

Mesoporous silica의 표면특성이 Pb(II)와 Cd(II)의 흡착거동에 미치는 영향

이하영 · 이갑두 · 박상원[†]

계명대학교 환경과학과

(2008년 1월 23일 접수, 2008년 6월 11일 채택)

Influence of Surface Characteristics of Mesoporous Silica on Pb(II) and Cd(II) Adsorption Behaviour

Ha Young Lee · Kamp Du Lee · Sang Won Park[†]

Department of Environmental Science, Keimyung University

ABSTRACT : In this study, Mesoporous silica were prepared from hydrothermal synthesis using gel mixture of tetraethylorthosilicate (TEOS) as silica source and cetyltrimethylammonium bromide(CTMABr) as a template. In the optimum synthesis cause, molar ratio of template and silica changed. The surface and structure properties of Mesoporous silica were determined by XRD, SEM, and BET. N₂ adsorption isotherm characteristics, including the specific surface area(S_{BET}), total pore volume(V_T), and average pore diameter(D_{BH}), were determined by BET. Also, the adsorption character of Pb(II) and Cd(II) ion on Mesoporous silica were measured using ICP. As a result, a S_{BET} of 100~1,500 m²/g was determined from the N₂ adsorption isotherm. Also, the average pore diameter of 2~4 nm. The adsorption of Pb ion and Cd ion on Mesoporous silica become different depending on the pH of solution. The adsorption amount of Mesoporous silica had higher than that of silicagel.

Key Words : Mesoporous Silica, MCM-48, Adsorption, Zeta Potential, Pb, Cd

요약 : 본 연구에서는 실리카 원료로 tetraethylorthosilicate(TEOS)를 이용하고, template로 cetyltrimethylammonium bromide(CTMABr)을 사용하여 메조포러스 실리카(mesoporous silica)를 수열합성 하였다. 최적의 합성 조건을 알기 위해 template와 실리카의 몰비를 조절하였다. 메조포러스 실리카의 표면 성질과 구조는 XRD, SEM 그리고 BET를 이용하여 살펴보았다. 비표면적(S_{BET}), 전체 기공부피(V_T), 그리고 평균 기공지름(D_{BH})을 포함하는 N₂ 등은 흡착 특성은 BET식을 이용하여 확인하였다. 또한, 메조포러스 실리카의 Pb(II)와 Cd(II)의 흡착 특성은 Zeta potential과 ICP를 이용하여 측정하였다. 그 결과, N₂ 등은 흡착으로부터 S_{BET}는 100~1,500 m²/g이었으며, 평균 기공 크기는 2~4 nm이었다. 메조포러스 실리카의 Pb이온과 Cd이온의 흡착 특성은 용액의 pH변화에 의존하였고, 기존의 흡착제인 실리카겔보다 더 좋은 흡착 거동을 보였다.

주제어 : 메조포러스 실리카, MCM-48, 흡착, Zeta Potential, Pb, Cd

1. 서론

현대 산업이 고도로 발달되면서 유해물질의 발생량이 급격히 증가하고 있다. 특히 주로 용매나 특정한 용도물질로 사용된 후 정화 처리되지 않고 그대로 자연계로 방출되는 공장, 사업장 등의 폐수는 유해 중금속이 다량 함유되어 있다. 이러한 중금속은 지표수와 지하수의 오염을 더욱 심각하게 만들고 있다. 중금속 물질은 특성상 더 이상 분해되지 않으므로 회수하거나 아니면 매립에 의존한다. 폐수 중의 중금속을 제거하기 위하여 주로 사용되는 기존의 물리적, 화학적 처리법으로는 화학응집 침전법,¹⁾ 증발법, 역삼투막법, 액막법, 산화/환원법, 활성탄 흡착법, 이온교환법,²⁾ 전기분해법³⁾ 등이 있다. 중금속 농도가 높은 경

우는 중금속을 수산화물로 침전시켜 대부분의 중금속을 제거할 수 있다. 중금속의 농도가 낮은 경우에는 이온교환수지나 박막을 이용하여 처리할 수 있다.⁴⁾ 그러나 이러한 방법들은 특정 중금속 이온을 선택적으로 흡착/제거할 수 없는 단점이 있다. 이와 같은 단점을 극복하기 위하여 제올라이트, 활성탄, 및 실리카겔과 같은 물질에 기능기를 부착함으로써 중금속을 선택적으로 흡착/제거가 가능하다. 그러나 이들은 넓은 표면적을 가지고 있으면서도 대체로 기공 크기가 작거나 구조가 균일하지 않다는 단점이 있다. 또한, 액상에서 중금속 이온의 기공 내 침투가 억제되어 기공 내 넓은 면적의 기능기와 접촉을 막게 되고 중금속 흡착 효율을 감소시킨다.^{5~8)} 이러한 문제점을 개선하기 위하여 기공 크기가 크고 일정하며 표면적이 넓은 Mesoporous 유기/무기 복합 흡착제가 개발되고 있다.

메조포러스(mesoporous)에 대한 실질적인 관심은 1992년 M41S(M41S family)라고 불리는 새로운 계열의 분자체가

[†] Corresponding author

E-mail: swpark@kmu.ac.kr

Tel: 053-580-5556

Fax: 053-580-6292

Mobil사의 연구자들에 의해 발견되면서 시작되었다.^{9~10)} 메조포러스 실리카(mesoporous silica) 물질은 높은 비표면적과 뛰어난 흡착 능력, 그리고 우수한 촉매적 특성을 가지고 있으며, 특히 기공 크기를 적당한 계면활성제의 선택에 의하여 20~100 Å까지 조절이 가능하다. 또한 기존의 흡착제에 비하여 표면적이 5배 이상 크며 일정한 기공 크기분포를 보인다는 면에서 효과적인 흡착제 개발에 적합하다.¹¹⁾

본 연구에서는 메조포러스 실리카(mesoporous silica)의 표면 특성과 구조적 성질을 알아보고, 합성조건을 조절하여 최적의 합성 조건에 미치는 영향을 고찰하였고, 표면 전위(zeta potential) 측정을 통해 pH에 따른 용액론적 특성과 중금속의 농도가 미치는 영향을 고찰하였다. 그리고 중금속 대표 물질인 Pb(II)와 Cd(II)의 흡착 실험을 통해 기존의 흡착제인 실리카겔과 흡착 효율을 비교하여 흡착 거동에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1. 실험재료

본 연구의 메조포러스 실리카(mesoporous silica) 제조에 사용된 계면활성제(surfactant)는 cetyltrimethylammonium bromide(CTMABr)가 사용되었고 실리카 원(silica source)으로는 tetraethylorthosilicate(TEOS)를 사용하여 제조하였다. 또한 표면 전위(zeta potential) 측정과 흡착 실험에 이용된 Pb(II)와 Cd(II) 용액은 1,000 ppm Pb 표준 시약을 사용하였다.

2.2. 메조포러스 실리카(mesoporous silica)의 합성

CTMABr을 적당량 물에 녹여 에탄올(EtOH)을 넣고, 40°C에서 한 시간 동안 교반한다. 그리고 여기에 NaOH를 첨가한 후 10분 동안 교반하고 TEOS를 적당량 천천히 주입하여 한 시간 동안 교반 하여 반응시켰다. 이때 혼합물내의 반응 물질의 몰조성은 CTMABr : TEOS : NaOH : H₂O : EtOH = 0.1 : 0.9 : 0.23 : 100 : 50이었다. 반응 후 130°C에서 48시간 동안 수열 합성 시킨 후, 남아 있는 계면활성제의 제거를 위해 0.1 M HCl/EtOH로 5회 이상 씻어 내고 여과를 하였다. 그리고 난 뒤, 반응물을 70°C에서 24시간 건조시키고, 건조된 반응물 550°C에서 3시간동안 소성시켜 메조포러스 실리카(mesoporous silica) 입자를 얻었다.

Table 1. Synthesis parameter of mesoporous silica

Mesoporous silica	Reagent		Molar ratio (CTMABr : TEOS)
	Surfactant	Silica source	
MCM-48(a)	CTMABr (C ₁₉ H ₄₂ NBr)	TEOS (tetraethyl-orthosilicate)	0.1 : 0.9
MCM-48(b)			0.2 : 0.8
MCM-48(c)			0.3 : 0.7
MCM-48(d)			0.4 : 0.6
MCM-48(e)			0.5 : 0.5

본 실험에서는 계면활성제와 TEOS 몰비에 따라 메조포러스 실리카(mesoporous silica)의 표면 특성과 구조적 성질을 알아보기 위해 몰비를 Table 1과 같이 변화시켜 실험하였다.

2.3. 중금속 흡착실험

흡착 실험은 메조포러스 실리카의 주입량 및 pH 변화에 따른 실험을 수행하였으며, 흡착 실험에 사용된 중금속 용액은 1,000 ppm Pb와 Cd 표준 시약을 사용하였다. Pb 용액과 Cd 용액의 제조는 10⁻⁵ M 2,000 mL를 만들고, 이온 강도를 조절하기 위하여 2,000 mL에 10⁻³ M KNO₃를 넣어 제조하였다.

메조포러스 실리카 pH 변화에 따른 흡착 특성을 알아보기 위해 0.1 N HNO₃, 1 N HNO₃와 0.1 N NaOH, 1 N NaOH로 pH 2~11로 변화시키면서 실험을 행하였다. 흡착 반응 전과 후의 Pb의 농도는 ICP(Jobin Yvon)를 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Mesoporous silica의 특성 분석

계면활성제와 실리카의 몰비에 따라 제조되어진 다양한 종류의 메조포러스 실리카의 표면 특성을 XRD를 이용하여 분석 하였다. XRD분석은 2θ가 0°에서 90°의 범위에서 0.01° 간격으로 측정분석하였으며, 결과는 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 계면활성제와 TEOS 몰비의 변화에 따른 (a) MCM-48~(e) MCM-48(Table 1)에 대한 XRD 패턴은 2θ = 10° 미만에서 나타나는 것을 관찰할 수 있다. 이때 관찰되는 211, 220 등의 강도는 1a3d 대칭성으로 분류될 수 있는 MCM-48의 특징적인 피크들을 볼 수 있다. 이는 본 연구에서 합성된 (a) MCM-48와 (b)의 구조적 균일성이 매우 뛰어나다는 것을 의미한다.

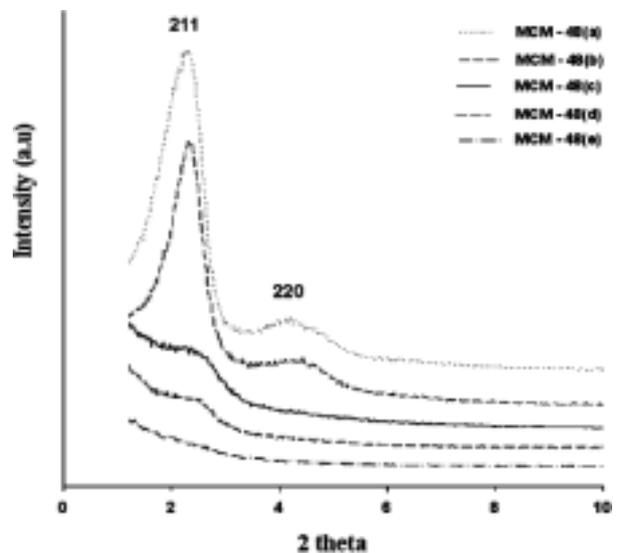


Fig. 1. X-ray Diffraction patterns of mesoporous silica.

합성 조건이 잘 부합되지 않을 경우, Fig. 1의 (c), (d), (e)와 같이 XRD 패턴은 먼저, (211) 면에 해당하는 피크의 세기가 약해지고 넓어지며, 잇따르는 (220)의 면에 해당하는 피크의 세기가 약해지거나 소멸된다. 이는 주로 기공벽의 두께에 관련된 현상으로 생각되며, 조건에 맞지 않는 반응 혼합물은 결정화가 되어도 규산염이 중합되어 생기는 벽 두께가 상대적으로 얇아져 소성을 거치면서 메조포러스 영역의 기공 구조의 수축이 심하게 일어나면서 그 질서가 파괴되기 때문이라고 사료된다.⁹⁾

합성된 메조포러스 실리카의 기공 구조를 살펴보기 위해 N₂의 흡착량을 측정하여 비표면적(S_{BET})과 평균기공지름(D_{BH})을 구하였다. Fig. 2는 메조포러스 실리카의 흡·탈착 등온곡선을 나타낸 것으로, 이 곡선은 IUPAC에서 정한 분류 형태 중 전형적인 Type IV 형태를 이루고 있다. 일반적으로 Type IV 형태는 15~1,000 Å의 세공 반경을 갖는 즉, 중간 세공을 가지고 있는 흡착제에서 나타난다.

흡착-탈착 등온선에서 y축은 단위질량당 흡착된 질소의 부피를 나타내는데 계면활성제의 몰비가 증가하고 실리카의 몰비가 감소함에 따라 흡착량이 감소하는 것으로 볼 때 메조 기공의 부피가 감소함을 알 수 있다. 낮은 상대압력 P/P₀에서 질소는 메조포러스 실리카의 기공 표면에 단분자층(monolayer)으로 흡착되며, P/P₀가 0.3~0.4 부근에서 질소의 흡착량이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 질소의 다중흡착층(multilayer)이 메조 기공을 채움으로써 발생하는 현상으로 메조포어 분자체의 특징적인 현상이다. 또한 모든 등온선들은 히스테리시스(Hysteresis)현상을 보이고 있다. 메조포러스 실리카의 세공 구조 때문에 나타나는 현상으로 기체 압력을 높여가면서 측정된 흡착 등온선과 기체의 압력을 낮추어가며 얻은 흡착등온선이 서로 일치되지 않는 현상으로 세공에 흡착되어 응축된 액체의 메니스커스 때문에 나타난다. 이는 흡착될 때와 탈착될 때 메니스커스의 반지름과 모양이 서로 다르기 때문이다.⁵⁾

Fig. 3은 메조포러스 실리카의 N₂ 흡착-탈착 등온곡선으로부터 BJH(Barrett-Joyner-Halenda) 방법에 의해 구한 기공크기 분포 곡선(pore size distribution)을 나타내었다. 제조된 메조포러스 실리카들은 모두 2~4 nm 사이에서 기공분포를 가지나 계면활성제의 몰비가 증가하고 실리카의 몰비가 감소함에 따라 기공부피가 낮아지는 것을 보아 기공구조의 규칙성이 감소되었음을 나타낸다.

Table 2는 메조포러스 실리카들의 총 기공 부피와 평균 기공 부피, 비표면적을 나타낸 것이다. 계면활성제의 몰비가 커질수록 비표면적이 작아지는 것을 알 수 있다. 그 이유는 계면활성제의 양이 많을 경우, 미셀를 형성하는 농도가 증가하여 상대적으로 실리카의 양이 적어지게 되므로, 수열합성의 응축과정에서 실리카의 벽 두께가 얇아지게 되므로 기계적 강도에 영향을 주어 안정성이 떨어지기 때문으로 사료된다. 이는 앞서 말한 XRD 분석과도 일치하는 경향을 보여준다.

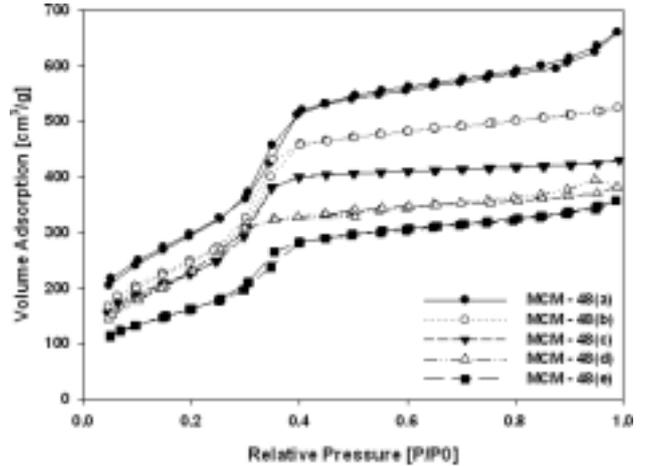


Fig. 2. Nitrogen(N₂) adsorption-desorption isotherm of mesoporous silica.

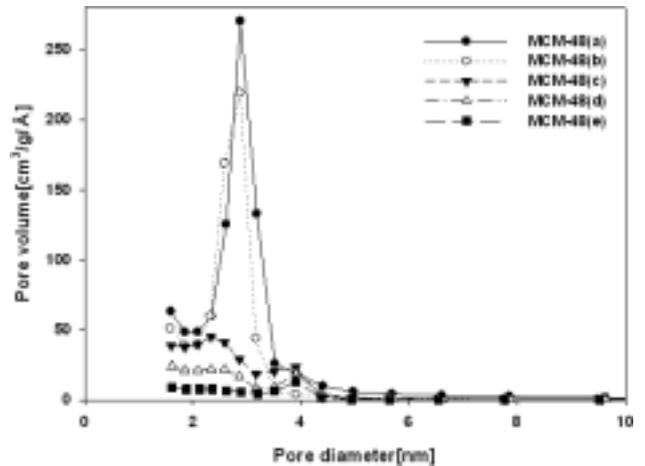
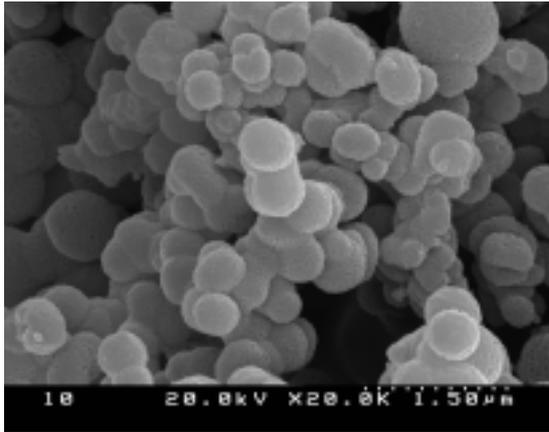


Fig. 3. Pore size distribution of mesoporous silicas from the desorption curve.

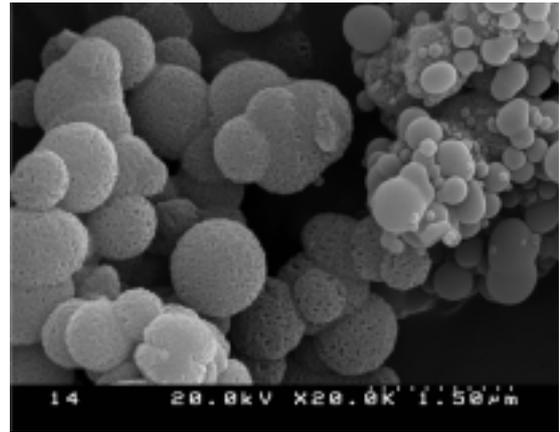
Table 2. Pore properties of synthesized mesoporous silica

Mesoporous silica	Average pore diameter D _{BH} (nm)	Total pore volume VT(cm ³ /g)	BET surface area S _{BET} (m ² /g)
MCM-48(a)	2.99	0.982	1314.90
MCM-48(b)	2.38	0.656	1105.02
MCM-48(c)	2.89	0.344	474.44
MCM-48(d)	3.04	0.216	284.23
MCM-48(e)	3.67	0.098	107.18

Fig. 4는 합성된 메조포러스 실리카 중 비표면적이 가장 높은 MCM-48(a)와 MCM-48(b)의 입자의 형태를 SEM으로 관찰한 결과이다. 입자의 응집 현상이 관찰되고 있으나 대부분의 입자는 각각 완전한 구형입자 형태로 유지되고 있음을 확인 할 수 있었다. 이런 점은 기존의 메조포러스 실리카 입자의 불규칙적인 단점을 보완하여 흡착제에서 분자체의 역할과 촉매에서 지지체(support)로서의 기능을 보다 높일 수 있음을 보여준다.



(a) MCM-48



(b) MCM-48

Fig. 4. SEM micrographs of mesoporous silicas.

3.2. Pb(II)와 Cd(II)의 흡착 특성

3.2.1. 표면 전위(zeta potential)

합성된 메조포러스 실리카(mesoporous silica)를 이용해 대표적인 중금속 이온인 Pb와 Cd에 대한 흡착력을 알아보기 위해 계면활성제와 TEOS의 몰비를 조절한 메조포러스 중 비표면적이 가장 큰 (a) MCM-48과 (b) MCM-48에 대한 흡착 전과 후의 표면 전위(zeta potential)를 측정하였다. 표면 전위(zeta potential)는 전기장 내에서 콜로이드 입자의 이동 속도를 측정하는 것으로 크기의 변화에 따라 흡착 여부를 알 수 있다.

Fig. 5는 (a) MCM-48에 대한 표면 전위의 측정 결과이다. 그래프에서 보는 바와 같이 메조포러스 실리카는 pH에 대한 의존성이 크게 나타났다. 즉, pH의 변화에 따라 -17~-57mV로 표면 전위값이 크게 변화됨을 알 수 있고, 실리카 표면은 전 pH 영역에서 (-)전하 값을 띄고 있음을 알 수 있었다. pH가 증가함에 따라 표면 전위는 감소하였는데, 이는 pH가 증가할수록 입자 표면의 수산기 이온의 분해로 인해 음전하가 더욱 증가하였기 때문이다.

그리고 50 μM과 100 μM의 Pb와 Cd를 첨가하여 흡착시킨 후에 표면 전위의 변화를 살펴보았다.

50 μM Pb를 첨가하였을 경우 메조포러스 실리카의 표면 전위 값이 -16.2~-51.2 mV로 (-)전위 값이 감소되었고, Pb의 농도를 100 μM로 더욱 증가시켰을 경우 표면 전위 값이 -14.6~-33.3 mV로 (-)전위 값이 더욱 감소되었음을 알 수 있다. (-)전위 값이 감소되었다는 것은 Pb²⁺ 이온이 실리카 표면에 흡착 중화되었기 때문이다. 특히 100 μM Pb에 대해서는 pH 5~7사이에서 표면 전위의 값이 약 30 mV 이상 (-)전위 값이 많이 감소되었음을 알 수 있는데 이는 PbOH⁺이온에 의한 흡착 반응이 더욱 많이 일어났음을 알 수 있다.

50 μM Cd를 첨가하였을 경우 메조포러스 실리카의 표면 전위의 값인 (-)전위 값이 감소되었음을 알 수 있으며, Cd의 농도가 100 μM로 높아짐에 따라 (-)전위 값이 더욱더 양의 값을 나타냄을 알 수 있다. 100 μM Cd를 첨가하였을 때 pH 7~10 사이에서 표면 전위의 값이 약 25 mV 이상 (-)전위 값이 감소되었음을 알 수 있었다. 이 또한 CdOH⁺이온에 의한 흡착 반응이 더욱 많이 일어났음을 알 수 있다. Fig. 6의 (b) MCM-48도 같은 경향을 보여주는 것을 알 수 있다.

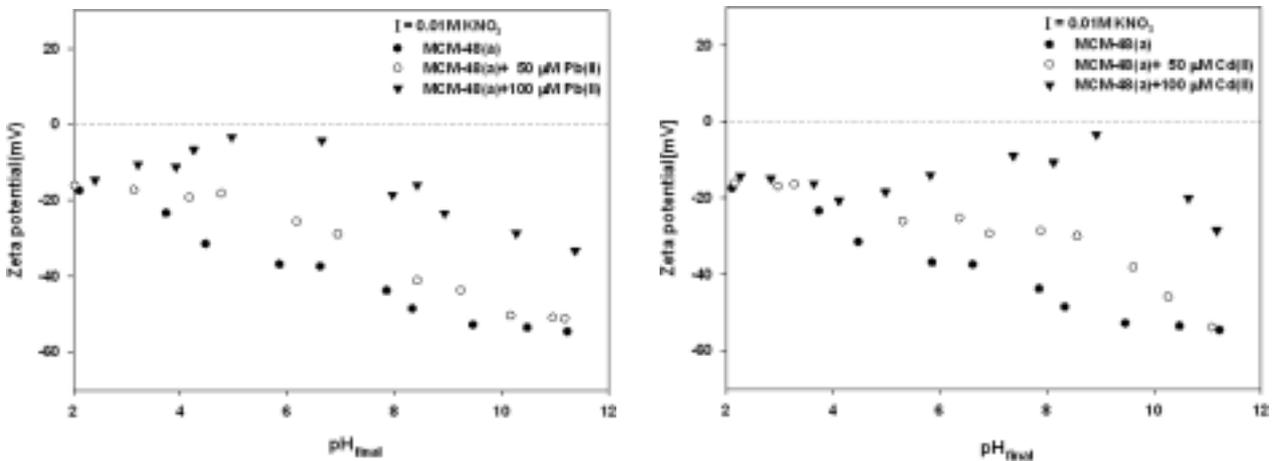


Fig. 5. Effect of Pb(II)and Cd(II) on zeta potential of (a) MCM-48 as a function of pH.

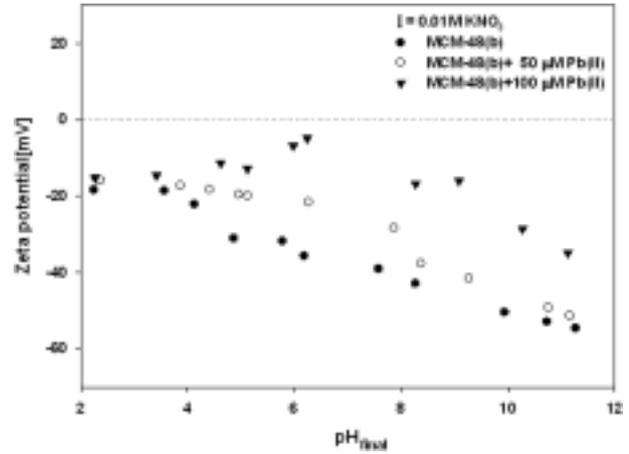
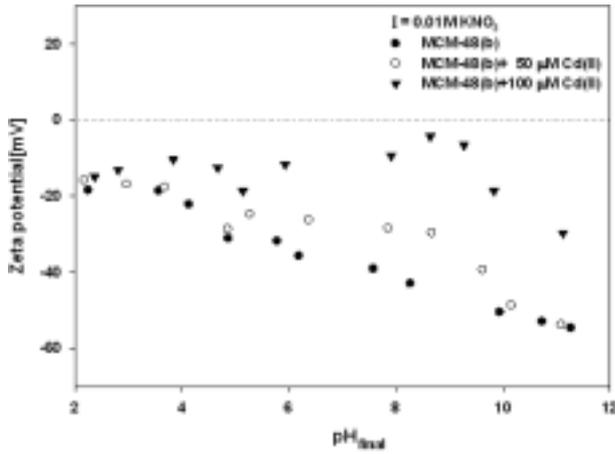


Fig. 6. Effect of Pb(II) and Cd(II) on zeta potential of (b) MCM-48 as a function of pH.

3.2.2. pH에 따른 Pb(II)와 Cd(II)의 흡착 특성

제조된 메조포러스 실리카와 기존 흡착제인 실리카겔의 흡착 특성을 알아보기 위해 이온 강도를 0.01 M KNO₃로 고정시킨 10⁻⁵ M Pb(II), 10⁻⁵ M Cd(II)의 흡착율을 조사한 결과는 Fig. 9~10과 같다. 중금속의 종분포는 HYDRAQL 모델을 이용하여 나타내었다.

Fig. 5~6의 표면 전위 측정에 의한 메조포러스 실리카의 중금속에 의한 변화된 그래프와 Fig. 7~8에서 나타난 Pb와 Cd의 수중에서의 존재 형태와 유사하게 나타났다.

Fig. 9에서 기존 흡착제인 실리카겔에 의한 Pb(II)의 흡착은 pH 5 부근에서 약 20%의 제거율을 보였고, pH 6 부근에서는 약 60%의 제거율을 보였다. 그리고 pH 8 이상에서 약 80% 이상의 제거율을 보였다.

비표면적이 1000 m²/g 이상인 (a) MCM-48과 (b) MCM-48는 pH 4 부근에서 약 20%의 제거율을 보였고, pH 5 부근에서는 약 80% 이상의 제거율을 보였다. 그리고 pH 6 이상에서는 약 90% 이상의 제거율을 보였다.

(a) MCM-48과 (b) MCM-48는 기존의 흡착제인 실리카겔 보다 더 낮은 pH에서 더 높은 Pb(II) 제거율을 보여줌을 알 수 있다. 비표면적이 기존 흡착제인 실리카겔과 비슷하거나 낮은 (c) MCM-48, (d) MCM-48과 (e) MCM-48의 Pb(II) 제거율은 기존 흡착제인 실리카겔과 비슷하거나 낮은 제거율을 보여 주었다.

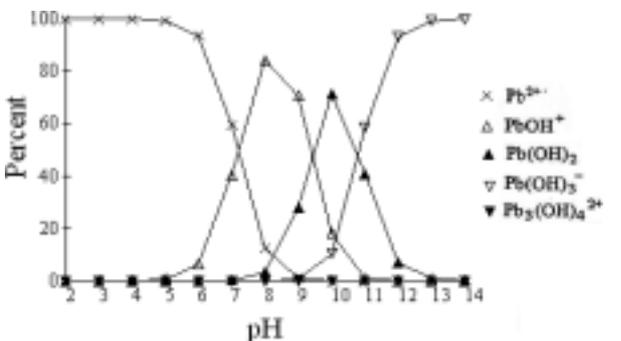


Fig. 7. Species distribution of Lead by HYDRAQL. C_{T,Pb} = 10⁻⁵ M.

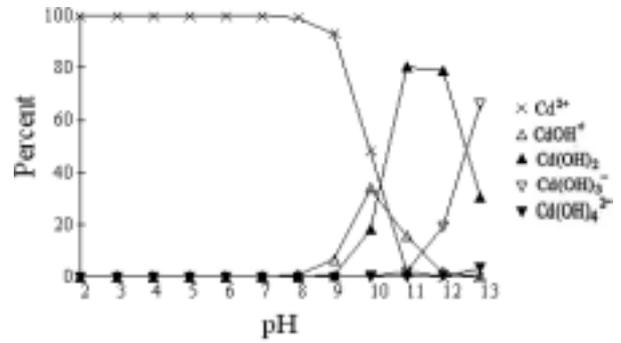


Fig. 8. Species distribution of Lead by HYDRAQL. C_{T,Pb} = 10⁻⁵ M.

Fig. 10에서는 기존의 흡착제인 실리카겔과 제조된 메조포러스 실리카의 Cd(II)에 대한 제거율을 나타내었다. 기존 흡착제인 실리카겔에 의한 Cd(II)의 흡착은 pH 6 부근에서 약 20%의 제거율을 보였고, pH 9 부근에서는 약 60%의 제거율, pH 10 이상에서 약 80% 이상의 제거율을 보였다.

메조포러스 실리카 중 비표면적이 1,000 m²/g 이상인 (a) MCM-48과 (b) MCM-48는 pH 6 부근에서 약 20%의 제

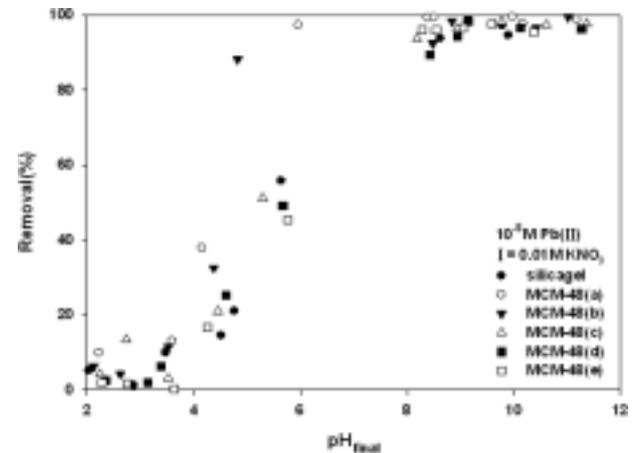


Fig. 9. Adsorption of Pb(II) on mesoporous silica as a function of pH.

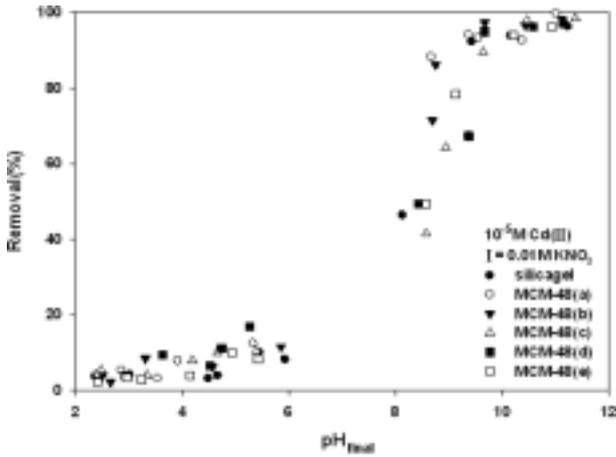


Fig. 10. Adsorption of Cd(II) on mesoporous silica as a function of pH.

거울을 보였고, pH 9부근에서 약 80%의 제거율을 보였다. (a) MCM-48과 (b) MCM-48은 기존의 흡착제인 실리카겔보다 더 낮은 pH에서 더 높은 Cd(II) 제거율을 보여줌을 알 수 있다.

비표면적이 기존 흡착제인 실리카겔과 비슷하거나 낮은 (c) MCM-48, (d) MCM-48과 (e) MCM-48의 Cd 제거율은 기존 흡착제인 실리카겔과 비슷하거나 낮은 제거율을 보여 주었다.

메조포러스 실리카에 의한 중금속 제거는 흡착 반응이 주된 메커니즘으로써 pH가 증가함에 따라 중금속 흡착에 증가함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 계면활성제와 실리카 물비를 조절하여 다양한 메조포러스 실리카를 제조하여 표면 특성과 구조적 성질을 알아보았으며, 메조포러스 실리카의 중금속에 대한 흡착능을 알아보기 위하여 대표 중금속 물질인 Pb(II)와 Cd(II)를 pH 변화에 따른 흡착 특성 실험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 실험을 통하여 계면활성제와 실리카 물비의 조절로 얻어진 메조포러스 실리카의 BET 특성 분석으로 Template와 Silica의 합성 물비의 영향을 알 수 있었다. Template의 양이 많을 경우, micelle rob를 형성하는 농도가 증가하여 상대적으로 Silica의 양이 적어지게 되므로, 수열 합성의 응축 과정에서 Silica의 벽 두께가 얇아지게 되 기계적 강도에 영향을 주어 안정성이 떨어지게 됨을 알 수 있다.

2) 메조포러스 실리카의 X-선 회절 분석을 통해 합성 조건이 잘 부합되는 경우 관찰되는 211, 220 등의 강도는 Ia3d 대칭성으로 분류될 수 있는 MCM-48의 특징적인 피크들을 볼 수 있다. 그러나 합성 조건이 잘 부합되지 않을 경우, XRD 패턴은 먼저, (211) 면에 해당하는 피크의 세기가 약해지고 넓어지며, 잇따르는 (220)의 면에 해당하는

피크의 세기가 약해지거나 소멸됨을 알 수 있었다.

3) SEM 분석을 통하여 기존 메조포러스 실리카 보다 완전한 구형의 균일한 입자 분포를 보여 본 연구에서 제조된 메조포러스 실리카가 흡착제에서 분자체의 역할과 촉매에서 지지체(support)로서의 역할을 수행하기에 상당한 유용성을 가질 수 있음을 알 수 있었다.

4) Zeta potential 측정과 중금속 흡착을 통한 ICP 측정으로 실리카 표면의 pH 변화에 따른 중금속 흡착 특성을 알 수 있었다. 메조포러스 실리카는 환경 오염물질 중 중금속 대표 물질인 Pb와 Cd 이온이 표면에 중화흡착 된 것을 표면 전위의 전하값의 변화를 통해 알 수 있었으며, 흡착 실험을 통해 비표면적이 1,000 m²/g 이상을 가지는 메조포러스 실리카는 기존의 흡착제인 실리카겔보다 낮은 pH에서 높은 흡착량을 보여주었다. 이를 통해 친환경적인 소재로 발전할 가능성을 보였으며, 중금속 외에도 유기화합물의 선택적 흡착의 가능성을 보여주었다.

참고 문헌

1. De Matos, A. T., Fontes, M. P. F., Da Costa, L. M., and Martinez, M. Z., "Mobility of heavy metals as related to soil chemical and mineralogical characteristics of Brazilian soils," *Environ. Pollut.*, **111**, 429(2001).
2. Matheickal, J. T. and Yu, Q., "Biosorption of lead(II) and copper(II) from aqueous solutions by pre-treated biomass of Australian marine algae," *Bioresour. Technol.*, **69**, 223(1999).
3. Arienzo, M., Chiarenzelli, J., and Scudato, R., "Remediation of metal-contaminated aqueous system by electrochemical peroxidation: an experimental investigation," *J. Hazard. Mater.*, **B87**, 187(2001).
4. Kim, J. S., Ph.D. Dissertation, Seoul National Univ., Seoul, Korea(1998).
5. Beck, J. S., Kresge, C. T., Leonowicz, M. E., Roth, W. J., and Vartuli, J. C., "Ordered mesoporous molecular sieves synthesized by a liquid-crystal template mechanism," *J. Am. Chem. SOC.*, **114**, 10834(1992).
6. Tanev, P. T. and Pinnavaia, T. J., "Mesoporous silica Molecular Sieves Prepared by Ionic and Neutral Surfactant Templating: A Comparison of Physical Properties," *Chem. Mater.*, **8**, 2068(1996).
7. Zaho, D., Feng, J., Huo, Q., Melosh, N., Fredrickson, G. H., Chmelka, B. F., and Stucky, G. D., "Triblock Copolymer Syntheses of M-S with Periodic 50 to 300 Angstrom Pores," *Science*, **279**(23), 548(1998).
8. Mercier, L. and Pinnavaia, T. J., "Heavy Metal Ion Adsorbents Formed by the Grafting of a Thiol Functionality M-S Molecular Sieves: Factors Affecting Hg(II) uptake," *Environ. Sci. Technol.*, **32**, 2749(1998).
9. Kresge, C. T., Leonowics, M. E., Roth, Vartuli, J. C.,

- and Beck, J. S., "Ordered mesoporous molecular sieves synthesized by a liquid crystal remplate mechanism," *Nature*, **359**, 710(1992).
10. Beck, J. S., Vartuli, J. C., Roth, W. J., Lenowicz, M. E., Kresge, C. T., Schmitt, K. D., Chu, C. T. W., Olsen, D. H., Sheppard, E. W., McCullen, S. B., Higgins, J. B., and Schlenker, J. L., "A new family of mesoporous molecular sieves prepared with liquid crystal templates," *J. Am. Chem. Soc.*, **114**, 10834(1992).
 11. Brown, J., Menciaer, L., and Pinavaia, T. J., "Selective adsorption of Hg^{2+} by thiol-functionalized nanoporous silica," *Chem. Commun.*, **69**(1999).
 12. Liu, A.M., Hidajat, K., Kawi, S., and Zhao, D. Y., "A new class of hybrid mesoporous materials with functionalized organic monolayers for selective adsorption of heavy metal ions," *Chem. Commun.*, **1145**(2000).