https://doi.org/10.21289/KSIC.2020.23.4.583

황토와 다공성 규조토 필터에 의한 실내 오염 물질의 흡착 연구

The Study for Adsorption of Indoor Pollutants by Ocher and Diatomite Filter

김호건[1], Akhmadalieva Irodakhon[2], 남기우[3*]
Ho-Keun Kim[1], Akhmadalieva Irodakhon[2], Ki-Woo Nam[3*]

〈Abstract〉

Environmental problems have showen over the past decades due to the rapid development of the world economy and the continued growth of the population. Ocher has been widely used for water treatment research, but few studies have been conducted on adsorption of air pollutants using ocher and porous diatomite earth for indoor air purification. In this study, ocher and diatomite earth were sintered with filters to remove indoor air pollutants. The four types of TMA, H_2S, NH_3 and CH_3COOH were used to study the adsorption efficiency of ocher and porous diatomite filters. With the proper use of ocher, diatomite and copper catalysts, indoor air pollutants could be adsorbed. Alkaline substances (TMA and NH_3) and acidic substances (H_2S and CH_3COOH) were able to adsorb at 120 and 90 minutes, respectively.

Keywords : Ocher, Diatomite, Filter, Indoor Air Pollutant, Adsorption

1 부경대학교 기계공학학연융합학과, 대학원생
2 부경대학교 마린디자인융합공학과 대학원생
3* 정회원, 부경대학교 재료공학과, 교수
E-mail: namkw@pknu.ac.kr

1 Department of UR Mechanical Convergence Engineering, Pukyong National University
2 Department of Marine Design Convergence Engineering, Pukyong National University
3* Deptment of Materials Science and Engineering, Pukyong National University

1. 서 론

지난 수십 년 동안 세계 경제의 급속한 발전과 인구의 지속적인 증가로 인하여 환경 문제가 발생하였다. 예를 들어 산업 오수에 의한 수질 오염[1], 산업 폐기물 가스에 의한 대기 오염[2], 토양 오염은 주로 화학 물질 및 중금속의 결과이다[3]. 그럼에도 불구하고, 최근 몇 년 동안, 미립자 문제(PM) 오염[4] 및 실내 대기 오염[5]은 환경 문제에 새로운 변화가 일어나고 있다. 사람들의 건강과 삶의 질에 직접적이고 지속적으로 부정적인 영향을 줄 수 있기 때문이다. 따라서 인체 건강과 환경을 보호하기 위하여 유해한 오염 물질과 실내 독성 가스를 제거하기 위한 많은 기술적 방법이 연구되었다, 예를 들어 금속 추출[6], 이온 교환[7], 흡착 기술[8-11], 막 분리[12], 화학 침전[13] 등이다. 이들 방법 중, 활성탄 흡착은 비 표면적이 크고, 미세 다공성 구조가 많으며 고흡착 능과 효율성으로 널리 사용되는 기술이다. 그러나 활성탄은 일부 열악한 열 안정성, 낮은 변형 유연성 및 비교적 고가의 비용과 같은 몇 가지 단점 때문에 특정 조건에서 적용이 제한적이다. 이에 반해, 다공성 규조토 세라믹은 활성탄에 비하여 높은 열적 및 화학적 안정성, 우수한 기계적 특성, 낮은 열 전도성 및 상대적인 저비용으로, 고온 및 부식성 환경의 응용에 적합하다. 예를 들어, Yan 등[14]은 염료의 흡착을 위하여 서로 다른 소결 온도에서 다공성 규조토 세라믹을 합성한 결과, 규조토 세라믹이 소성 후 우수한 다공성 구조를 유지함과 동시에 우수한 흡착 성능 (최대 제거 효율 95.6 %)을 보여 주었다. Yuan 등[15]은 벤젠의 흡착을 위하여 규산염 -1 나노 입자로 코팅된 다공성 규조토 세라믹을 제조하였다. 나노 복합물은 비 표면적이 122.9 m^2/g이고, 미세 기공 부피가 0.07 cm^3/g로 133.3 mg/g의 우수한 벤젠 흡착 능력을 나타내었다. Ekpunobi 등[16]은 수처리를 위하여 다른 소결 온도에서 규조토, 점토 및 톱밥의 혼합물을 사용하여 새로운 세라믹 필터를 합성하였다. 규조토 세라믹 필터는 850℃에서 소결된 물리적 특성이 가장 우수하였으며, 수처리 응용이 가능하였다. 규조토 분말을 사용하여 수용액에서 오염 물질을 제거 방법 연구[17,18]가 실시되고 있다. 한편 황토의 입자크기는 0.02~0.05mm이며, 조립질과 중립질은 무게비로 50% 정도 포함되어 있다. 0.005mm 이하의 입자들은 5~10%를 구성한다. 황토의 공극률은 생산 지역에 따라서 다르며, 50~55%이지만, 황토 내에 점토가 풍부하면 공극률은 34~45%로 감소한다. 사질 황토의 공극률은 약 60%이고 밀도는 1.5g/㎤이며, 비중은 평균 2.7이다. Kate 등[19]은 광산 수처리에 황토를 사용하였다. Owen 등[20]은 낙농장의 오수에서 인을 분리하기 위하여 황토를 사용한 연구를 수행하였다. Lee 등[21]은 소성처리에 의한 황토의 물성특성 변화 및 용존 중금속 제거 능력을 연구하였다. Choi와 Kim 등[22,23]은 바다의 적조 생물을 제거에 황토의 적용성을 평가하였다. 이와 같이 황토는 수처리 연구에 많이 응용되었지만, 실내 공기 정화를 위하여 황토 및 다공성 규조토를 사용한 대기 오염 물질의 흡착에 관한 연구는 많지 않다. 다공질 규조토 세라믹을 사용한 실내 공기 오염 물질 제거에 관한 연구[24,25]가 있으나, 실내 공기 정화를 연구는 많지 않다.

따라서 본 연구에서 황토 및 규조토는 실내 공기 오염 물질 제거를 위하여 필터로 성형하였다. 실내 공기 오염 물질은 TMA, H_2S, NH_3 및 CH_3COOH의 4가지를 사용하여, 황토 및 다공성 규조토 필터의 흡착 성능을 평가하였다.

2. 재료 및 실험 방법

황토는 국내산의 아트용이고, 규조토는 Linjiang Imerys Diatomite Company Co., Ltd. China에서 제조한 것을 사용하였다. 황토와 다공성 규조토 필터의 제조 공정은 Fig. 1에 나타낸다.

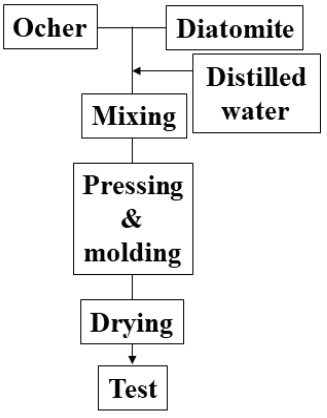

Fig. 1 Preparation process of ocher and diatomite filter

황토와 규조토 세라믹 필터는 황토 또는 황토와 규조토 혼합물에 증류수를 첨가하여, 10분 동안 교반하고, 60℃에서 1.5시간 동안 수분을 증발시켰다. 적당한 수분을 함유한 혼합물은 정사각형 몰드에 주입하고 0.2 MPa 압력으로 35 mm x 35 mm x 3 mm 크기로 성형하였다. 성형 필터는 대기 중, 그늘에서 자연 건조하였다.

제조된 필터는 효능을 향상시키기 위하여 촉매 용액($CuCl_2$)에 침지하였다. 필터의 침지 공정을 Fig. 2에 나타내었다. 촉매 용액은 20 wt.% $CuCl_2$에 80 wt.% 증류수를 혼합하여 제조하였다. 필터는 2분 동안 촉매 용액에 침지하고, 24시간 동안 공기 중에서 자연 건조시켰다. 필터는 90℃에서 20분 오븐 건조시켜[26], 흡착실험에 사용하였다.

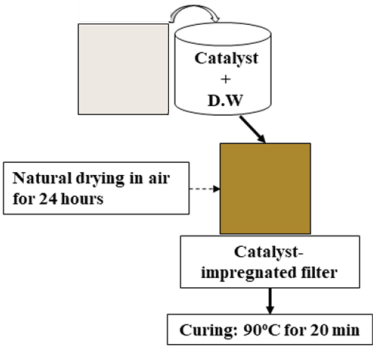

Fig. 2 Manufacturing process of catalyst-impregnated ocher-diatomite filter

실내 공기 오염 물질의 흡착을 위한 실험 장치는 Fig. 3(a)와 같이 부피 100L인 밀폐된 플라스틱 챔버로 만들었다. 필터는 실내 공기 오염 물질의 빠른 흐름을 위하여 팬에 부착하였다. 필터의 흡착은 습도 60%와 20℃의 최적 조건[23]에서 실시하였다. 흡착 실험을 위한 초기 농도는 200 ppm이며, TMA 30% 용액(172.5 μL), NH_3 28.0 ~30.0% 용액(48.8 μL), H_2S 4.02 %(0.5L) 및 CH_3COOH 99.7%(50.1 μL)를 각각 핫 패드에 놓고 15분 동안 가열하였으며, 팬의 속도는 4.8 m/s이다. 실내 공기 오염 물질의 농도는 Fig. 3(b)와 같은 검출기를 사용하여 10분, 20분, 30분, 60분 및 120분에 측정하였다. 모든 흡착 시험은 3회 수행하고, 평균값을 사용하였다.

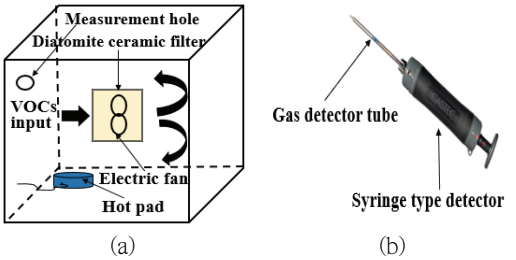

Fig. 3 (a) the experimental setup of adsorption of toxic gases, and (b) syringe type detector and gas detector tube

3. 결과 및 고찰

Table 1은 황토와 규조토의 화학성분을 나타낸다. 2종류는 SiO_2가 가장 많은 양을 나타내었다. 특히, 황토는 Al_2O_3와 CaO가 상당히 많은 양을 나타내었고, Fe_2O_3와 MgO도 함유하였다. SiO_2 함량이 85%를 초과하는 규조토는 고순도 규조토로 간주되는데, 본 연구에 사용된 구조토는 셀 라이트 필터를 개발하는 데 이상적이다. 그 외 2종류는 다양한 불순물 (Na_2O, K_2O, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO, FeO, MnO 및 TiO_2)등 이다.

Table 1. Chemical composition of ocher and diatomite (wt.%)

Compound	Ocher (Domestic)	Diatomite (Linjiang Imerys)
SiO_2	58.0	92.43
Na_2O+K_2O	-	3.00
Al_2O_3	10.0	1.63
Fe_2O_3	5.0	1.50
FeO	1.1	-
SO_3	-	0.36
CaO	14.0	0.30
MgO	4.0	0.21
TiO_2	0.5	0.10
Cl	-	0.47
MnO	0.5	-
Others	6.9	-

Fig. 4(a)(b)는 실험에 사용한 필터를 나타낸다. (a)는 황토-규조토 필터를 나타내고, (b)는 구리 촉매 함침 황토-규조토 필터를 나타낸다. (a)는 황토-규조토를 사용하였으므로 밝은색을 나타내었지만, 구리 촉매 함침 황토-규조토 필터는 구리 성분으로 인하여 약간 푸른색을 나타내었다.

(a) (b)

Fig. 4 (a) Ocher-diatomite filter, (b) $CuCl_2$-impregnated ocher-diatomite filter

Fig. 5(a)(b)는 각각 황토-규조토 필터 및 구리 촉매 함침 황토-규조토 필터의 원소를 EDS 분석한 것이다. Table 2와 Table 3은 각각 원소의 무게비와 원자비를 나타내었다. Fig. 5(a)는 Na, Mg, Al, Si, Cl, K, Ti 및 Fe의 원소가 EDS 피크로 확인되었다. Fig. 5(b)는 Mg, Al, Si, Cl, K, Ti, Fe 및 Cu의 원소가 EDS 피크로 확인되었다. Fig. 5(a)(b)는 황토 및 규조토의 성분이 검출되었고, 구리 함침한 (b)는 Cu가 검출되었다.

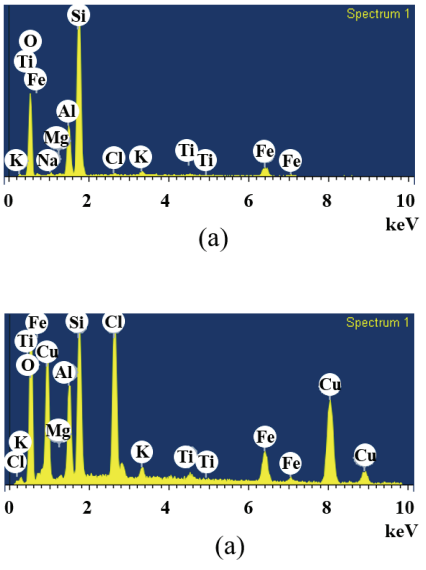

Fig. 5 EDS analysis of (a) ocher-diatomite filter and (b) $CuCl_2$-impregnated ocher-diatomite filter

Table 2. Elements of ocher-diatomite filter

Element	Weight%	Atomic%
O K	50.03	65.40
Na K	0.65	0.59
Mg K	0.32	0.27
Al K	7.95	6.16
Si K	32.16	23.95
Cl K	0.44	0.26
K K	0.97	0.52
Ti K	0.65	0.28
Fe K	6.83	2.56
Totals	100.00	

Table 3. Elements of $CuCl_2$-impregnated ocher-diatomite filter

Element	Weight%	Atomic%
O K	31.91	55.69
Mg K	0.32	0.37
Al K	6.54	6.77
Si K	10.26	10.20
Cl K	11.38	8.96
K K	0.74	0.53
Ti K	0.48	0.28
Fe K	5.59	2.79
Cu K	32.79	14.41
Totals	100.00	

Fig. 6은 성형 압력 0.2 MPa에서 제작한 필터의 TMA의 흡착 효율을 나타낸다. 그림에서 O (ocher)는 황토를 나타내고, D(diatomite)는 구조토를 나타낸다. 황토 필터(□)는 120분에 10% 흡착하여, TMA 흡착 효율은 매우 나쁘게 나타났다. 이와 같은 나쁜 흡착 효율을 개선하기 위하여 다공성 규조토를 혼합한 필터에 구리 촉매를 함침하여 평가하였다. 황토와 규조토 1:1의 구리 촉매 함침 황토-규조토 필터(○)는 60분에 40%, 120분에 45% 흡착 효율을 나타내었다. 그러나 황토와 규조토 1:4 필터에 구리 촉매 함침 황토-규조토 필터(△)는 30분에 77.5%까지 아주 빠른 흡착 효율을 나타내었으며, 120분에 97.5%의 흡착 효율을 나타내었다. 황토는 TMA의 흡착 필터로 적당하지 못하며, 다공성이 많은 규조토를 혼합한 구리 촉매 함침 황토-규조토 필터는 TMA 흡착 필터로 적용 가능한 것으로 판단된다.

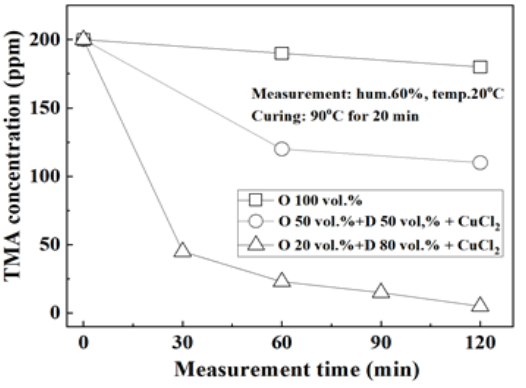

Fig. 6 Adsorption of TMA by $CuCl_2$-impregnated ocher-diatomite filter

Fig. 7은 NH_3의 흡착 효율을 나타낸다. 황토 필터(□)는 30분에 87.5%, 120분에 99.5% 흡착 효율을 나타내어, 거의 완전하게 제거할 수 있었

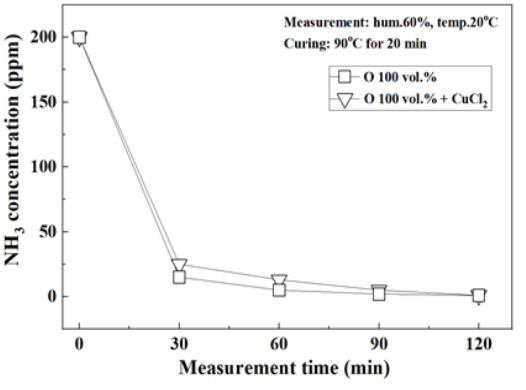

Fig. 7 Adsorption of NH_3 by $CuCl_2$-impregnated ohcre-diatomite filter

다. 구리 촉매에 의한 효과를 평가하기 위한 구리 촉매 함침 황토 필터(▽)는 30분에 92.5%, 120분에 99.5% 흡착하였다. 구리 촉매 함침 황토 필터가 황토 필터보다는 우수한 흡착 효율을 나타내었다. 따라서 황토는 NH_3의 흡착 필터로 우수한 재료라 판단된다.

Fig. 8은 H_2S의 흡착 효율을 나타낸다. 황토 필터(□)는 30분에 50%, 60분에 75%, 120분에 87.5% 흡착 효율을 나타내었다. 구리 촉매 함침 황토 필터(▽)는 30분에 60%, 60분에 90%, 90분에 100% 흡착 효율을 나타내었다. 한편 황토와 규조토 1:1에 구리 촉매 함침 황토-규조토 필터(○)는 30분에 60%, 60분에 87.5%, 90분에 98.5% 흡착 효율을 나타내었다. 구리 촉매 함침 황토-규조토 필터는 H_2S를 완전하게 흡착할 수 있는 것으로 판단된다.

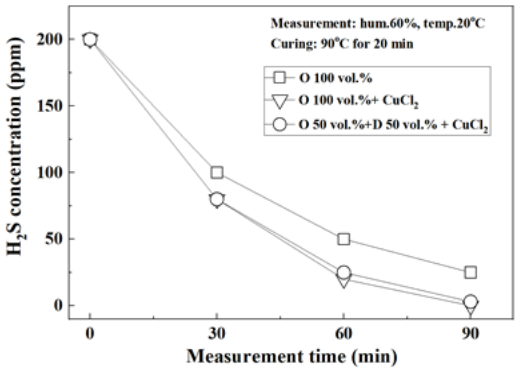

Fig. 8 Adsorption of H_2S by $CuCl_2$-impregnated ocher-diatomite filter

Fig. 9는 CH_3COOH의 흡착 효율을 나타낸다. 황토 필터(□)는 30분에 95%, 60분에 98%, 90분에 100% 흡착 효율을 나타내었다. 구리 촉매 함침 황토 필터(▽)는 30분에 96%, 60분에 98%, 90분에 99.5% 흡착 효율을 나타내었다. 한편 황토와 규조토 3:1에 구리 촉매 함침 황토-규조토 필터(△)는 30분에 95%, 60분에 98.5%, 90분에 99.5% 흡착 효율을 나타내었다. CH_3COOH는 황토 필터로 완전하게 흡착 가능한 것으로 판단된다.

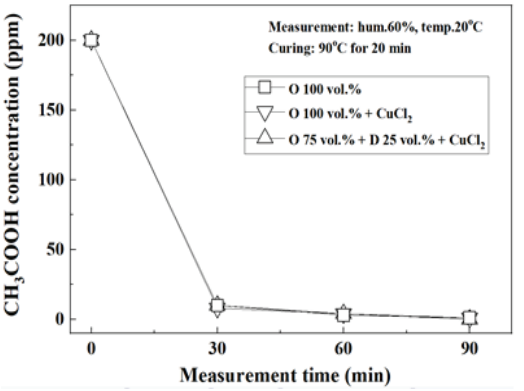

Fig. 9 Adsorption of CH_3COOH by $CuCl_2$-impregnated ocher-diatomite filter

상기 결과에서 황토 필터는 TMA를 흡착할 수 없으나, NH_3, H_2S 및 CH_3COOH는 완전하게 흡착 가능하였다. 그러나 다공성 규조토를 혼합하거나 구리 촉매($CuCl_2$) 함침한 필터는 4종류의 실내 공기 오염 물질을 완전하게 흡착할 수 있었다. 또한, 알칼리성인 TMA와 NH_3는 120분에 완전하게 흡착할 수 있으나, 산성인 H_2S와 CH_3COOH는 90분에 흡착할 수 있었다. 이와 같이 필터 재료에 따라서 실내 공기 오염 물질의 흡착 효율이 다른 것을 알 수 있다. 남 등[27]은 구리 촉매를 가지는 왕겨 활성탄 필터를 사용하여, 400ppm의 TMA와 H_2S의 흡착 효율을 평가하였다. 알칼리성인 TMA는 30분, 산성인 H_2S는 15분에 100% 흡착 효율을 나타내었다. 한편 왕 등[28]은 구리 촉매를 가지는 코코아 활성탄 필터를 사용하여, 400ppm의 TMA와 H_2S의 흡착 효율을 평가하였다. 알칼리성인 TMA는 30분, 산성인 H_2S는 15분에 100% 흡착 효율을 나타내었다.

흡착 효율은 실내 오염 물질의 종류에 따라서 다르다는 것을 알 수 있었으나, 황토 및 규조토 필터에 구리 촉매를 사용함으로써 실내 공기 오염 물질의 흡착 효율을 높일 수 있다는 것을 알았다. 전 세계는 온실가스 감축방안으로 CO2 포집・저장이 큰 주목을 받고 있다. 따라서 규조토를 사용한 연구를 실시할 필요가 있다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 실내 오염 물질을 제거하기 위하여, 황토 및 규조토를 사용하여 필터를 제조하였다. 그리고 구리 촉매는 필터 흡착 성능을 향상을 위하여 사용하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) 황토 필터는 TMA를 120분에 10% 흡착하였으나, 구리 촉매 함침 황토-규조토 필터는 TMA를 120분에 97.5% 흡착하였다.
2) 황토 필터는 NH_3를 120분에 99.5%, CH_3COOH를 90분에 100% 흡착하였다.
3) 황토 필터는 H_2S를 90분에 87.5% 흡착 효율을 나타내었으나, 구리 촉매 함침 황토 필터는 90분에 100% 흡착 효율을 나타내었다. 구리 촉매 함침 황토-규조토 필터는 90분에 98.5% 흡착 효율을 나타내었다.
4) 황토, 구조토 및 구리 촉매의 적절한 사용으로 실내 오염 물질을 흡착할 수 있었으며, 알칼리성 물질(TMA와 NH_3)은 120분, 산성 물질(H_2S와 CH_3COOH)는 90분에 흡착할 수 있었다.
5) 본 연구에서 얻어진 결과는 집과 건물을 새로 지을 때 사용한 건축자재나 벽지 등에서 나온 유해물질로 인해 두통・피로・호흡 곤란・천식・비염・피부염 등이 유발되는 새집 증후군 해소에 응용될 수 있을 것이다.

참고문헌

[1] D. Han, M. J. Currell and G. Cao, “Deep challenges for China’s war on water pollution”, Environmental Pollution, Vol. 218, pp. 1222-1233, (2016).
[2] A. Austruy, L. Yung, J. P. Ambrosi, O. Girardclos, C. Keller, B. Angeletti, J. Sron, P. Chamaret and M. Chalot, “Evaluation of historical atmospheric pollution in an industrial area by dendrochemical approaches”, Chemosphere, Vol. 220, pp. 116-126, (2019).
[3] D. Papaioannou, I. K. Kalavrouziotis, P. H. Koukoulakis, F. Papadopoulos and P. Psoma, “Interrelationships of metal transfer factor under wastewater reuse and soil pollution”, Journal of Environmental Management, Vol. 216, pp. 328- 336, (2018).
[4] X. Zhu, H. Qiu, L. Wang, Z. Duan, H. Yu, R. Deng, Y. Zhang and L. Zhou, “Risks of hospital admissions from a spectrum of causes associated with particulate matter pollution:, Science of the Total Environment, Vol. 656, pp. 90-100, (2019).
[5] P. Amoatey, H. Omidvarborna, M. S. Baawain and A. Al-Mamun, “Indoor air pollution and exposure assessment of the gulf cooperation council countries: A critical review”, Environment International, Vol. 121, pp. 491-506, (2018).
[6] A. H. M. Veeken and H. V. M. Hamelers, “Removal of heavy metals from sewage sludge by extraction with organic acids”, Water Science Technology, Vol. 40, pp. 129-136, (1999).
[7] A. Dabrowski, Z. Hubicki, P. Podkoscielny and E. Robens, “Selective removal of the heavy metal ions from waters and industrial wastewaters by ion-exchange method”, Chemosphere, Vol. 56, pp. 91-106, (2004).
[8] X. Zhang, B. Gao, A. E. Creamer and Y. Li, “Adsorption of VOCs onto engineered carbon

materials: a review", Journal of Hazardous Materials. Vol. 338, pp. 102-123, (2017).
[9] S. H. Ko, J. W. Choi and K. S. Hyun, "Characteristics of Coagulation-Flocculation-Sedimentation Process with BAF Process on Drinking Water Treatment using Nakdong River Water", J. Korean Society of Industrial Application, Vol. 3, pp. 237-243, (2000).
[10] K. H. Park, J. K. Suh, "Polluted Water Treatment of Dam and Reservoir using Natural Korean Zeolite", J. Korean Society of Industrial Application, Vol. 8, pp. 113-120, (2005).
[11] S. A. Kwon and S. J. Lee, "Experimental study and Verification of Fine Particles and Gaseous Pollutants Removal on Water-cyclone System", J. Korean Society of Industrial Application, Vol. 17, pp. 15-19, (2014).
[12] M. Tawalbeh, A. A. Mojjly, A. Al-Othman and N. Hilal, "Membrane separation as a pre-treatment process for oily saline water", Desalination, Vol. 447, pp. 182-202, (2018).
[13] Q. Chen, Y. Yao, X. Li, J. Lu, J. Zhou and Z. Huang, "Comparison of heavy metal removals from aqueous solutions by chemical precipitation and characteristics of precipitates", Journal of Water Process Engineering, Vol. 26, pp. 289-300, (2018).
[14] S. Yan, W. Huo, J. Yang, X. Zhang, Q. Wang, L. Wang, Y. Pan and Y. Huang, "Green synthesis and influence of calcined temperature on the formation of novel porous diatomite microspheres for efficient adsorption of dyes", Powder Technology, Vol. 329, pp. 260-269, (2018).
[15] W. Yuan, P. Yuan, D. Liu, W. Yu, L. Deng and F. Chen, "Novel hierarchically porous nanocomposites of diatomite-based ceramic monoliths coated with silicalite-1 nanoparticles for benzene adsorption", Microporous and Mesoporous Materials, Vol. 206, pp. 184-193, (2015).
[16] U. E. Ekpunobi, S. U. Agbo and V. I. E. Ajiwe, "Evaluation of the mixtures of clay, diatomite, and sawdust for production of ceramic pot filters for water treatment interventions using locally sourced materials", Journal of Environmental Chemical Engineering, Vol. 7, e102791, (2019).
[17] A. Sari, D. Citak and M. Tuzen, "Equilibrium, thermodynamic and kinetic studies on adsorption of Sb(III) from aqueous solution using low-cost natural diatomite", Chemical Engineering Journal, Vol. 162, pp. 521-527, (2010).
[18] W. Wang, "A Hybrid Treatment System Combining Enforced Diatomite Process Followed by Biological Aerated Filters for Wastewater Treatment", Procedia Environmental Sciences, Vol. 12, pp. 79-86, (2012).
[19] H. Kate, L. Y. Paul, A. S. Keith, G. Stephanie, Q. Paul and D.Karen, "Novel use of ocher from mine water treatment plants to reduce point and diffuse phosphorus pollution ", Land Contamination & Reclamation, Vol. 11, pp. 145-152, (2003)
[20] O. Fenton, M. G. Healy and M. Rodgers, "Use of ocher from an Abandoned Metal Mine in the South East of Ireland for Phosphorus Sequestration from Dairy Dirty Water", Journal of Environmental Quality, Vol. 38, pp. 1120-1125, (2009).
[21] J. W. Lee, S. H. Kim and G. S. Hwang, "Changes in Physical Properties and Its Metal Removal Efficiency for The Yellow Soils by Calcination Process", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 18, pp. 584-591, (2017).
[22] H. G. Choi, "Removal Efficiency of Cochiodinium polykrikoides by Yellow Loess", Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 31, pp. 109-113, (1998).
[23] S. J. Kim, "Removal of Red Tide Organisms 2. Flocculation of Red Tide Organisms by Using Loess", Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 33, pp. 455-462, (2000).
[24] R. Gao, Q. Sun, Z. Fang, G. Li, M. Jia and

X. Hou, “Preparation of nano-TiO_2/diatomite-based porous ceramics and their photocatalytic kinetics for formaldehyde degradation”, International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, Vol. 25, pp. 73-79, (2018).

[25] S. J. Park, S. I. Nam and E. S. Chio, “Removal of odor emitted from composting facilities using a porous ceramic biofilter”, Water Science and Technology, Vol 44, pp. 301-308, (2001).

[26] S. Wang, H. Nam, H. Kim and K. Nam, “Cocoa activated carbon to remove VOCs (TMA, H_2S)”, 13th International Symposium on the Genetics of Industrial Microorganisms (GIM2016 WUHAN), e277, (2016).

[27] H. Nam, S. Wang and H. R. Jeong, “TMA and H_2S gas removals using metal loaded on rice husk activated carbon for indoor air purification,” Fuel, Vol. 213, pp. 186-194, (2018).

[28] S. Wang, H. Nam and H. Nam, “Utilization of cocoa activated carbon for trimethylamine and hydrogen sulfide gas removals in a confined space and its techno-economic analysis and life -cycle analysis”, Environmental Progress & Sustainable Energy, Vol. 38, e13241, (2019).

(접수: 2020.05.13. 수정: 2020.06.17. 게재확정: 2020.06.29.)