중금속이 함유된 폐수(Brown *et al.*, 2000) 제거하는 연구를 정리하여 발표하였다.

본 논문에서는 여러 피트모스 중에서 상업적으로 활성화된 sphagnum 피트모스를 이용하여 카드뮴, 구리, 납과 같은 중금속 제거하는데 있어, 중금속 농도에 따른 제거율, 반응속도 및 최대흡착량을 회분식 실험을 통해서 비교 평가하였다. 활성화된 sphagnum 피트모스를 전

처리과정 없이 중금속 처리에 사용함으로써 보다 간편한 흡착방법으로 중금속을 처리하기 위한 타당성의 자료로서 이 연구가 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 재료 및 방법

2.1. 재료 및 분석방법

실험에 사용된 Cd(II), Cu(II), Pb(II)에 대한 모용액 시료는 각각 Cd(NO₃)₂·4H₂O (Aldrich, USA), CuSO₄·5H₂O(Aldrich, USA), Pb(NO₃)₂ (Yakuri pure chemical, Japan)를 사용하여 1,000 mg/L으로 제조하여 stock solution으로 사용하였다. 중금속 제거를 위해서는 Spill-sorb Canada Inc.의 sphagnum 피트모스를 활성화시켜서 만든 제품인 Spill-Sorb을 사용하였다(Table 1).

Sphagnum 피트모스는 피트모스 중에서 가장 잘 수분을 흡수하는 물질로, 90% 이상의 수분을 함유하고 있는 sphagnum 피트모스를 습지에서의 폭기를 통해서 60% 정도로 수분함유를 줄이고 수확과 스크린을 거쳐 열처리와 공기 건조과정으로 수분을 10% 이하로 줄이는 활성화과정을 거친 제품이다. 균질한 상태에서 실험을 하기 위해서 체분리를 통해서 0.074-1.7 mm 입경을 가진 입자를 이용하여 전처리과정 없이 실험에 사용하였다. Sphagnum 피트모스는 휴믹화가 충분히 진행된 고위이탄으로 유기물 함량이 높아서 농업과 원예 분야의 비료 성분으로 많이 사용된다고 보고되었다(이창훈과 신현상, 2004).

Cd(II), Cu(II), Pb(II)의 분석은 원자흡광광도계(Flame Atomic Absorption Spectrometer, Perkin Elmer 5100, USA)를 이용하였고, 용액의 pH는 Orion pH meter (model 330, USA)를 사용하여 측정하였다. 실험 전 매일 pH 미터를 pH 버퍼용액을 사용하여 보정하였다.

2.2. 제거량과 반응속도에 대한 회분식 실험방법

각각의 중금속 제거량과 반응속도를 알아보기 위한 실험에서는 각각의 중금속에 대한 초기농도를 10, 25, 50 mg/L으로 만들어 비이커에 500 ml씩 넣고 초기 pH를 측정하였다. 0.5 g의 sphagnum 피트모스를 넣은 후 반응조 내에서 완전혼합이 되도록 자석 교반기를 이용하여 교반하였다. 일정시간 간격으로 10 ml의 용액을 채수한 후 0.45 μm의 실린지 필터로 즉시 필터를 하였

Table 1. Characterization of sphagnum peat moss used in adsorption experiments.

Acidity	CEC (meq/100 g)	Organic content (%)	Particle size (mm)
4.00±0.02	15.34±0.99	93.78±0.17	0.074-1.7

으며, 시료에 소량의 질산용액을 넣은 후에 분석을 하였다. 용액의 pH는 채수와 동시에 측정하였다.

2.3. 최대흡착량 계산을 위한 등온흡착 실험방법

최대흡착량 계산을 위한 등온흡착실험에서는 반응속도에서 사용한 동일한 투여량인 1.0 g/L의 sphagnum 피트모스가 사용되었다. Cd(II)와 Cu(II)의 초기농도는 10-300 mg/L로, Pb(II)의 초기농도는 25-1000 mg/L로 사용하여 실험을 하였다. 최대흡착량 계산을 위한 평형상태를 만들기 위해서 Cd(II)와 Cu(II)의 경우에는 반응속도실험에서 나타난 평형 도달 시간인 2시간보다 많은 3시간 동안 교반하였고, Pb(II)는 초기농도가 높은 관계로 6시간 동안 교반하였다. 0.05 g의 sphagnum 피트모스를 각각의 초기농도를 가지고 있는 50 ml의 Cd(II), Cu(II), Pb(II) 용액에 넣은 후에 각각 3시간과 6시간 동안 반응을 시킨 후 실린지 필터로 필터하고 소량의 질산을 넣어서 분석을 하였다. 또한 pH는 필터와 동시에 시료에서 측정하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. sphagnum 피트모스에 의한 Cd(II), Cu(II), Pb(II)의 제거율

Cd(II)에 대한 농도에 따른 제거율을 비교 평가하였다(Fig. 1). 초기농도가 10 mg/L이였을 때에는 2시간 후 약 85%의 Cd(II)이 제거되었고, 초기농도가 25와 50 mg/L이였을 때에는 약 65%와 45%의 Cd(II)이 각각 제거되었다. 또한 Cd(II)이 sphagnum 피트모스와 반응했을 때, 초기에 빠른 제거율을 보이다가 15분 이후로 서서히 제거율이 증가하는 것이 관찰되었다. 10 mg/L의 Cd(II)은 반응 3분 이내에 약 52%, 6분에는 약 66%, 15분에는 약 77%, 30분 이후에는 약 81%가 제거되었다. 이는 sphagnum 피트모스 표면에 Cd(II)이 먼저 흡착된 후, 다공성을 가진 피트모스 내부로 시간이 지남에 따라 조금씩 확산되어 흡착되는 것으로 사료된다. 따라서 sphagnum 피트모스를 이용하여 Cd(II)을 충분히 제거하기 위해서는 최소 30분 정도의 반응시간이 필요한 것으로 나타났다. 또한 Cd(II)의 농도에 맞게 sphagnum 피트모스의 투여량을 높여준다면 반응시간이 줄어들 뿐만 아니라 Cd(II) 처리효율을 높일 수 있을 것으로 사료된다. 용액의 초기 pH는 5.8-5.9 정도였으나 sphagnum 피트모스 투여하면 pH가 급격히 감소하여 2시간 후에는 Cd(II)의 초기농도가 높아짐에 따라 pH 감소도 4.0-4.4로 감소하였다. 급격한 pH의 감

소는 sphagnum 피트모스 표면에 존재하는 카르복실기(-COOH)가 용액내 존재하는 양이온과 이온교환 반응에 의하여 H⁺가 용액내에서 증가하며, 이로 인해서 용액의 pH가 감소되어지는 것으로 볼 수 있다(Fine *et al.*, 2005).

Sphagnum 피트모스에 의한 Cu(II)의 제거율은 Fig. 2에 나타내었다. 2시간의 반응 후 초기 농도가 10, 25, 50 mg/L이였을 때, Cu(II)의 제거율은 약 87, 64, 40%로 초기 농도가 늘어날수록 sphagnum 피트모스에 의한 Cu(II)의 제거율은 감소하였다. Cu(II)의 제거율은 Cd(II)의 제거율과 같이 초기에 빠른 제거율을 보이다가 15분 이후에는 제거율이 비교적 서서히 증가하였다. 25 mg/L의 Cu(II)는 3분, 6분, 15분, 30분 이후에 각각 약 32, 41, 51, 56%의 제거율을 보여주고 있다. Cu(II)의 제거율은 Cd(II)의 제거율과 비슷한 경향을 보여주고 있다. Cu(II)가 함유된 용액의 pH도 Cd(II)과 비슷하게 초기에 급격히 감소하다가 30분 이후로는 조금씩 pH가 낮

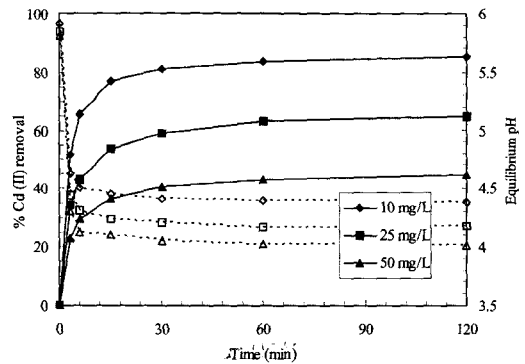


Fig. 1. Removal of Cd(II) by sphagnum peat moss (Close symbol=% Cd(II) removal; open symbol=equilibrium pH, sphagnum peat moss=1.0 g/L).

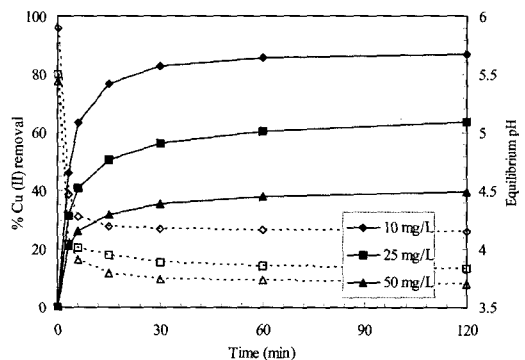


Fig. 2. Removal of Cu(II) by sphagnum peat moss (Close symbol=% Cu(II) removal; open symbol=equilibrium pH, sphagnum peat moss=1.0 g/L).

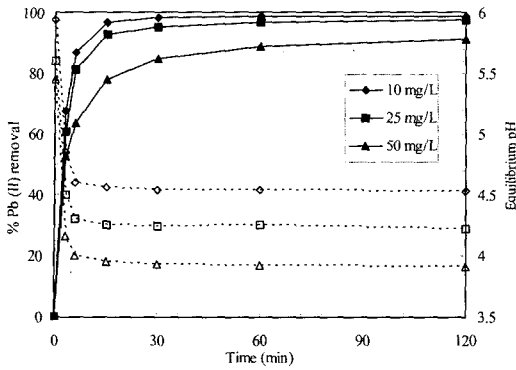


Fig. 3. Removal of Pb(II) by sphagnum peat moss (Close symbol=% Pb(II) removal; open symbol=equilibrium pH, sphagnum peat moss=1.0 g/L).

아져서 거의 평형상태를 이루고 있다. Gundogan 등 (2004)은 피트모스 일종인 herbaceous peat를 이용하여 Cu(II)를 흡착시키는 실험을 수행했다. pH 5.5에서 10 g/L의 herbaceous peat에 대해 Cu(II)의 농도를 19에서 38 mg/L까지 증가시켜서 흡착정도를 비교하였는데, 약 97%에서 약 93%의 제거율을 보여주었다.

Fig. 3은 Pb(II)의 농도에 따른 Pb(II)의 제거율을 보여주고 있다. Pb(II)의 초기농도가 높아질수록 Pb(II)의 제거율은 감소하였다. Cd(II)과 Cu(II)와는 달리 sphagnum 피트모스에 의한 Pb(II)의 제거율은 매우 높았다. 10 mg/L의 Pb(II)은 30분 이후에는 약 98%의 제거율을 보였고 25, 50 mg/L의 Pb(II)도 각각 95, 85%의 제거율을 나타냈다. 50 mg/L의 Pb(II)이 2시간 동안 반응한 후에는 약 91%가 제거되어서 Pb(II)이 Cd(II)과 Cu(II)보다 더 많은 양이 제거되는 것으로 나타났다. Cd(II)과 Cu(II)를 제거할 때와 같이 Pb(II)을 제거하는 실험에서도 pH의 감소가 관찰되었다. Ho와 McKay (1999a)는 피트모스를 이용한 Pb(II)의 흡착에 대한 연구에 의하면, 초기 농도가 높을수록 흡착속도가 감소하고 매우 빠른 초기 흡착속도를 관찰하였다. 초기농도가 증가할수록 제거율이 감소하는 경향을 나타내고 있는데, 이는 초기농도가 흡착속도에 영향을 미치는 인자중의 하나로 분류한 Brown 등(2000)의 결론과 일치한다.

3.2. sphagnum 피트모스에 대한 Cd(II), Cu(II), Pb(II)의 흡착속도

Fig. 1-3의 실험 결과를 사용하여 흡착속도를 계산하기 위해 Ho와 McKay (1999b)의 유사이차 반응모델(pseudo-second order model)을 적용하였다. Ho와

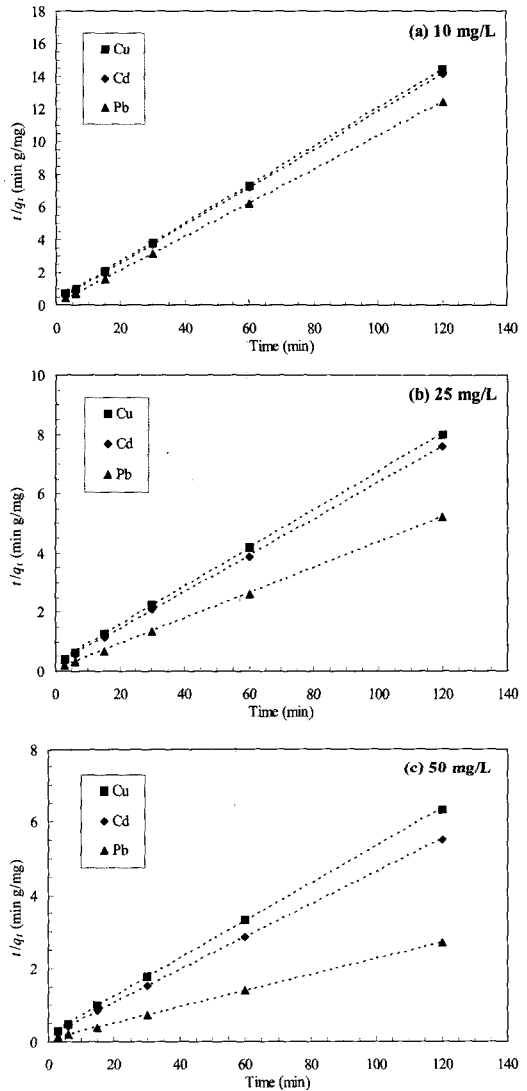


Fig. 4. Pseudo-second order kinetics of Cu(II), Cd(II), and Pb(II) onto sphagnum peat moss at various concentrations (sphagnum peat moss=1.0 g/L, Initial concentration=(a) 10 mg/L, (b) 25 mg/L, and (c) 50 mg/L).

McKay (1999b)의 유사이차 반응모델은 다음과 같은 식으로 표시될 수 있다.

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{h} + \frac{1}{q_e} t = \frac{1}{kq_e^2} + \frac{1}{q_e} t \tag{1}$$

여기서 q_t 는 반응시간 t 에서 흡착제인 피트모스에 흡착된 중금속의 양(mg/g)이고, q_e 는 평형상태에서의 흡착제인 피트모스에 흡착된 중금속의 양(mg/g)이며, k 는 유사이차 반응모델에 대한 흡착속도상수(g/mg min)이고, h 는 초기흡착속도(mg/g min)이다.

Table 2. Pseudo-second order kinetics parameters for the adsorption of Cu(II), Cd(II), and Pb(II) onto sphagnum peat moss.

Conc. (mg/L)	Element	q_e (mg/g)	k (g/mg·min)	h (mg/g·min)	R^2
10	Cu(II)	8.496	0.0483	3.486	1.0000
	Cd(II)	8.606	0.0586	4.342	1.0000
	Pb(II)	9.718	0.1259	11.89	0.9999
25	Cu(II)	15.46	0.0157	3.744	0.9997
	Cd(II)	16.23	0.0189	4.985	0.9999
	Pb(II)	23.31	0.0330	17.92	0.9999
50	Cu(II)	19.42	0.0144	5.411	0.9998
	Cd(II)	22.42	0.0124	6.207	0.9999
	Pb(II)	45.45	0.0080	16.50	1.0000

식 (1)을 이용하여 sphagnum 피트모스에 대한 Cd(II), Cu(II), Pb(II)의 흡착속도를 유사이차 반응 모델로 해석하였다(Fig. 4). Fig. 4(a)는 Cd(II), Cu(II), Pb(II)의 초기농도가 각각 10 mg/L일때의 흡착속도를 보여주고 있는데, Table 2에 의하면 초기흡착속도 (mg/g min)는 Cu(II)가 3.486, Cd(II)가 4.342, Pb(II)가 11.89으로 Pb(II)의 초기흡착속도가 가장 높았으며, 평형상태에서의 흡착량(mg/g)은 Cu(II), Cd(II), Pb(II)가 각각 8.694, 8.606, 9.718으로 나타났다. Fig. 1-3에서의 실험결과를 통해서 2시간 후의 흡착량(mg/g)은 Cu(II), Cd(II), Pb(II)가 각각 8.33, 8.47, 9.63으로 유사이차 반응모델로 계산한 평형상태에서의 흡착량과 매우 비슷한 값을 보여주고 있다. 이는 실험을 통해 얻은 결과를 유사이차 반응모델을 이용하여 초기흡착속도와 흡착량 계산이 가능함을 확인시켜주고 있다. 초기농도가 25 mg/L일 때의 유사이차 반응모델은 Fig. 4(b)에 나타났다. Table 2로부터 초기농도가 25 mg/L일 때의 유사이차 반응모델에 의한 Cu(II), Cd(II), Pb(II) 흡착량을 보면, 각각 15.46, 16.23, 23.31로 실험값인 15.03, 15.80, 23.04와 거의 같은 값을 나타내고 있다. Fig. 4(c)는 초기농도가 50 mg/L일 때의 유사이차 반응모델을 보여주고 있는데, 계산된 초기흡착속도와 흡착량은 Pb(II)>Cd(II)>Cu(II) 순으로 초기농도가 다른 모델과 거의 비슷한 경향을 보여주고 있다(Table 2).

Gundogan 등(2004)은 herbaceous 피트모스에 대한 Cu(II)의 흡착에 대한 연구에서, 유사이차 반응모델, 내부입자 확산모델(intra-particle diffusion), 유사이차 반응모델을 이용하여 흡착속도를 계산하였는데, 유사이차 반응모델이 가장 높은 상관계수 값을 나타내는 것으로 보고하였다. Cu(II)의 초기농도가 28 mg/L일 때, 유사이차 반응모델에서 계산된 평형상태에서의 흡착량(mg/g)은 2.72이었다. 실험결과에 기초한 유사이차 반응모델에 의하면, 초기농도가 25 mg/L일 때 평형상태의 흡착량은

15.46 mg/g으로 sphagnum 피트모스의 흡착량이 herbaceous 피트모스에 비해서 현저히 높음을 보여주고 있다. Ho와 McKay (2000)도 아일랜드산 sphagnum 피트모스에 대한 Pb(II), Cu(II), Ni(II)의 흡착을 유사이차 반응모델로 해석을 하였는데, 초기농도가 50 mg/L일 때 Cu(II)와 Pb(II)의 흡착량은 각각 8.87, 6.15 mg/g으로 나타났다. 본 실험에서 사용한 sphagnum 피트모스에 대한 Cu(II)와 Pb(II)은 각각 19.42, 45.45 mg/g으로 흡착량이 월등히 높았는데, 이는 활성화 과정을 거친 sphagnum 피트모스가 중금속을 흡착하는데 더 효과적이라는 것을 나타내고 있다. 또한 Sphagnum 피트모스는 전체유기물 함량중 휴민, 휴믹산, 풀빅산의 휴믹물질이 각각 76%, 18%, 3%로 존재하며(이창훈과 신현상, 2004), 휴믹분자는 -COOH, -phenolic OH, -alcoholic OH 등의 작용기를 가지는 강력한 착화제로서 높은 산화상태($\geq 2^+$)의 중금속이온들과 매우 강한 킬레이트 착화합물을 형성하기 때문에 중금속 흡착에 효과적인 것으로 볼 수 있다(Stenenson, 1982).

3.3. sphagnum 피트모스에 대한 Cd(II), Cu(II), Pb(II)의 최대흡착량

흡착제에 흡착되는 물질의 최대흡착량을 계산하는 방법으로는 Langmuir 등은흡착모델이나 Freundlich 등은 흡착모델을 보편적으로 사용하고 있다. Brown 등(2000)은 여러 연구자들의 피트모스를 이용하여 중금속을 제거하는 논문을 비교 검토한 논문에서, Langmuir 등은흡착모델이 피트모스와 중금속과의 흡착을 가장 잘 설명하는 모델이라고 보고했다. Sharma와 Forster (1993)는 피트모스를 이용하여 Cr(VI)를 제거하는 실험에서, pH가 낮을 때에는 Freundlich 등은흡착모델을 적용하는데 어려움을 겪었으나 Langmuir 등은흡착모델에서는 전체 pH 범위에서 잘 적용되었음을 보여주었다. 또한 McKay와 Porter (1997)도 Cu(II), Cd(II), Zn(II)

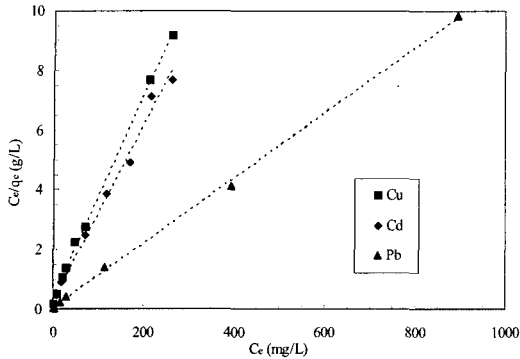


Fig. 5. Linearized Langmuir adsorption isotherms of Cu(II), Cd(II), and Pb(II) onto sphagnum peat moss.

를 흡착처리하기 위한 방법으로 피트모스를 사용하였는데, Langmuir 등온흡착모델이 Freundlich 등온흡착 모델보다 더 적합하게 적용된 것으로 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 sphagnum 피트모스를 이용한 Cd(II), Cu(II), Pb(II)의 최대흡착량을 계산하기 위해 Langmuir 등온흡착모델을 적용하였으며, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{c_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max}k_{ads}} + \frac{c_e}{q_{max}} \quad (2)$$

여기서 c_e 는 평형상태에서 중금속의 농도(mg/L)이고, q_e 는 평형상태에서 흡착제인 피트모스에 흡착된 중금속의 양(mg/g)이며, q_{max} 는 흡착제인 피트모스에 흡착된 최대 중금속의 양(mg/g)이고, k_{ads} 는 Langmuir 흡착상수(L/mg)이다.

Fig. 5에서는 식 (2)의 Langmuir 등온흡착모델을 이용하여 회분식 실험의 결과를 직선식으로 표시하였다. Langmuir 등온흡착모델이 0.99 이상의 높은 상관계수(R^2)를 가진 식으로 잘 표현되었다. 이를 통해서 각각의 중금속에 대한 최대흡착량과 Langmuir 흡착상수를 계산하여 Table 3에 정리하였다. 최대흡착량은 Cu(II)가 29.15 mg/g, Cd(II)이 33.90 mg/g, Pb(II)가 91.74 mg/g 이었고, Langmuir 흡착상수는 Cu(II), Cd(II), Pb(II)에 대해 각각 0.0975, 0.0983, 0.2167 L/mg으로 최대흡착량과 같이 Pb(II) > Cd(II) > Cu(II) 순으로 나타났다. McKay 등(1998)은 Pb(II)의 뉴질랜드산 sphagnum 피트모스에 대한 최대흡착량이 19.5 mg/g으로 보고하였는데, 활성화된 sphagnum 피트모스의 사용에 흡착된 최대 Pb(II) 흡착량은 91.74 mg/g으로 약 4.7배 정도 더 효과적인 것인 것으로 나타났다. 이는 활성화 과정을 거친 sphagnum 피트모스의 Pb(II)에 대한 흡착정도가 매우 큰 것을 나타내는 것으로, 특히 Pb(II) 처리에

Table 3. Langmuir parameters for the adsorption of Cu(II), Cd(II), and Pb(II) onto sphagnum peat moss.

Element	q_{max} (mg/g)	k_{ads} (L/mg)	R^2
Cu(II)	29.15	0.0975	0.9976
Cd(II)	33.90	0.0983	0.9908
Pb(II)	91.74	0.2167	0.9993

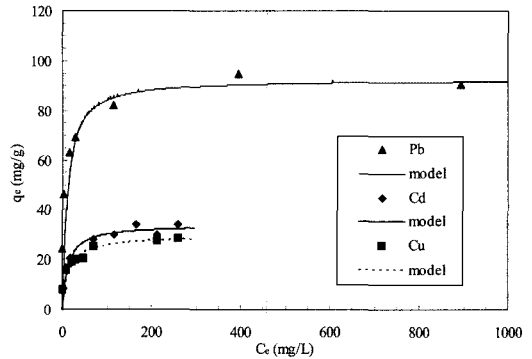


Fig. 6. Adsorption isotherms of Cu(II), Cd(II), and Pb(II) onto sphagnum peat moss (sphagnum peat moss=1.0 g/L).

용이하게 적용될 수 있음을 보여주는 것으로 생각된다.

Sphagnum 피트모스에 대한 Langmuir 등온흡착모델을 사용하여 실험 데이터에 대한 모델링을 하여 회분식 실험결과와 같이 Fig. 6에 나타내었다. Sphagnum 피트모스에 대한 Pb(II)의 흡착량은 Cd(II)와 Cu(II)에 비해 월등히 높았다. 이와 비슷한 결과로, Pb(II)의 흡착친화력이 Cu(II)보다 더 큰 것으로 보고되었다 (Chen *et al.*, 1990). 반면에 Ho와 MaKay (2000)는 Cu(II)가 Pb(II)보다 더 많이 피트모스에 흡착되었다고 발표하였다. 이는 여러 종류의 피트모스마다 각각의 중금속에 대한 흡착친화력이 다르다는 것을 보여준다. 이창훈과 신현상(2004)은 sphagnum 피트모스에서 추출한 휴민을 이용한 Cu(II), Cd(II), Pb(II)의 흡착실험에서 흡착친화력을 Pb(II) > Cd(II) > Cu(II) 순으로 나열하였다. Pb(II)의 흡착친화력이 높은 이유는 휴민분자의 주요결합자리인 카르복실기(-COOH)와 Pb(II)의 결합력이 강하기 때문인 것으로 보고하였다.

4. 결 론

Sphagnum 피트모스를 이용하여 Cd(II), Cu(II), Pb(II)를 효과적으로 흡착할 수 있음을 회분식 실험결과를 통해서 평가하였다. 10-50 mg/L의 Cd(II), Cu(II), Pb(II)에 대한 sphagnum 피트모스의 흡착속도는 매우 빠르게 진행되어 거의 1시간 이내에 평형상태에 도달

하였다. 유사이차 반응모델로부터 회분식 실험결과를 이용하여 Cd(II), Cu(II), Pb(II)의 흡착량과 초기흡착속도를 도출하였다. 또한 Langmuir 등온흡착 모델을 통해서 각각의 중금속의 대한 최대흡착량을 계산하였다. Sphagnum 피트모스에 대한 Cd(II), Cu(II), Pb(II)의 최대흡착량은 각각 33.90, 29.15, 91.74 mg/g로, Pb(II)>Cd(II)>Cu(II) 순으로 최대흡착량은 감소하였다. 다른 중금속보다도 Pb(II)를 흡착하는데 sphagnum 피트모스가 매우 효과가 있는 것으로 조사되었다. 특히 sphagnum 피트모스를 이용한 반응 시 pH가 3.5-4.0인 산성조건에서 효과적으로 Cd(II), Cu(II), Pb(II)가 흡착된 것으로 보여, 처리 후 석회등의 중화제를 첨가하는 방식을 이용한 산성폐수나 광산 침출수 처리의 적용성이 클 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 과학기술부 한국과학기술기획평가원에서 지원하는 국가지정연구실 사업(NRL)과 광주과학기술원 국제환경연구소(IERC)에서 일부를 지원받아 수행하였다.

참고문헌

이창훈, 신현상 (2004) 피트모스에서 추출한 휴민과 수용액 중 Cu(II), Cd(II), Pb(II)의 흡착에 대한 연구. 대한환경공학회지, 26권, p. 1079-1085.

Babel, S. and Kurniawan, T.A. (2003) Low-cost adsorbents for heavy metal uptake from contaminated water: a review. *J. Hazard. Mat.*, v. B97, p. 219-243.

Bailey, S.E., Olin, T.J., Bricka, R.M. and Adrian, D.D. (1999) A review of potentially low-cost sorbents for heavy metals. *Water Res.*, v. 33, p. 2469-2479.

Brown, P.A., Gill, S.A. and Allen, S.J. (2000) Metal removal from wastewater using peat. *Water Res.*, v. 34, p. 3907-3916.

Chen, X., Gosset, T. and Thevenot, D.R. (1990) Batch copper ion binding and exchange properties of peat. *Water Res.*, v. 24, p. 1463-1471.

Chist, R.H., Martin, J.R., Chonko, J., and Christ, D.R. (1996) Uptake of metals on peat moss: an ion-exch-

nage process. *Environ. Sci. Technol.*, v. 30, p. 2456-2461.

Fine, P., Scagnossi, A., Chen, Y. and Mingelgrin, U. (2005) Practical and mechanistic aspects of the removal of cadmium from aqueous systems using peat. *Environ. Pollut.*, v. 138, p. 358-367.

Greener, Y. and Kochen, J.A. (1983) Methylmercury toxicity in the chick embryo. *Teratology*, v. 28, p. 23-28

Gundogan, R. Acemioglu, B. and Alma, M.H. (2004) Copper(II) adsorption from aqueous solution by herbaceous peat. *J. Colloid Interf. Sci.*, v. 269, p. 303-309.

Hagino, N. and Yoshioka, K. (1961) A study on the etiology of so-called "Itai-Itai" disease. *J. Japan Orthop. Assoc.*, v. 20, p. 812-814

Ho, Y.S. and McKay, G. (1999a) The sorption of lead(II) ions on peat. *Water Res.*, v. 33, p. 578-584.

Ho, Y.S. and McKay, G. (1999b) Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochem.*, v. 34, p. 451-465.

Ho, Y.S. and McKay, G. (2000) The kinetics of sorption of divalent metal ions onto sphagnum moss peat. *Water Res.*, v. 34, p. 735-742.

McLellan, J.K. and Rock, C.A. (1988) Pretreating landfill leachate with peat to remove metals. *Water Air Soil Poll.*, v. 37, p. 203-215.

McKay, G. and Porter, J.F. (1997) Equilibrium parameters for the sorption of copper, cadmium, and zinc ions onto peat. *J. Chem. Technol. Biot.*, v. 69, p. 309-320.

McKay, B., Vong, B. and Porter, J.F. (1998) Isotherm studies for the sorption of metal ions onto peat. *Adsorpt. Sci. Technol.*, v. 16, p.51-66.

Osterberg, K., Borjesson, J., Gerhardsson, L., Schutz, A. and Skerfving, S. (1997) A neurobehavioural study of long-term occupational inorganic lead exposure. *Sci. Total Environ.*, v. 201, p. 39-51.

Ringqvist, L., Holmgren, A. and Oborn, I. (2002) Poorly humified peat as an adsorbent for metals in wastewater. *Water Res.*, v. 36, p. 2394-2404.

Sharma, D.C. and Forster, C.F. (1993) Removal of hexavalent chromium using sphagnum peat moss. *Water Res.*, v. 27, p. 1201-1208.

Stevenson, F.J. (1982) *Humus chemistry : Genesis, composition, reactions.* John Wiley & Sons, New York, p. 264-284

Strubelt, O, Kremer, J., Tilse, A., Keogh, J. and Pentz, R. (1996) Comparative studies on the toxicity of mercury, cadmium, and copper toward the isolated perfused rat liver. *J. Toxicol. Environ. Health*, v. 47, p. 269-283.