

활성탄 입자크기가 응집 및 흡착에 미치는 영향

Effect on Particle Size of Activated Carbons for Coagulation and Adsorption

김영일¹ · 배병욱^{2,*}

Kim, Young-Il¹ · Bae, Byung-Uk^{2,*}

1 한국수자원공사 수자원연구원 상하수도연구소
2 대전대학교 환경생명공학과

(2006년 8월 8일 논문 접수: 2006년 10월 13일 최종 수정논문 채택)

Abstract

Adsorption isotherms and kinetics for taste and odor (T&O) compounds and natural organic matters (NOMs) were performed to evaluate the impacts of activated carbon particle size on coagulation and adsorption. Adsorption capacities for iodine, T&O compounds, and NOM of all the activated carbons under #325 mesh were more excellent than those of virgin activated carbons. Small activated carbon particles were more rapidly adsorbed low molecular weight T&O compounds in the water, while those were slowly adsorbed high molecular weight NOM. When the activated carbon and alum were added simultaneously, the adsorption capacity for organics was better than alum was added alone.

Key words: Activated carbon, Particle size, Taste and odor(T&O), Natural organic matter(NOM), Adsorption, Coagulation

주제어: 활성탄, 입자크기, 이취미, 자연유기물질, 흡착, 응집

1. 서론

상수원수에 존재하는 이취미 물질, 합성유기화합물(synthetic organic chemicals, SOC), 살충제, 제초제, 소독부산물(disinfection by-product, DBP), 자연유기물(natural organic matter, NOM), 그리고 색도유발물질 등과 같은 다양한 천연 및 합성 유기화합물은

재래식 정수처리 공정에서 쉽게 제거되지 않기 때문에 흡착공정과 같은 별도의 처리공정이 요구된다(Najm et al., 1991; Sontheimer et al., 1998). 정수장에서 분말활성탄(powdered activated carbon, PAC)은 일시적인 수질악화나 수질사고 발생시, 특히, 생물학적 또는 인위적인 요인에 의해 발생된 이취미를 제거하여 음용수의 심미적인 요인을 향상시키기 위한 수단으로 주로 사용되어져 왔다(Lalezary et al., 1986,

*Corresponding author: Tel: +82-42-280-2535, FAX: +82-42-284-0109, E-mail: baebu@ju.ac.kr (Bae, B.U.)

1988).

일반적으로 활성탄의 흡착능은 PAC 자체의 물리화학적 특성(원료, 입자크기 분포 및 공극크기, 요오드 수 등) 뿐만 아니라 원수의 물리화학적 특성, 정수장의 운전조건, 그리고 배경물질로 작용하는 NOM 등에 의해 영향을 받게 된다(Knappe et al., 1998; Pelekani and Snoeyink, 1999). 정수처리 공정에 사용되는 PAC의 원료는 야자계(coconut), 목질계(wood), 갈탄계(lignite), 그리고 석탄계(coal) 등이 사용되었으며, 이전에는 목질계와 다른 원료의 흡착 성능차이에 대해 많은 연구가 수행되었다. 이 외에 다른 연구에서는 갈탄계 활성탄이 이취미 유발물질의 흡착에 있어 유기물의 영향을 거의 받지 않은 반면, 역청탄(bituminous) 재질의 활성탄은 영향을 받았다는 결과도 있다(Chudyk and Snoeyink, 1979). 그러나 최근 연구에서는 동일한 원수를 대상으로 갈탄 재질과 역청탄 재질 입상활성탄의 처리효율을 비교한 결과, 탁도, 용존유기물질(dissolved organic carbon, DOC), 색도, 그리고 AOC(assimilable organic carbon) 제거 측면에서 차이를 보이지 않았다(Najm et al., 2005). 미국 수도 협회(American Water Works Association, AWWA)에서는 정수공정에 사용되는 PAC 입자가 무게단위로 99%가 100번 체를, 95%가 200번 체를, 그리고 90%가 325번 체를 통과하도록 규정하고 있다(AWWA, 1996). 일반적으로 활성탄의 입자크기가 흡착능에 뚜렷한 영향을 주지는 않지만, 입경이 작은 활성탄이 대상물질을 보다 빠르게 흡착하는 것으로 알려져 있다(Najm et al., 1990). 한편, 정수공정에 사용되는 PAC는 원수에 존재하는 NOM 뿐만 아니라 정수과정 중에 투입되는 응집제 또는 염소와 같은 수처리제에 의해 흡착능에 영향을 받을 수 있다. 응집과정 중에 형성된 철, 망간 그리고 칼슘 침전물들과 같은 무기화합물이 활성탄에 침적된다면, 이러한 물질들 또한 대상물질의 흡착에 방해할 줄 수도 있다. 특히, PAC는 대부분 응집공정 이전에 분말이나 슬러리 형태로 투입되기 때문에 PAC가 응집제 투입 이전에 존재하면 금속수산화 침전물에 함유된 입자의 코팅작용으로 인해 응집공정에 영향을 주는 것으로 보고된 바 있다(Letterman, et al., 1970). 이 외에 수중의 pH도 활성탄과 대상 물질간의 상호반응에 영향을 줄 수 있으며, 높은 pH에서 유기물이 친수성으로 변화

되기 때문에 낮은 pH에서 활성탄의 흡착능이 우수하게 나타난다.

활성탄에 흡착되는 유기물의 흡착평형은 표면적, 공극분포, 입자크기, 그리고 표면화학과 같은 흡착제의 특성과 피흡착체의 물에 대한 용해도, 극성, 분자크기, 그리고 이온화정도와 수질화학 등과 같은 피흡착체의 특성에 의해 영향을 받게 된다(Troxler et al., 1989). 대부분 활성탄 흡착 처리시 수중에 제거하고자 하는 유기물이 단일성분이 아닌 다성분으로 존재하기 때문에 단일성분의 흡착과는 달리 흡착의 형태가 매우 복잡해진다(Fettig and Sontheimer, 1987a, 1987b). 이와 같은 배경을 바탕으로 본 연구에서는 실제 원수에 존재하는 이취미 물질 및 유기물을 대상으로 활성탄 입자크기가 응집 및 흡착 효율에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험방법

2.1. 활성탄 종류 및 물리화학적 특성

활성탄 입자크기의 다양화를 위해 목탄계, 석탄계, 그리고 역청탄 재질의 PAC와 GAC 각각 2종류를 실험에 사용하였다. 실험에 사용할 GAC의 입도분포를 PAC와 유사하게 만들기 위해 각각의 GAC를 막자사발을 이용하여 분쇄하였으며, 분쇄한 GAC와 PAC를 100번 체(체눈금 크기: 150 μ m), 200번 체(체눈금 크기: 75 μ m), 그리고 325번 체(체눈금 크기: 45 μ m)를 통과시켜 각 체를 통과한 입자를 따로 모아 실험에 사용하였다.

한편, 활성탄의 물리적 특성을 파악하기 위하여 입도분포(particle size distribution)를 조사하였다. 실험을 위해 100번 체, 200번 체, 그리고 325번 체를 사용하였으며, 먼저 수분에 대한 영향을 배제하기 위하여 105°C 오븐에서 2시간 동안 건조 및 방냉시킨 다음, 활성탄 일정량을 각각의 체에 통과시켜 통과한 양의 무게를 측정하여 입도분포를 구하였다(ASTM D5158, 1993). 한편, 활성탄의 흡착능을 정량적으로 조사하기 위하여 요오드 수(iodine number)를 측정하였다(ASTM D4607, 1995). 각각의 건조된 활성탄을 세 종류의 무게로 정량한 후, 250mL 용량의 삼각플라스크에 각각 넣고, 5% 염산용액 10mL를 각각의 플라스크에 넣어 활성탄이 완전히 젖을 때까지 흔들

Table 1. Physicochemical characteristics of activated carbons used in this study

Specifications* \ Carbon	PAC		GAC	
	SG	Jl	Calgon (F400)	SC
Source	Coconut	Coconut	Bituminous	Coconut
Iodine Number(mg/g)	950~1100	-	1,000	1,100
Methylene blue decolorizing index(mL/g)	150~200	150	-	-
Percent passing through**	#100 mesh	98	36	35
	#200 mesh	91	30	18
	#325 mesh	72	20	13

*All specifications were obtained from the manufacturer.

**Particle size distribution was performed in the lab using ASTM.

어 주었다. 황 성분을 제거하기 위하여 hot plate에서 30초 동안 끓인 다음 상온에서 식혔다. 완전히 식은 용액에 표준화된 0.100N 요오드 용액 100mL를 각각의 플라스크에 넣은 다음, 즉시 플라스크를 막고 30초 동안 강하게 흔들어서 반응시켰다. 반응이 끝난 후 재빨리 여과지(Whatman No. 2V, UK)로 중력 여과하여 여액을 비이커에 모았으며, 모아진 여액 50mL를 250mL 용량의 삼각플라스크에 옮긴 다음 용액이 희미한 노란색으로 변할 때까지 표준화된 0.100N 티오황산나트륨으로 적정하였다. 2mL의 전분 지시약을 넣은 후, 용액이 무색이 될 때까지 계속 적정하여 사용된 티오황산나트륨 부피를 기록하였다. 실험에 사용된 세 종류의 활성탄에 흡착된 요오드 량(X/M)과 요오드 농도(C)간의 상관관계를 최소자승법으로 구하고, 잔류 요오드 농도(C)가 0.02N인 지점의 X/M 값을 택하여 요오드 수로 결정하였다. AWWA에서는 분자량이 작은 이취미 유발물질을 제거하기 위한 PAC를 선택하는데 있어 요오드 수가 최소한 500mg/g 정도는 되어야 한다고 권고하였다(AWWA, 1996). 참고로 **Table 1**에 실험에 사용한 활성탄의 물리화학적 특성을 요약 정리하였다.

2.2. PAC 등온흡착 및 흡착동역학실험

대청댐 원수를 취수원으로 사용하고 있는 정수장의 원수를 대상으로 4종류의 활성탄을 이용하여 등온 흡착실험과 흡착동역학실험을 수행하였다. 활성탄 입자크기에 따른 흡착능을 비교하기 위하여 등온흡착실험은 유기물의 흡착정도를 흡착동역학실험은 유기물 및 이취미물질의 흡착정도를 평가하였다. Virgin 활성탄과 325번 체를 통과한 활성탄 입자를 105°C 오븐

에서 2시간 동안 건조시킨 다음 초순수에 넣어 1,000 mg/L stock 용액을 만들어 실험에 사용하였다. 등온 흡착실험은 먼저 원수를 여러 개의 1L 갈색병에 각각 나누어 담고 각각의 활성탄을 갈색병에 다양한 비율로 투입한 다음 교반기에 넣고 상온에서 100 rpm의 교반속도로 2일간 반응시켰다. 반응이 끝난 다음 모든 시료는 활성탄에 의한 오차를 최소화하기 위하여 시료채취 즉시 GF/C(47mm, Whatman International Ltd., UK) 여지와 0.45µm cellulose membrane (Millipore HA type, MA, USA)으로 여과한 다음 DOC와 UV₂₅₄를 분석하였다. 한편, 흡착동역학실험은 등온흡착실험과 마찬가지로 2L의 시료에 일정량의 활성탄을 투입한 후 반응시간에 따라 시료를 채취하여 UV₂₅₄와 TON (threshold odor number)을 분석하였다.

2.3. 활성탄 입자가 응집에 미치는 영향

활성탄 입자가 응집에 미치는 영향을 평가하기 위하여 저탁도인 대청호 원수와 대청호 원수에 카올린(kaolin)을 첨가한 고탁도(100NTU 내외) 인공원수를 이용하여 PAC 투입여부에 따른 응집실험을 수행하였다. 활성탄은 SG PAC를 사용하였으며, 응집실험을 위해 응집제는 Alum(aluminium sulfate, Al₂SO₄ · 5H₂O, Al₂O₃ 8%, 비중 1.29), pH 조절을 위하여 소석회를 2,000mg/L로 제조하여 사용하였다. 모든 응집실험은 Jar tester(PB900TM Programmable Jar tester, 7790-912, Phipps&Bird, VA, USA)와 2L의 사각형 Jar(B-KER2, Phipps&Bird, VA, USA)를 이용하였다(Hudson, 1981; Hudson and Wagner, 1981). Jar test는 응집제만 투입한 경우와 응집제와 활성탄을

동시에 투입한 경우에 대해서 수행하였으며, 응집제, 소석회, 그리고 활성탄을 동시에 투입하여 급속교반(250rpm) 1분, 완속교반 15분(70, 50, 30rpm에서 각각 5분씩 점감식 교반), 그리고 침전 15분으로 수행하였다. 침전이 끝난 다음 유출수를 채취하여 탁도 및 UV₂₅₄를 분석하였다.

2.4. 분석방법

pH는 pH Meter(Orion), 탁도는 Turbidimeter(2100P, Hach), DOC는 TOC 분석기(Rosemount DC-180, Dohrmann), UV₂₅₄는 UV/VIS spectrophotometer(UV-1601, Shimadzu), 그리고 TON은 Standard Methods의 2150B 방법으로 측정하였다(APHA, 1998).

3. 결과 및 고찰

3.1. 단일성분에 대한 활성탄의 흡착특성

Virgin 활성탄과 325번 체를 통과한 활성탄 입자를 대상으로 단일성분에 대한 흡착능을 평가하였다. 이를 위해 Table 2에 나타난 바와 같이 가장 일반적으로 사용하는 요오드 수를 측정하였다. 실험에 사용한 활성탄 모두 AWWA에서 권고한 요오드 수 500mg/g를 상회하는 값을 보였다(AWWA, 1996). Virgin 활성탄의 경우 PAC가 GAC를 갈아서 만든 활성탄에 비해 요오드 수가 약간 높은 값을 나타내었으며, SG PAC가 905mg/g로 가장 높은 값을 나타내었다. 반면, 325번 체를 통과한 활성탄의 요오드 수는 Virgin 활성탄에 비해 모두 높은 값을 보였는데, 이는 입도분포가 다양한 Virgin 활성탄에 비해 입자크기가 작은 활

성탄이 단일성분인 요오드에 대한 흡착속도가 빨라 흡착능이 우수하게 나타난 것으로 판단된다(Fettig and Sontheimer, 1987a). 한편, PAC에 비해 GAC를 갈아서 만든 활성탄, 특히 역청탄 재질인 Calgon GAC가 가장 높은 요오드 수를 보였는데, 이는 활성탄간의 내부구조와 공극분포가 다르고 원료 및 제조공정의 차이에 의한 것으로 사료된다.

3.2. 다성분에 대한 PAC 등온흡착 및 흡착동역학 실험

Fig. 1과 Fig. 2는 상수원수를 대상으로 4종류 활성탄의 DOC에 대한 등온흡착실험 결과이다. Fig. 1에서와 같이 활성탄 흡착능을 의미하는 K값은 Virgin GAC에 비해 Virgin PAC가 약간 더 우수한 경향을 보였다. 그러나 325번 체를 통과한 입경이 작은 활성탄은 Virgin 활성탄에 비해 모두 K값이 증가하였으며, 특히, PAC에 비해 GAC를 갈아서 만든 활성탄의 K값이 크게 증가하였다(Fig. 2 참조). 이는 앞에서 언급한 바와 같이 활성탄의 공극분포와 원료 차이에 의한 것으로 판단된다. 한편, 등온흡착실험과 요오드 수(Table 2 참조) 실험결과가 서로 상이하였는데, 이는 단일성분인 요오드에 대한 흡착과 달리 원수 내 유기물은 다성분으로 존재하기 때문인 것으로 판단된

Table 2. Iodine numbers of PAC used in this study according to particle size

Sample		Iodine Number(mg/g)
Virgin activated carbons	SG PAC	905
	JI PAC	802
	Calgon GAC	857
	SC GAC	604
Activated carbons under #325 mesh	SG PAC	1050
	JI PAC	864
	Calgon GAC	1377
	SC GAC	1084

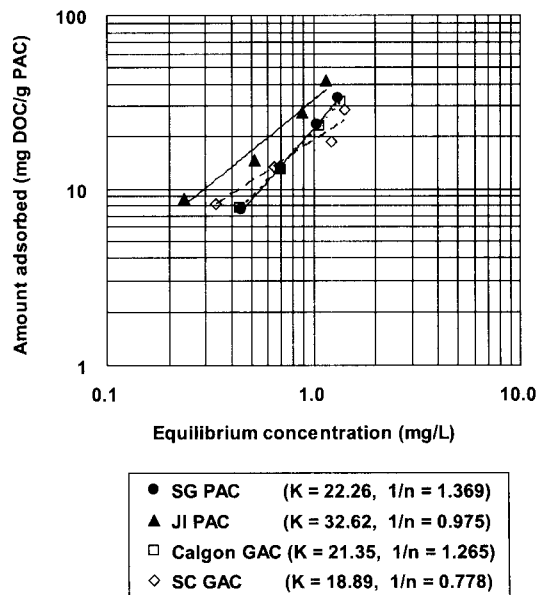


Fig. 1. Freundlich isotherms for dissolved organic matter on the virgin activated carbons.

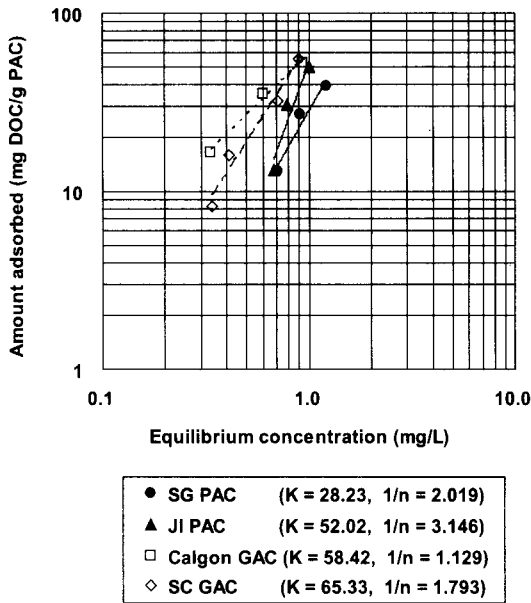


Fig. 2. Freundlich isotherms for dissolved organic matter on the activated carbons under #325 mesh.

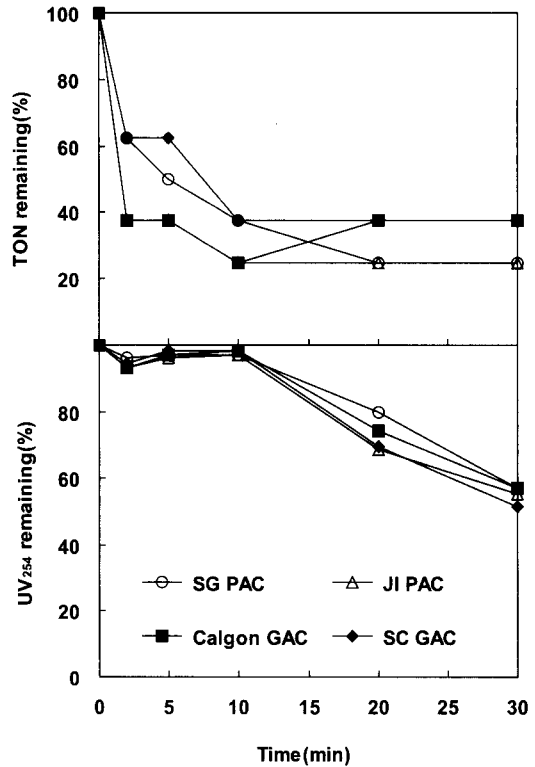


Fig. 4. Adsorption kinetics for TON and UV₂₅₄ with activated carbon under #325 mesh. (a) TON (b) UV₂₅₄.

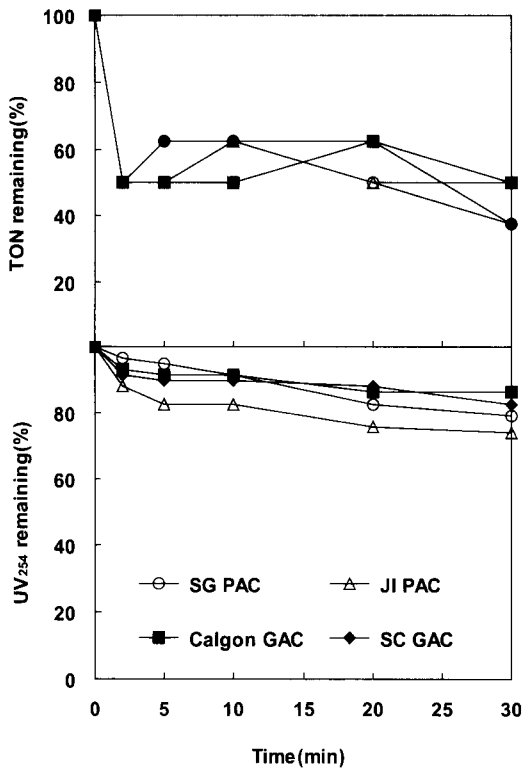


Fig. 3. Adsorption kinetics for TON and UV₂₅₄ with virgin activated carbon. (a) TON (b) UV₂₅₄.

다(Fettig and Sontheimer, 1987a, 1987b, 1987c).

Fig. 3은 초기 TON이 80이고 UV₂₅₄가 0.058인 원수에 대하여 Virgin 활성탄 10mg/L를 투입하고 교반강도를 30G로 주어졌을 때 흡착동역학실험 결과를 나타낸 것이다. TON과 UV₂₅₄ 모두 반응 10분 이내에 흡착가능한 양의 대부분이 제거되었다. TON은 활성탄의 종류에 따라 큰 차이가 없었으나, UV₂₅₄의 경우에는 PAC가 GAC를 갈아서 만든 활성탄에 비해 보다 좋은 흡착효율을 보였다. 한편, Fig. 4는 325번체를 통과한 활성탄을 이용하여 Fig. 3과 동일한 조건에서의 실험 결과를 나타낸 것이다. 이전 결과에서와 마찬가지로 활성탄 종류에 관계없이 TON은 반응 10분 이내에 제거되어 평형상태에 도달하였다. UV₂₅₄의 경우 접촉시간 10분까지는 제거율에 변화가 거의 없었으나, 10분 이후부터 제거율이 급격하게 증가하는 경향을 보였다. 이는 입자크기가 작은 활성탄이 원수에 존재하는 저분자 이취미 유발물질은 빠르게 흡착하는 반면, 상대적으로 분자량이 큰 유기물질은 늦게

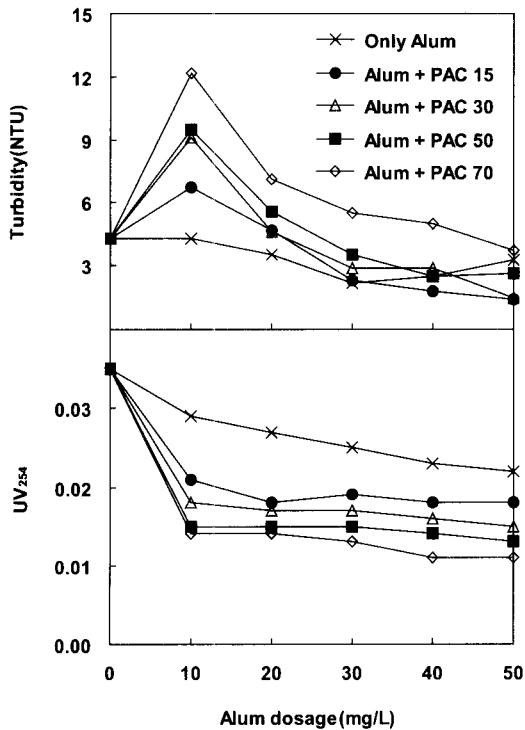


Fig. 5. Variation of turbidity and UV_{254} in low turbidity water according to virgin PAC and alum dosage.

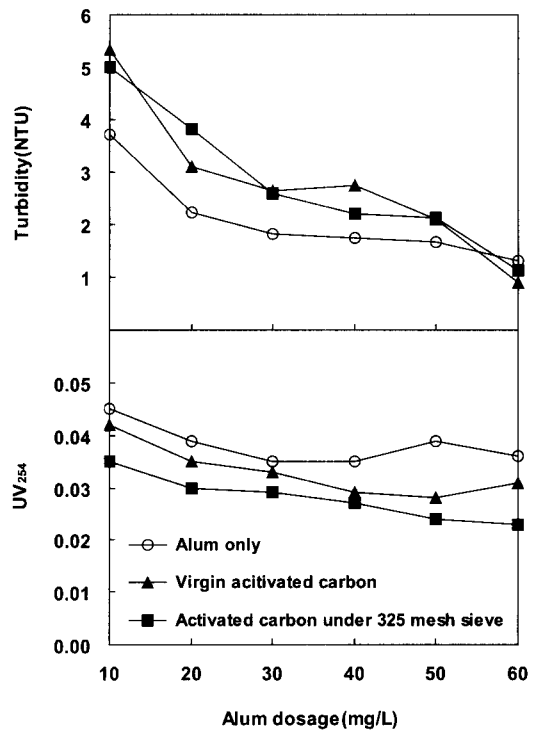


Fig. 6. Variation of turbidity and UV_{254} in high turbidity water according to activated carbon and alum dosage.

흡착하기 때문이다. 따라서 정수장에서 이취미 유발 물질과 같이 저분자 물질 제거를 위해 입경이 작은 활성탄을, NOM과 같이 고분자 물질 제거를 위해 입경분포가 다양한 활성탄을 사용한다면 각 대상물질의 제거효율을 증대시킬 수 있을 것이다.

3.3. 활성탄 입자가 응집에 미치는 영향

Fig. 5는 탁도가 4.3NTU이고 UV_{254} 가 0.035인 저탁도 대청호 원수에 대해 응집제만 투입한 경우와 응집제와 활성탄을 동시에 투입한 경우의 탁도 및 유기물 제거율을 비교한 결과이다. Alum만 투입한 경우, 투입량이 증가함에 따라 탁도 및 UV_{254} 제거율이 증가하는 추세를 보였다. 한편, 응집제와 활성탄을 동시에 투입한 경우, 10~20mg/L 범위의 낮은 응집제 투입량에서 활성탄 투입량이 증가함에 따라 탁도가 증가하는 경향을 보였으나, 응집제와 활성탄 투입량이 증가할수록 응집제만 투입했을 경우에 비해 UV_{254} 제거율이 증가하였다. 활성탄과 응집제 30mg/L를 동시에 투입한 경우, UV_{254} 제거율이 51.4% 정도로 응

집제를 단독으로 투입한 경우에 비해 2배 정도 높은 제거율을 보였다. 이와 같이 활성탄 투입에 의한 유기물의 제거는 고울응집 (enhanced coagulation) 중 하나의 방법으로 미국 환경청 (United States Environmental Protection Agency, USEPA)에서 언급한 바가 있다(USEPA, 1999).

한편, Fig. 6은 대청호 원수에 카오린(kaolin)을 첨가하여 탁도가 약 100NTU, UV_{254} 가 0.096 정도의 고탁도 인공원수를 대상으로 Virgin 활성탄과 325번 체를 통과한 활성탄을 각각 20mg/L 투입하여 응집실험을 수행한 결과이다. 응집제만 투입한 경우가 응집제와 활성탄을 동시에 투입한 경우에 비해 비교적 우수한 잔류 탁도를 나타내었으나, 이와는 반대로 유기물 제거효율은 활성탄을 응집제와 동시에 투입한 경우가 우수하였고 활성탄 입자크기가 작을수록 좋은 효율을 보였다. 이는 활성탄 입자가 탁질로 작용하여 탁도에는 좋지 않은 영향을 준 반면, 유기물 제거에는 유리한 영향을 미쳤기 때문이다(Letterman, et al., 1970).

4. 결 론

1) Virgin 활성탄의 경우 PAC가 GAC를 갈아서 만든 활성탄에 비해 요오드 수가 약간 높은 값을 보인 반면, 325번 체를 통과한 활성탄의 요오드 수는 Virgin 활성탄에 비해 모두 높은 값을 보였다. 이는 입도분포가 다양한 Virgin 활성탄에 비해 입자크기가 작은 활성탄이 단일성분인 요오드에 대한 흡착속도가 빨라 흡착능이 우수하게 나타난 것으로 판단된다.

2) 유기물에 대한 활성탄의 흡착능은 Virgin GAC에 비해 Virgin PAC가 약간 더 우수한 경향을 보였다. 325번 체를 통과한 입경이 작은 활성탄은 Virgin 활성탄에 비해 모두 K값이 증가하였으며, 특히, PAC에 비해 GAC를 갈아서 만든 활성탄의 K값이 크게 증가하였는데, 이는 활성탄의 공극분포와 원료 차이에 의한 것으로 판단된다.

3) 활성탄 종류에 관계없이 TON과 UV₂₅₄ 모두 반응 10분 이내에 흡착가능한 양의 대부분이 제거되었으나, 325번 체를 통과한 활성탄은 반응시간 10분 이후부터 UV₂₅₄ 제거율이 급격하게 증가하는 경향을 보였다. 이는 입자크기가 작은 활성탄이 원수에 존재하는 저분자 이취미 유발물질은 빠르게 흡착하는 반면, 상대적으로 분자량이 큰 유기물질은 늦게 흡착하기 때문이다. 따라서 정수장에서 이취미 유발물질과 같이 저분자 물질 제거를 위해 입경이 작은 활성탄을, NOM과 같이 고분자 물질 제거를 위해 입경분포가 다양한 활성탄을 사용한다면 각 대상물질의 제거효율을 증대시킬 수 있을 것이다.

4) 응집제만 투입한 경우가 응집제와 활성탄을 동시에 투입한 경우에 비해 비교적 우수한 잔류 탁도를 나타내었으나, 이와는 반대로 유기물 제거효율은 활성탄을 응집제와 동시에 투입한 경우가 우수하였고 활성탄 입자크기가 작을수록 좋은 제거효율을 보였다. 이는 활성탄 입자가 탁질로 작용하여 탁도에는 좋지 않은 영향을 준 반면, 유기물 제거에는 유리한 영향을 미쳤기 때문이다.

참고문헌

1. American Society for Testing Materials (1993) Standard Test Method for Determination of the Particle Size of Powdered Activated Carbon (D5158-93).
2. American Society for Testing Materials (1995) Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon(D4607-94).
3. APHA, AWWA, WEF (1998) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed.
4. AWWA (1996) AWWA Standard for Powdered Activated Carbon, ANSI/AWWA B600-96.
5. Chudyk, W.A. and Snoeyink, V.L. (1979) Activated Carbon Versus Resin Adsorption of 2-Methylisoborneol and Chloroform, *AWWA*, 71(9), pp. 529-538.
6. Fettig, J. and Sontheimer, H. (1987a) Kinetics of Adsorption on Activated Carbon: I. Single-Solute Systems, *J. Environ. Engr.*, 113(4), pp. 764-779.
7. Fettig, J. and Sontheimer, H. (1987b) Kinetics of Adsorption on Activated Carbon: II. Multisolute Systems, *J. Environ. Engr.*, 113(4), pp. 780-794.
8. Fettig, J. and Sontheimer, H. (1987c) Kinetics of Adsorption on Activated Carbon: III. Natural Organic Material, *J. Environ. Engr.*, 113(4), pp. 795-810.
9. Hudson, H.E. (1981) *Water Clarification Processes: Practical Design and Evaluation*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, pp. 40-64.
10. Hudson, H.E. and Wagner E.G. (1981) Conduct and Uses of Jar Tests, *AWWA*, 73(4), pp. 218-223.
11. Knappe, D., Matsui, Y., Snoeyink, V.L., Roche, P., Prados, M. and Bourbigot, M. (1998) Predicting the Capacity of Powdered Activated Carbon for Trace Organic Compounds in Natural Waters, *Environ. Sci. Tech.*, 32(11), pp. 1694-1698.
12. Lalezary, S., Pirbazari, M. and Mcguire M.J. (1986) Evaluation Activated Carbons for Removing Low Concentrations of Taste- and Odor-Producing Organics, *AWWA*, 78(11), pp. 76-82.
13. Lalezary, S., Pirbazari, M., Dale, M.S., Tanaka, T.S. and Mcguire, M.J. (1998) Optimizing the Removal of Geosmin and 2-Methylisoborneol by Powdered Activated Carbon, *AWWA*, 80(3), pp. 73-80.
14. Letterman, R.D., Quan, J.E. and Gemmell, R.S. (1970) Coagulation of Activated Carbon Suspensions, *AWWA*, 62(10), pp. 652-658.
15. Najm, I.N., Snoeyink, V.L., Suidan, M.T., Lee, C.H. and Richard, Y. (1990) Effect of Particle Size and Background Natural Organics on the Adsorption Efficiency of PAC, *AWWA*, 82(1), pp. 65-72.
16. Najm, I.N., Snoeyink, V.L., Lykins Jr, B.W. and Adams, J.Q. (1991) Using Powdered Activated Carbon: A Critical Review, *AWWA*, 83(1), pp. 65-76.

1. American Society for Testing Materials (1993) Standard Test

17. Najm, I., Kennedy M. and Naylor, W. (2005) Lignite versus Bituminous GAC for Biofiltration - A Case Study, *AWWA*, **97**(1), pp. 94-101.
18. Pelekani, C. and Snoeyink, V.L. (1999) Competitive Adsorption in Natural Water: Role of Activated Carbon Pore Size, *Wat. Res.*, **35**(5), pp. 1209-1219.
19. Sontheimer, H., Crittenden, J.C. and Summers R.S. (1998) *Activated Carbon for Water Treatment*. 2nd ed., Universitat Karlsruhe, Karlsruhe, DVGW-Forschungsstelle, Engler-Bunte-Institut.
20. Troxler, S., Smith D.W. and Knetting, E. (1989) Powdered Activated Carbon Selection for Water Treatment, *Can. J. of Civil Engr.*, **16**, pp. 743-752.
21. USEPA (1999) *Enhanced coagulation and enhanced precipitative softening guidance manual*, EPA815-R-99-012.