



활성탄의 세공이 자연유기물질의 흡착에 미치는 영향

Effect of pore characteristics of activated carbon on adsorption of natural organic matter

박정순¹ · 홍성호^{2*}

Jung-Sun Pak¹ · Seongho Hong^{2*}

1 주식회사수도권환경, 2 숭실대학교 화학공학과

(2011년 3월 24일 접수 ; 2011년 4월 11일 수정 ; 2011년 4월 13일 채택)

Abstract

It is complicate problem to optimize removing natural organic matter (NOM) by activated carbon in drinking water treatment because the activated carbon has heterogeneous surface area and pore structure. Seven different coals based activated carbons which have different pore structures were used in the study. Sand filtered effluents which normally used as GAC adsorber influent were used. The molecular weight distribution showed that most of the NOM was bigger than 10,000Da. In this study, systematical approaches such as characteristics of surface area and pore volume were evaluated on NOM adsorption. Especially, the adsorption capacities for NOM were evaluated by effect of micro-pores and meso-pores in surface area and pore structure. The results show that the higher ratio of meso-pore compare to the micro-pore has not only the better adsorption capacities for NOM but also the higher strongly-adsorbable fraction. Therefore, the overall adsorption capacity is increased with higher meso-pore ratio with existing of reasonable micro-pore surface area and volume.

Key words : Adsorption, Isotherm, M.W. Fraction, GAC, NOM

주제어 : 흡착, 등온식, 분자분획, 활성탄, 자연유기물질

1. 서론

국민들의 생활수준과 지적의식의 향상에 따라 먹는 물에 대한 관심은 증가하고 있으며 이에 따라 정수장에서 생산되는 수질이 어떠한지에 대한 관심도 한 층 높아지고 있다. 이러한 물에 대한 관심의 증대는 수질 향상에 긍정적으로 작용하고 있다. 중앙 정부, 광역상수도과 지방상수도는 이러한 국민의 요구를 만족시키기 위하여 수질기준을 강화하고 보다 깨끗한 물을 생산하기 위하여 새로운 공정을 도입

하는 등 다양한 노력을 하고 있다.

보다 깨끗한 물을 생산하기 위하여 기존정수처리 공정에서는 제거에 한계를 보이는 유기물질을 제거하기 위하여 오존, 막 그리고 활성탄 등 다양한 고도처리공정을 도입하고 있다. 우리나라의 경우에는 고도처리시설의 대부분이 오존과 활성탄을 연계한 시설로 구성되어 있다. 오존과 활성탄을 이용한 고도처리시설의 경우에 제거 대상물질이 일반적으로 소독부산물인 전구물질인 자연유기물질(Natural organic matter: NOM)과 이취미를 유발하는 geosmin과

* Corresponding author Tel:+82-2-820-0628, Fax:+82-2-812-5378, E-mail: shong@ssu.ac.kr(Hong, S.)

2-MIB이다. 현재 국내에서 오존과 활성탄을 연계하는 공정에서 오존의 역할은 유기물질의 산화보다는 미량의 오존 주입에 따른 고분자 형태의 자연유기물질을 상대적으로 짧은 분자로 만들어 미생물이 보다 쉽게 분해하게 하는데 주목적이 있다.

NOM은 수중에 존재하여 색도를 유발하거나 염소부산물의 전구물질로 염소와 반응하여 소독부산물을 형성하고 미생물에 의해 분해 가능한 부분은 관망계통의 미생물 재성장 의 원인물질이 되기도 한다. 또한 활성탄 흡착에서 이취미 유발물질이나 제초제 종류인 Atrazine 등과 같은 미량유기 물질과는 경쟁적인 흡착관계에 있다고 보고되어 있다 (Newcombe 등, 1997) (Li 등, 2003).

활성탄의 경우 초기에는 흡착이 유기물질을 제거하는 가장 중요한 기작으로 작용하다가 시간이 지남에 따라 미생물이 서식할 수 있는 site를 제공하여 생물학적 처리를 보조하는 형태로 변하게 된다. 하지만 그 단계에서도 흡착이 일어나고 있어 흡착과 생물학적 분해가 공존하고 있다.

활성탄은 나무, 아자껍질, 석탄 등을 원료로 하여 탄화공정과 활성화 공정을 거쳐서 다공성 물질로 되는데 원료에 따라 또는 활성화 방법에 따라 다양한 공극의 형태를 가진다. 활성탄을 이용한 흡착은 유기물질을 제거하는 최적기술로 알려져 있으며 활성탄을 이용하여 자연유기물질 및 미량유기물질 제거에 관한 연구 또한 많이 보고되어 있다. Moore 등은 신탄과 재생탄에서 재생될수록 mesopore와 macropore의 비율이 커짐에 따라 NOM 제거효율이 향상되었다고 보고하였으며(Moore 등, 2001), Pelekani 등은 공극분포가 넓게 발달하면 NOM 흡착에서 micropore의 pore blockage 현상을 줄일 수 있다고 보고 하였고 (Pelekani 등, 1999), Karanfil 등은 공극범위가 20~100 Å에서 용존유기물질(dissolved organic matter: DOM) 제거를 최대화 할 수 있다고 보고하였다(Karanfil 등, 1999). 활성탄의 세공크기 특성에 따라서 자연유기물질의 제거효율은 달라질 수 있으며, 자연유기물질의 분자량 분포에 따라 활성탄에 의하여 제거되는 특징이 다르다(Hong 등, 1997). 따라서 활성탄의 세공 특성과 수중에 존재하는

자연유기물질간의 상관관계를 보다 정확하게 이해한다면 수중에 존재하는 자연유기물질의 분자량 분포의 특성에 따라 흡착을 최적화 할 수 있는 활성탄을 선택 할 수 있을 것으로 생각한다.

따라서 본 연구의 목적은 자연유기물질 중에 거대 분자량이 많은 국내 원수를 사용하여 활성탄의 비표면적 그리고 세공의 특성이 자연유기물질의 흡착에 미치는 영향을 평가하는 것이다. 이를 위하여 여러 종류의 활성탄을 모래여과수를 이용하여 평가하였다. 활성탄의 특성이 NOM의 흡착과 어떠한 상관관계를 가지고 있는지는 흡착등온식을 이용하여 고찰하였다. 신탄과 재생탄의 흡착능을 비교하여 활성탄이 파괴됨에 따라 활성탄에 따라 비표면적과 세공이 어떻게 변하는지에 대하여 고찰하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 원수의 특성

실험에 사용한 원수는 S정수장의 모래여과수를 채수하여 사용하였으며, 원수는 2회에 걸쳐서 채수하였으며 특성은 Table 1에 정리하였다.

2.2 활성탄

본 실험에서는 총 7종류의 다른 활성탄이 사용되었다. 활성탄의 재질은 석탄계 활성탄으로 경도 등은 흡착에 크게 영향을 미치지 않아 언급하지 않았으며, 가장 중요한 비표면적과 세공 부피는 직접 측정하였다. 파괴탄은 NOM을 흡착시켜서 사용하였으며 활성탄에 따라 약간의 차이는 있으나 약 60에서 70%의 파괴에 도달하였을 때의 상층부에 있는 활성탄으로 정의하였다. 파괴탄의 경우에는 시료를 채취하여 정량 시에 문제가 없게 하기 위하여 항량이 될 때까지 90°C에서 건조한 후에 사용하였다.

2.3 분자량 분획

원수의 분자량 분포를 평가하기 위하여 Stirred ultrafiltration cell (Amicon Model 8400)을 사용하였고,

Table 1. Characteristics of source water

Properties	Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)	pH	Turbidity (NTU)	DOC (mg/L)
Sand filtered water 1st	46	7.55	0.19	1.74
Sand filtered water 2nd	39	7.26	0.18	1.85

입자성 물질에 의한 Membrane의 fouling을 최소화하기 위하여 glass fiber filter로 시료를 전처리 하였다. 분획을 위하여 사용된 Membrane은 Millipore(U.S.)사의 PLGC06210 (10,000 molecular weight cut-off ; MWCO)와 PLAC 06210 (1,000 MWCO)으로 분자크기 10,000Da 이상 물질과 1,000Da 이하 물질로 분획하였으며, 중간크기물질은 분획 후 물질수지 계산에 의하여 산출하였다.

2.4 등온흡착 실험

본 실험에 이용된 등온흡착실험은 “bottle point isotherms”을 사용하였으며 이에 대한 자세한 실험 방법은 홍 등이 발표한 논문을 참고하였다.(홍 등, 2007)

2.5 분석기기

탁도는 Model 2100 turbidimeter(HACH)를 사용하였으며 DOC는 Combustion 방식의 Analytik Jena multi N/C 3000(Analytik jena, Germany)을 사용하였고 NPOC(Non-purfeable organic carbon)방법의 NDIR(Non-dispersive infrared detector)로 분석하였다. 알칼리도는 공정시험법에 따라 분석하였다.

2.6 BET를 이용한 비표면적 분석

신탄과 과과탄의 비표면적과 공극분포를 평가하기 위하여 ASAP 2010(Micromeritics, USA)를 사용하였다. 샘플 튜브는 활성탄을 넣기 전 상온에서 CP225D (sartorius AG, Germany)로 질량을 측정하였다. 측정할 활성탄 150~155 mg을 샘플 튜브에 넣고 363K까지 서서히 가열하면서 10 mmHg의 진공을 유지하며 전처리를 실행하였다. 전처리가 끝난 활성탄은 실온에 방치하여 냉각시킨 후 질량을 측정하였다. 앞서 측정된 전처리 전과 후의 질량으로 활성탄의 질량을 최종 확정하였다. 질소 흡착시 측정되는 활성탄은 액체질소에 담긴 상태로 77K를 유지하며, 질소가스 압력을 10 mmHg에서 750 mmHg까지 단계적으로 도입하여 평형압력에 대한 평형 흡착량을 측정하였으며, 탈착 시에는

역순으로 진행 되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 원수 분자량분포

분자량을 1,000Da 이하와 10,000Da 이상으로 분획한 이유는 1,000과 10,000Da 사이의 물질을 보다 세분화하여 분리하는 경우 정량을 하는데 정확성이 떨어지고, 또한 국내 원수의 특성상 대부분의 자연유기물질은 10,000Da 보다 크거나 1,000Da보다 작은 것으로 나타났기 때문이다(김성진 등, 2005). Table 2에 원수를 분획한 결과를 %로 나타내었다. 2회에 걸쳐 채수한 시료의 분자량 차이를 알아보기 위하여 분획한 결과 1차와 2차에서 매우 유사한 결과를 나타내어 채수시기에 따른 차이는 크지 않은 것으로 사료된다. 분획한 결과에 따르면 10,000Da보다 큰 물질이 약 64%를 차지하고 1,000Da 이하와 중간크기의 물질은 약 17~19%내외를 나타내었다. 미국의 오하이오주 쉰시내티 정수장 원수의 경우에는 10,000Da보다 큰 물질의 비율이 25%로 본 실험에 사용된 원수와는 상이하게 다양한 분자량이 분포되어 있는 것으로 보고되어 있다(홍 등 1997). 이는 원수에 따라 다양한 분자량 분포를 보임을 알 수 있다.

3.2 BET 측정

본 실험에 사용된 총 7종류의 활성탄에 대한 BET 측정 결과를 신탄과 과과탄을 구분하여 Table 3과 Table 4 그리고 Fig. 1과 2에 나타냈다. 활성탄의 공극 분포와 세공을 2nm보다 작은 미세세공과 2nm보다 큰 중간세공으로 구분하였다. 세공의 크기는 1000nm까지 측정이 가능하나 2nm를 기준으로 한 이유는 국내 원수의 특성이 1,000Da보다 작은 물질과 10,000Da보다 큰 물질이 많아 이에 대한 영향을 보기 위해서이다. 신탄의 경우 비표면적에서 중간세공의 비율은 활성탄에 따라 차이는 있으나 3에서 10%를 차지하는 것으로 나타났다. 하지만 세공 용적에서 중간세공의 비율은 7에서 32%를 나타내어 비표면적 보다는 큰 차이를 나타냈다. 과과된 활성탄에서는 비표면적 중에서 중간세공

Table 2. Summary of fractionation for sand filtered waters

	< 1,000 Da(%)	1,000~10,000 Da(%)	>10,000 Da(%)
1st Fractionation	18.3	17.0	64.7
2nd Fractionation	18.2	18.2	63.6
Average	18.3	17.6	64.2

Table 3. Comparison of surface area and pore volume for virgin carbons

	Surface area (m ² /g)			Pore volume (cm ³ /g)		
	Total	Micro (d < 2 nm)	Meso (d > 2 nm)	Total	Micro (d < 2 nm)	Meso (d > 2 nm)
A	980	953	26	0.426	0.395	0.030
B	833	779	55	0.414	0.312	0.102
C	800	739	61	0.406	0.295	0.111
D	1029	967	63	0.518	0.424	0.094
E	991	889	103	0.558	0.379	0.179
F	1118	1084	33	0.500	0.467	0.033
G	985	924	61	0.466	0.380	0.085

Table 4. Comparison of surface area and pore volume for used carbons

	Surface area (m ² /g)			Pore volume (cm ³ /g)		
	Total	Micro (d < 2nm)	Meso (d > 2nm)	Total	Micro (d < 2 nm)	Meso (d > 2 nm)
A	827	799	28	0.369	0.336	0.033
B	524	462	62	0.299	0.191	0.108
C	516	457	60	0.291	0.185	0.106
D	759	697	62	0.403	0.314	0.089
E	586	504	82	0.367	0.221	0.146
F	936	905	31	0.422	0.392	0.030
G	795	744	51	0.373	0.309	0.064

이 차지하는 비율은 3에서 14%로 신탄과 비교하여 약간 증가하는 경향을 나타냈다. 세공 용적중에서 중간세공이 차지하는 비율은 7에서 40%로 신탄과 비교하여 약간 증가하는 경향을 나타냈다. 활성탄에 따라 차이를 나타내었지만 활성탄 E가 비표면적은 4% 그리고 세공용적은 8%가 증가하여 가장 높은 증가율을 나타내었다. 중간세공의 비율이 증가했다는 것은 미세세공의 감소량이 중간세공보다 많았기 때문으로 사료된다.

중간세공의 비표면적과 세공 용적이 낮은 활성탄 A와 F에서는 과과탄에서 중간세공의 증가비율이 낮은 것으로 나타났다. 또한 미세세공은 활성탄 A는 154m²/g 그리고 F는 179m²/g의 감소를 나타내어 가장 적게 감소하였다. 중간세공의 비율이 높은 활성탄에서 미세세공의 감소가 크게 나타나 중간세공과 미세세공의 비율이나 조합이 전체적인 활성탄의 사용율에 영향을 미치는 것으로 생각된다. 문

헌보고(Li 등, 2003), (Pelekani 등, 1999)에 의하면 세공 분포가 고르거나 중간영역의 비율이 높으면 미세세공의 pore blockage를 최소화 할 수 있어 미세세공의 사용을 최대화 할 수 있다고 보고하고 있다. 따라서 활성탄 E는 micro의 비율이 집중되어 있는 활성탄 A보다 중간세공의 비율이 약 5배 이상 많아, NOM에 의한 pore blockage가 적어 미세세공의 사용이 증가된 것으로 판단된다.

3. 3 자연유기물질의 등온흡착실험

활성탄에 따른 흡착능을 평가하기 위하여 7종류의 다른 활성탄에 대하여 모래여과수를 이용하여 흡착등온식 실험을 하였다. 수중의 NOM을 다성분계 흡착등온식에서 흡착이 안되는 성분 (Non-adsorbable fraction)과 3개의 흡착 가능한 성분 (adsorbable fraction)을 약하게 (weakly), 중간세기 (middle), 강하게 흡착되는 부분

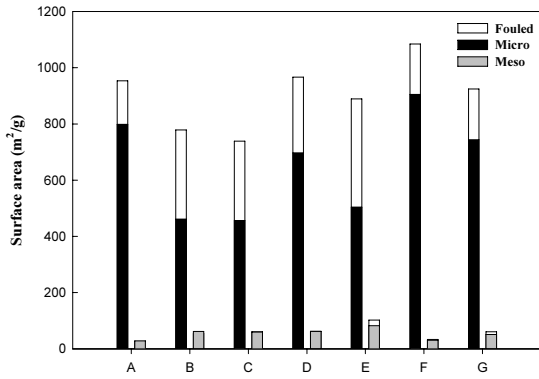


Fig. 1. Comparison of surface area for activated carbons.

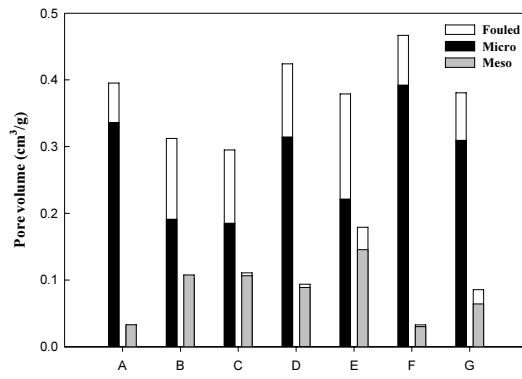


Fig. 2. Comparison of pore volume for activated carbons

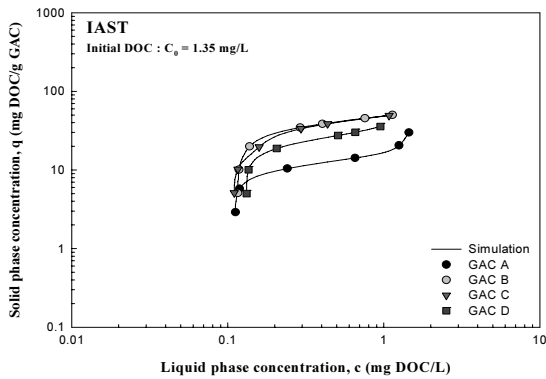


Fig. 3. Equilibrium isotherm of NOM using activated carbon A, B, C and D with sand filtered water.

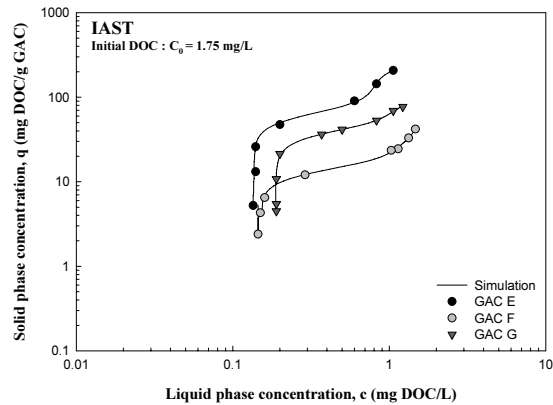


Fig. 4. Equilibrium isotherm of NOM using activated carbon E, F, and G with sand filtered water.

(strongly-adsorbable fraction)으로 나누어 IAST (Ideal adsorbed solution theory)을 이용하여 컴퓨터모사를 하였다. 실험에서 얻어진 데이터를 가장 잘 모사할 수 있는 Freundlich 상수 K값의 조합으로 평균오차(average percentage error:APE)값이 최소인 값을 구할 수 있으나, 변수가 K값과 농도로 서로 다른 활성탄의 특성을 비교하는데 한계가 있어 평균오차가 증가하더라도 두 분류로 하여 K값을 고정하여 모사하였다. 두 분류로 한 이유는 한 활성탄의 K값이 월등히 우수하여 이에 대한 영향을 최소화하기 위해서였다. 고정된 K값에서 각 흡착 가능한 물질의 초기 농도를 비교하면 상대적으로 용이하게 활성탄의 흡착능을 비교할 수 있다. 각 실험 데이터와 이에 따른 컴퓨터 모사에 대하여 Table 5와 Fig. 3과 4에 나타내었다.

Table 5에서는 A, B, C, D 활성탄의 흡착능을 비교하였다. K값을 0, 15, 35 그리고 65로 고정된 결과를 나타내고

있다. Table 6에서는 E, F, G 활성탄의 흡착능을 비교하였다. K값을 0, 20, 57 그리고 190으로 고정하였다. Table 5보다는 높은 값으로 고정하였는데 이는 활성탄 E의 흡착능이 월등히 우수하여 발생한 현상이다.

모든 활성탄에서 흡착되지 않는 물질을 나타내는 K값이 0인 물질은 약 10% 전후를 나타내어 활성탄의 특성에 따른 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 활성탄 A, B, C, D에서 강하게 흡착되는 부분은 활성탄 A에서 2.89%, B에서 63.0%, C에서 87.0%, D에서 1.09%로 나타났고, 중간세기로 흡착되는 부분은 활성탄 A에서 14.8%, B에서 28.3%, C에서 0.06%, D에서 85.0%로 나타났으며 약하게 흡착되는 부분은 활성탄 A에서 74.98%, B에서 0.00%, C에서 2.78%, D에서 3.47%로 나타났다. 실험 결과에서 보듯이 중간세공의 비율이 높을수록 강하게 흡착되는 양의 비율이 증가하는 것으로 나타났다. 중간세공이 가장 적은 활

Table 5. Comparison of initial concentrations and fractions at fixed K values for each activated carbon A, B, C and D

	K _i values	Raw water (C ₀ = 1.35 mg/L)			
		0	15	35	65
A Fixed K (error = 4.53%)	C _{0i} (mg/L)	0.10	1.01	0.20	0.04
	C _{0i} (%)	7.35	74.98	14.78	2.89
B Fixed K (error = 4.58%)	C _{0i} (mg/L)	0.12	0.00	0.38	0.85
	C _{0i} (%)	8.68	0.00	28.29	63.03
C Fixed K (error = 3.51%)	C _{0i} (mg/L)	0.14	0.04	0.00	1.17
	C _{0i} (%)	10.17	2.78	0.06	86.99
D Fixed K (error = 2.26%)	C _{0i} (mg/L)	0.13	0.05	1.15	0.03
	C _{0i} (%)	9.61	3.47	85.02	1.09

Table 6. Comparison of initial concentrations and fractions at fixed K values for each activated carbon E, F and G

	K _i values	Raw water (C ₀ = 1.75 mg/L)			
		0	20	57	190
E Fixed K (error = 4.91%)	C _{0i} (mg/L)	0.13	0.00	0.45	1.17
	C _{0i} (%)	7.33	0.00	25.78	66.90
F Fixed K (error = 3.55%)	C _{0i} (mg/L)	0.16	1.19	0.30	0.11
	C _{0i} (%)	9.02	67.81	17.04	6.14
G Fixed K (error = 4.64%)	C _{0i} (mg/L)	0.19	0.15	1.14	0.27
	C _{0i} (%)	10.88	8.30	65.42	15.41

성탄 A는 약하게 흡착되는 물질이 약 75%를 차지하여 흡착능이 가장 낮은 것으로 나타났다. Fig. 3에서도 나타나듯이 활성탄 B와 C가 A와 D에 비교하여 우수한 흡착능을 나타내고 있다.

Table 6에 나타난 활성탄 E, F, G에 대한 결과는 강하게 흡착되는 부분은 활성탄 E에서 66.9%, F에서 6.14%, G에서 15.4%로 나타났고, 중간세기로 흡착되는 부분은 활성탄 E에서 25.78%, F에서 17.04%, G에서 65.42%로 나타났으며 약하게 흡착되는 부분은 활성탄 E에서 0.00%, F에서 67.81%, G에서 8.30%로 나타났다. Fig. 4에 나타나듯이 활성탄 E가 다른 활성탄과 비교하여 월등히 우수한 흡착능을 나타내고 있다. Table 5의 결과와 같이 중간세공의 비율이 높을수록 강하게 흡착되는 양의 비율이 증가하는 것으로 나타났다. 활성탄 E의 경우에는 중간세기로 흡착되는 물질과 강하게 흡착되는 물질이 전체의 90% 이상을 차지하는

것으로 나타났다. 이는 가장 높은 중간세공의 비율을 가지고 있기 때문으로 사료된다. 전체적으로 7종류의 활성탄을 비교하여 보면 활성탄 B, C 그리고 G가 다른 K값을 가지고는 있지만 흡착능을 비교한다면 상호 유사한 흡착능을 가지고 있다. 세 활성탄 모두 중간세공값이 55에서 63cm³/g으로 유사한 값을 가지고 있으며 미세세공은 739에서 889m²/g으로 다른 활성탄에 비하여 낮았다. 이와 더불어 미세세공은 상대적으로 넓었으나 중간세공의 크기가 적은 활성탄 A와 G는 흡착능이 타 활성탄과 비교하여 좋지 않은 것으로 나타났다. 따라서 실제 자연유기물질의 흡착능에 영향을 미치는 공극의 크기는 2nm보다 큰 것으로 나타났다. 위의 Table 2에 나타난 바와 같이 자연유기물질의 분자량 분포에서 60% 이상이 10,000Da인 시료를 처리하는데 비표면적이 높은 활성탄보다는 중간세공의 비율이 높은 활성탄이 효과적인 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 활성탄의 미세세공과 중간세공의 비표면적과 세공의 용적이 자연유기물질의 흡착능에 어떻게 영향을 미치는지 모래여과수를 이용하여 평가하였다. 또한 활성탄의 흡착능은 다성분계를 모사할 수 있는 Freundlich과 IAST를 이용한 다성분계 흡착등온식을 이용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 본 실험에 사용된 모래여과수의 자연유기물질의 분포는 1,000Da와 1,000-10,000Da사이의 물질은 각 18%, 분자량이 10,000Da 이상인 물질이 60%이상인 것으로 나타났다.

2. 본 실험에 사용된 활성탄은 모두 석탄계 활성탄으로 비표면적에서 중간세공의 비율이 차지하는 비율은 최대 10%에서 3%까지 다양하게 나타났다. 과과탄에서는 중간세공의 비율이 미미하나 증가하는 경향을 나타내었다. 그 중에서 활성탄 E가 비표면적은 4% 그리고 세공용적은 8%가 증가하여 가장 높은 증가율을 나타내었다. 중간세공의 증가는 미세세공의 사용율이 증가하였기 때문이다.

3. 중간세공의 비표면적과 세공 부피가 적은 경우에 미세세공의 사용율이 낮은 것으로 나타났다.

4. 모든 활성탄에서 흡착되지 않는 물질인 K값이 0인 물질은 약 10%인 것으로 나타났다. 자연유기물질의 흡착에서 총 비표면적이 유사한 활성탄의 경우, 2nm보다 큰 세공의 비율이 높은 활성탄에서 흡착능이 우수한 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임.(No. 2010-0024107)

참고문헌

- 채선하, 이경혁 (2008) DOM의 분자량과 크기분포에 따른 입상활성탄 공정의 평가, 상하수도학회지, 22(1), pp. 31-38, 2008
- 홍성호, Jackson J.L.,(1997) 한외여과를 이용한 분자크기분율에 따른 입상활성탄에서의 자연유기물질 파과 특성 고찰, 19(5), 661-670
- 홍성호, 최주술 (2007) 활성탄 재생이 자연유기물질의 흡착에 미치는 영향, 상하수도학회지, 21(3), 323-329
- Li, Q., Snoeyink V. L., Mari as B. J., Campos C.(2003) Elucidating competitive adsorption mechanisms of atrazine and NOM using model compounds, Water research, 37, pp. 773-784
- Moore, Brian C., Cannon F, Westrick J., Metz D. H., Shrive C. A., DeMarco J, Hartman D. J.(2001) Changes in GAC pore structure during full-scale water treatment at Cincinnati: a comparison between virgin and thermally reactivated GAC, Carbon, Vol. 39, pp. 789-807
- Newcombe, G., Drikas, M. Hayes R.(1997) Influence of characterised natural organic material on activated carbon adsorption: II. Effect on pore volume distribution and adsorption of 2-Methylisoborneol, Wat. Res., 31(5), pp. 1065-1073
- Pelekani, C., and Snoeyink, V. L.(1999) Competitive adsorption in natural water: Role of activated carbon pore size, Wat. Res., 33(5), pp. 1209-1219