



고도정수처리용 Filter/Adsorber Granular Activated Carbon 특성 평가: 마모지수, floater, water-soluble ash 및 흡착특성 평가

Evaluation on Filter/Adsorber Granular Activated Carbon using in Advanced Drinking Water Treatment: Abrasion number, Floater, Water-soluble ash, and Adsorption characteristics

박병주·도시현·김태양·홍성호*

Park, Byeong-Joo·Do, Si-Hyun·Kim, Tae-Yang·Hong, Seong-Ho*

송실대학교 화학공학과

Department of Chemical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Republic of Korea.

ABSTRACT

The characteristics of filter/adsorber granular activated carbon (F/A GAC) were investigated by measuring various parameters, which include surface area, pore volume, abrasion number, floater, and water-soluble ash. The correlation between parameters was also evaluated. Moreover, rapid small-scale column test (RSSCT) was conducted for adsorption characteristics. Thirteen F/A GAC were tested, and the average values of abrasion number and water-soluble ash were 88.9 and 0.15%, respectively. F/A GAC with the larger external surface area and greater mesopore volume had the lower abrasion number, which indicated that it was worn out relatively easily. Water-soluble ash of coconut-based GAC (about 2.6%) was greater than that of coal-based GAC (less than 1%), and the pH of solution was increased with GAC, which had the higher water-soluble ash. On the other hand, floater of thirteen F/A GAC was divided as two groups, which one group had relatively higher floater (2.7~3.5%) and the other group had lower floater (approximately 0.5%). The results of RSSCT indicated that coconut-based GAC (i.e. relatively higher water-soluble ash) had less adsorption capacity. Moreover, adsorption capacity of coal-based GAC with larger surface area and greater mesopore volume was superior to others.

Key words: Filter/Adsorber Granular Activated Carbon (F/A GAC), Abrasion number, Floater, Water-soluble ash, Rapid Small Scale Column Test (RSSCT)

주제어: 활성탄 여과지 (GAC F/A), 마모지수, 부유특성, 수용성회분, Rapid Small Scale Column Test (RSSCT)

1. 서 론

입상활성탄 (Granular Activated Carbon, GAC)은 맛 냄새 등을 포함한 미량유기물질을 제거하는 고도정수처리

의 중요한 수처리제로 활용되고 있다. 이러한 입상활성탄은 공정의 위치에 따라 활성탄여과지 (F/A GAC)와 활성탄흡착지 (post GAC)로 구분될 수 있는데, 모래를 입상활성탄으로 개량한 활성탄여과지는 미량유기물질, 맛 냄새 물질 그리고 탁도(Turbidity), 등을 여과와 흡착으로 제거할 수 있으며, 여과 공정 뒤에 위치한 활성탄흡착지는

Received 3 December 2015, revised 2 February 2016, accepted 3 February 2016.

*Corresponding author: Hong, Seong-Ho (E-mail:shong@ssu.ac.kr)

pp. 001-008
pp. 009-017
pp. 019-031
pp. 033-040
pp. 041-049
pp. 051-058
pp. 059-067
pp. 069-075
pp. 077-085
pp. 087-097
pp. 099-104
pp. 105-111

맛 냄새 물질, TOC (total organic carbon), 등을 흡착제거할 수 있다 (Graese et al., 1987). 국내에서 입상활성탄은 활성탄여과지보다는 흡착지로 많이 활용되어 왔으나, 최근에는 활성탄여과지 공정을 이용한 정수시설이 늘어나고 있는데, 이는 고도정수처리시설 도입 시 부지면적의 여유가 없을 경우 기존여과지 공정을 활성탄여과지로 개량할 수 있는 이점이 있기 때문이다 (Kim et al., 2006).

활성탄여과지는 기존 모래여과지보다 우수한 탁도 제거율과 유기물 제거가 가능하며(Babi et al., 2007), 활성탄 흡착지보다 소독부산물 (DBPs) 제어에 있어서 효율적인 것으로 평가되어지고 있다 (Kim and Kang, 2008). 따라서, 활성탄여과지에서 활성탄의 여과재 (여재)로써의 물리적 성능을 평가하기 위한 규격이 필요하다.

Table 1에 나타난 국내외 입상활성탄의 규격기준을 살펴보면, 국내 규격기준 (Ministry of Environment in Korea, 2007)에서는 특정 불순물과 흡착기능을 평가할 수 있는 물성시험 위주로 총 14개의 항목이 선정되어 있다. 반면, AWWA (American Water Works Association, 2006) 규격기준은 국내 규격기준에는 없는 평가 항목으로 수분, 수용성회분, 겔보기비중, 유효경, 균등계수 그리고 마모지수 등 9개 항목에 대한 규격기준이 추가적으로 설정되어 있다. 또한 JWVA (Japan Water Works Association, 2006) 규격기준은 입도와 용출 특성 관련한 18개의 규격 기준이 설정되어 있다. 이와 같이 국내 규격 기준에 명시된 입상활성탄 평가항목을 국외 규격기준과 비교하였을 때, 공통되는 흡착과 관련된 평가 항목에서

는 엄격한 기준을 설정하고 있지만, 활성탄여과지에 적용될 수 있는 여재로써의 성능 평가 관련 항목 등과 같은 추가적인 항목에 대한 필요성이 요구되고 있다.

본 연구는 활성탄여과지에 적용되는 입상활성탄의 특성 평가를 위해 수행하였다. 13가지 입상활성탄 (원료 및 수입원 등이 다른 활성탄)에 대한 기존 국내 규격에 포함되지 않은 평가 항목인 마모지수, 부유특성 그리고 수용성회분 인자를 측정하였으며, 측정된 항목들간의 상관관계를 분석하였다. 그리고 물리적인 여과 특성을 제외하고, RSSCT 실험을 통하여 흡착 특성을 비교 분석하였다. 또한 평가 항목 중 마모지수는 여과지에 행해지는 정기적인 역세적으로 인하여 여재의 입도 변경에 대한 저항을 평가하였고, 부유특성 및 수용성회분은 우수한 활성탄 구매를 위한 품질 평가를 위해 선정하였다.

2. 실험 방법 및 재료

2.1 실험재료

연구에 사용한 입상활성탄은 7개의 회사, 총 13가지 입상활성탄으로 국내외 제조/수입사 및 활성탄의 원료 (석탄 또는 야자)에 따라 분류하였다. RSSCT 실험에 적합한 원수는 'H'강 표층수를 공극크기 1.2 μm GF/C 여과지로 전처리한 것으로, 초기 DOC와 UV₂₅₄는 2.6~2.9 mg/L와 0.04~0.24 cm⁻¹였다.

Table 1. Domestic and foreign standards for granular activated carbon

Parameter	Korea ^{a)}	JWVA ^{b)}	AWWA ^{c)}	Parameter	Korea ^{a)}	JWVA ^{b)}	AWWA ^{c)}
Iodine number	≥950 mg/g	≥900 mg/g	≥500 mg/g	Effective Size	-	0.3~1.3 mm	0.3~1.3 mm
Methylene blue	≥150 mL/g	≥150 mL/g	-	Uniformity Coefficient	-	1.2~2.0	≤2.1
pH	4.0~11.0	4.0~8.0	-	Charging density	-	≥0.4 g/mL	-
Phenol number	≤25	≤25	-	Hardness	-	≥90	-
ABS number	≤50	≤50	-	Residue on ignition	-	≤10%	-
Chloride	≤0.5%	≤0.5%	-	EC	-	≤10 μs/cm	-
Residue retained	2.4 mm, ≤0		Max ≤25 ^{d)}	Color unit	-	≤0.5 deg.	-
	0.5 μm, ≥95		Min. ≤5 ^{d)}	Turbidity	-	≤0.2 deg.	-
Properties	black granular	-	-	Taste, odor	-	clear	-
Certified test	proper	-	-	Apparent density	-	-	≥0.20 g/cc
Loss on drying	≤5%	-	-	Abrasion number	-	-	≥70%
AS	≤2 mg/kg	-	-	Moisture	-	-	<8%
Pb	≤10 mg/kg	-	-	Water-extractable ash	-	-	<4%
Cd	≤1 mg/kg	-	-	Non-wattable	-	-	≤5%
Zn	≤50 mg/kg	-	-				

^{a)} Ministry of Environment in Korea, 2007; ^{b)} JWVA, 2006; ^{c)} AWWA, 2006; ^{d)} Sieve number



2.2 실험방법

2.2.1 마모지수 (abrasion number)

AWWA에서 제시하는 B6014-12 활성탄 분석 규정 방법을 기초로 Ro-tap sieve shaker (Germany, RX 30)를 사용하여 마모지수를 측정하였다. 간략히 설명하면, 시료 100 ± 5 g을 10분 ± 10초 동안 체질을 진행하여 입도 분석을 수행하고 각 입도에서의 무게를 측정 후, 다음 수식 (equation (1))을 이용하여 마모 전 평균입경 (original D_{avg})을 구하였다.

$$D_{avg} = \frac{\text{summation of } (W_i \times D_i)}{\text{summation of } (W_i)} \quad (1)$$

D_{avg} = 평균입경 (mm)

W_i = 각 체에서 얻은 무게 (g)

D_i = 위아래 체의 평균 opening 입경 (mm)

마모 전 평균입경을 구한 후, 쇄구슬 (직경 12.7 mm와 19 mm 쇄구슬 10개씩)을 이용하여 20분 ± 2초 동안 마모를 진행하였으며, 다시 한번 입도를 분석하고 각 입도에서의 무게를 측정하여 마모 후 평균입경 (final D_{avg})을 수식 (equation (1))을 이용하여 구하였다. 최종적으로, 마모 전 후의 각 입도에서의 무게변화를 이용하여 마모지수를 수식 (equation (2))를 이용하여 구하였다.

$$\text{abrasion number}(\%) = \frac{\text{final } D_{avg}}{\text{original } D_{avg}} \times 100 \quad (2)$$

2.2.2 부유허성 (floater)

입상활성탄의 부유허성 (floater)은 외국 'C' 회사의 실험방법을 기초하여 수행하였다 (Carbochem, 2015). 시료 약 50 g(B)을 건조기 (dry oven)를 이용하여 110 °C에서 30분간 건조한 뒤, 시료를 다시 상온까지 자연 냉각한 후, 500 mL 비커에 시료를 투입하고 증류수 300 mL를 넣은 후 약 600 rpm으로 5분간 교반하였다. 교반 후, 10분 간 정치하고 물 표면에 떠 있는 부유물을 채취하였다. 채취된 활성탄은 처음과 같은 방법으로 건조, 냉각 그리고 무게를 측정 (A)하여 전체 무게 대비 손실 무게를 %로 나타내었다 (equation (3)).

$$\text{Floater}(\%) = \frac{A}{B} \times 100 \quad (3)$$

2.2.3 수용성 회분 (water-soluble ash)

수용성 회분 (water-soluble ash) 측정은 ASTM에서 제시하는 규정방법 D5029-98를 기초하여 실험을 수행하였다. 시료를 150°C, 3시간 이상 건조 후, 데시케이터에서 냉각하여 10 ± 0.1 g 시료를 준비한 후, 둥근 플라스크에 끓는 증류수와 함께 넣고, 온도를 유지하여 약하게 끓는 정도로 15분 동안 가열하였다. 용출된 액체는 5~10 μm 공극 크기 정량여과지에 진공 여과한 뒤, 상온 냉각하여 pH를 측정하고, 알루미늄 증발 접시에 50 mL 분취하였다. 마지막으로 150°C, 6시간 이상 완전건조 후, 데시케이터에서 냉각한 잔여물을 반복하여 0.1 mg 오차발생 없을 때까지 재 측정 후, 수용성 회분을 %로 나타내었다 (equation (4)).

$$\text{water-soluble ash}(\%) = \frac{(B-A)(D)}{(C)(E)} \times 100 \quad (4)$$

A = 증발접시 무게 (g)

B = 잔여물이 담긴 증발접시 무게 (g)

C = 활성탄 무게 (g)

D = 추출시 사용한 물의 부피 (mL)

E = 사용한 여액의 부피 (mL)

2.2.4 RSSCT (rapid small scale column test)

RSSCT는 소규모 컬럼 (small column)과 대규모 컬럼 (large column)의 활성탄 입자 직경에 대한 scaling 함수를 이용하여 full-scale의 실제 흡착공정을 모사하는 bench-scale의 축소된 운전조건을 이용할 수 있게 해준다 (Crittenden et al., 1991). 이 실험에서 운전조건을 축소하기 위하여 Summers et al. (1995)에서 제시한 PD (proportional diffusivity)에 근거한 인자식을 참고하였다. 또한 축소된 운전 조건 중 최소 여과속도 설정은 ICR (The Information Collection Rule) manual에서 권장하는 최소 레이놀즈 수 ($Re_{sc, min}$)로 설정해주었으며, 실제 공정 운전 조건 (experienced full-scaled)과 축소된 RSSCT 조건 (bench-scaled)을 Table 2에 나타내었다.

RSSCT 실험에 도입된 원수는 부유물질 제거를 위해 전처리 후에 사용하였으며, 유출수의 UV₂₅₄와 DOC를 측정하였다. 용존 유기물질 농도를 나타내는 UV₂₅₄는 AnalytikJena의 SPECORD-200 Spectrometer를 이용하였으며, 0.45 μm 여과지 (Filter paper)에 샘플을 여과한 뒤, 석영 셀에 넣어서 254 nm 파장에서 측정하였다.

pp. 001-008

pp. 009-017

pp. 019-031

pp. 033-040

pp. 041-049

pp. 051-058

pp. 059-067

pp. 069-075

pp. 077-085

pp. 087-097

pp. 099-104

pp. 105-111

Table 2. Conditions of RSSCT

Column	Experienced Full-scaled ^a	RSSCT, Bench-scaled	Scaling Equations ^b	
Particle size	1.062 mm	0.112 mm	· Scaling factor(SF): $SF = \frac{d_{LC}}{d_{SC}} = \frac{1.062}{0.112} = 9.444$	· Empty bed contact time(EBCT): $EBCT_{SC} = \frac{EBCT_{LC}}{SF} = \frac{14.0}{9.444} = 1.482 \text{ min}$
Particle main range	12×40	100×200	· Loading rate: $V_{SC} = \frac{Re_{SC-min} \times \nu_{SC} \times \epsilon_{SC}}{d_{SC}}$	
EBCT	14.0min	1.48 min	· Flow rate: $Q_{SC} = V_{SC} \times \pi (DC_{SC})^2 / 4$	· Column length: $l_{SC} = V_{SC} \times EBCT_{SC}$
Loading rate	135 m/day	174 m/day	· Where EBCT = empty bed contact time; SC, LC = small column, large column; d_p = media diameter Re = Reynolds number; ν = kinematic viscosity; ϵ = bed porosity; DC = column diameter	
Layer height	131 cm	17.8 cm		
Flow rate	-	6.03 ml/min		

Source: ^{a)} Ahn et al., 2007; ^{b)} Summers et al., 1995

DOC (Dissolved Organic Carbon)는 AnalytikJena의 NC 3100을 이용하였으며, 마찬가지로 0.45 µm 여과지로 여과한 샘플을 pH 2이하로 조절하고, 산소로 폭기하여 휘발성 유기물질을 제거한 뒤 고온산화 NDIR (Non-dispersive infrared) 방식으로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 마모지수, 부유허성 및 수용성회분 측정 결과

실험에 사용한 총 13가지 입상활성탄의 물리적 특성 (표면적 및 기공부피)과 평가항목(마모지수, 부유허성 그리고 수용성회분)에 대한 결과를 Table 3에 나타내었다. 실험에 사용한 입상활성탄은 국내회사 (A, B, C, J, K, L, M)와 외국회사 (D, E, F, G, H, I) 제품으로 구분하였고, 원재료에 따라 석탄계열 (A ~ K)과 야자계열 (L, M)로 분류하였다.

활성탄의 물리적 특성을 나타내는 표면적과 기공부피 값은 원재료와 제조 과정에 따라 달라지며, 이중 내부 표면적이 발달할수록 흡착능력이 증가한다 (Cecen, 2014). 수처리용 활성탄의 전형적인 미세기공부피 (micropore volume)와 내부표면적 (internal surface area)은 0.15~0.70 cm³/g, 500~1500 m²/g이며, 내부 표면적은 활성탄의 총 표면적 (total surface area)의 95% 대 부분에 해당된다. 또한 중간기공부피 (mesopore volume)와 외부표면적 (external surface area)은 0.1~0.65 cm³/g, 10~200 m²/g으로 알려져 있다 (Bansal and Goya, 2005). 이와 같이 실험에 사용한 입상활성탄들은 전형적인 활성탄의 기공 구조와 표면적 범위 값 안에 해

당됨을 알 수 있었다.

마모지수는 입상활성탄의 미립자 형태의 유지 및 마모에 대한 저항을 나타내는 인자로 마모지수가 높을수록 마모에 대한 큰 저항을 갖고 있는 것을 의미한다 (Marsh and Reinoso, 2006). 활성탄여과지 같은 경우에는 고형물 부하와 유기물 흡착으로 인하여 모래 여과지의 동일 수준 혹은 이상으로 빈번한 역세척이 요구되는데 (Graese et al., 1987), 이로 인하여 부드러운 입상활성탄 일수록 빠르게 마모될 가능성이 높은 것으로 알려져있다 (van Stone et al., 1999). 마모로 인하여 변형될 수 있는 입자의 크기와 균등계수는 여과지의 기능 뿐만 아니라 활성탄여과지에서 유기물 제거에 영향을 줄 수 있기 때문에 (Graese et al., 1987) 활성탄여과지에 적용되는 입상활성탄의 마모지수 측정은 중요한 평가항목이라 할 수 있다.

본 실험에서 측정된 13가지 입상활성탄의 마모지수 범위는 86.2~93.1%로 나타났으며, 평균값은 88.9%였다 (Table 3). Ratnoji and singh (2014)는 야자계열의 입상활성탄이 석탄계열의 입상활성탄에 비해 강도 (Hardness)가 강하고 마모의 저항이 비교적 강하다고 보고하였다. 원재료의 특성을 보았을 때, 본 연구에서 사용한 야자계열 입상활성탄도 마모지수가 전반적으로 높은 편에 속하였으며, 또한 작은 외부표면적과, 중간기공부피를 나타냈다 (Table 3).

부유허성은 제품의 품질을 나타내는 평가 인자로 물과 접촉 시 부상하여 입상활성탄으로의 기능을 수행할 수 없는 손실을 의미한다. 참고로 AWWA에서는 여과지에 초기 배치된 입상활성탄이 충분히 젖지 않고 부상하여 발생하는 여재의 손실을 ‘non-wettable’로 정의하여 관리하고 있다.



Table 3. Characteristic of granular activated carbon

Sample	Internal surface area (m ² /g)	External Surface area (m ² /g)	Meso pore volume (cm ³ /g)	micro pore volume (cm ³ /g)	Abrasion number (%)	Floater (%)	Water-soluble ash (%)
A	1128.9	35.835	0.1858	0.546	90.7 ± 0.70	2.93 ± 0.03	0.177 ± 0.012
B	1010.3	82.663	0.2365	0.4463	86.2 ± 0.48	0.54 ± 0.06	0.046 ± 0.009
C	1213.0	90.956	0.2674	0.5648	91.8 ± 0.48	3.12 ± 0.05	0.618 ± 0.012
D	1028.8	94.226	0.2243	0.435	87.2 ± 0.59	0.67 ± 0.03	0.094 ± 0.021
E	974.5	47.689	0.1685	0.4507	86.9 ± 1.73	2.57 ± 0.05	0.079 ± 0.007
F	822.1	32.846	0.1035	0.3584	89.0 ± 1.34	0.56 ± 0.04	0.068 ± 0.006
G	913.0	55.245	0.1596	0.3997	89.9 ± 0.15	2.81 ± 0.05	0.101 ± 0.021
H	939.7	73.668	0.1865	0.417	86.5 ± 1.81	0.49 ± 0.02	0.117 ± 0.01
I	986.36	19.206	0.1131	0.4703	93.1 ± 0.39	3.52 ± 0.08	0.063 ± 0.01
J	1117.3	47.873	0.1652	0.4958	86.7 ± 0.68	0.61 ± 0.04	0.119 ± 0.012
K	1157.8	44.095	0.1237	0.4474	87.7 ± 0.46	0.55 ± 0.07	0.123 ± 0.012
L	1088.1	48.361	0.1522	0.4762	89.5 ± 0.16	2.97 ± 0.03	2.555 ± 0.107
M	814.7	27.195	0.0954	0.3528	90.2 ± 0.30	3.04 ± 0.06	2.582 ± 0.167

Sample: coal base(A-K), coconut base(L, M), domestic(A, B, C, J, K, L, M), foreign(D, E, F, G, H, I)

본 연구에서 측정된 13가지 입상활성탄의 부유허성 값은 2.7~3.5%로 상대적으로 많은 양이 부유하는 입상활성탄 그룹(총 7개:A, C, E, G, I, L, M)과 약 0.5% 정도 부유하는 그룹(총 6개:B, D, F, H, J, K)으로 나누어졌다. 일반적으로 야자계열은 부유허성치가 높은 그룹에 해당되었다.

수용성 회분은 입상활성탄의 불순물 용출 가능성을 %로 측정하여 알 수 있는데, 중금속 독성, pH 그리고 조류 생장과의 연관성이 있는 것으로 알려져 있다(New Mexico Environment Department, 2015). AWWA에서는 water extractable ash라는 명칭으로 4% 이하로 관리되고 있다(Table 1 참고).

수용성 회분 측정결과, 석탄계열의 입상활성탄(1% 미만)보다 야자계열의 입상활성탄(약 2.6%)에서 더 많은 양의 회분이 용출됨을 확인하였다. 추가적으로 용출 용액의 pH를 측정하였으며, 수용성 회분과 수용액의 pH의 상관관계를 Fig 1에 나타내었다.

전체 13개 입상활성탄의 수용성회분과 수용액의 pH의 관계는 미비한 것으로 보일 수도 있지만, 야자계열 L과 M 그리고 석탄계열 A와 C를 제외하면 선형 회귀(linear regression)하였을 때 r^2 가 91%로 매우 높게 나타났다.

수용성회분 증가에 따른 pH 증가는 활성탄 표면에 존재하는 칼슘(Ca) 때문일 것으로 사료된다. Mazyck et al. (2005)은 석탄계 활성탄에는 칼슘(Ca)이 충분하게(abundant) 존재하는데, 물과 반응하여 수산화칼슘

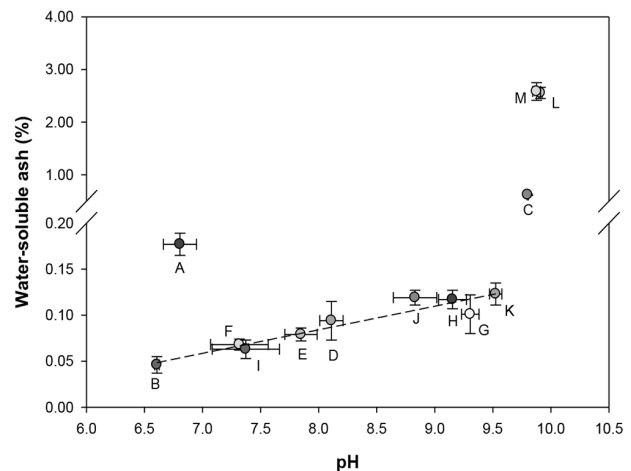


Fig. 1. The pH of solution vs. water-soluble ash.

(Ca(OH)₂)을 형성하고 이렇게 형성된 수산화칼슘은 칼슘양이온(Ca²⁺)과 수산화이온(OH⁻)으로 용해될 수 있다고 하였다. 따라서 석탄계활성탄의 제조공법이나 원재료에 따라 칼슘의 함량이 다르며, 이러한 칼슘 함량에 따라 수용액의 pH에 영향을 주는 것으로 사료된다.

3.2 상관관계 평가

우선적으로 물리적 특성간의 상관관계를 평가하였다. 13가지 입상활성탄의 외부표면적(external surface area)과 중간기공부피(mesopore volume) 값 간의 선형 회귀 직선을 구하여 상관관계를 평가하였을 때, 비례 관계($r^2 = 80%$)로 존재함을 알 수 있었다(Fig. 2 (a)).

pp. 001-008

pp. 009-017

pp. 019-031

pp. 033-040

pp. 041-049

pp. 051-058

pp. 059-067

pp. 069-075

pp. 077-085

pp. 087-097

pp. 099-104

pp. 105-111

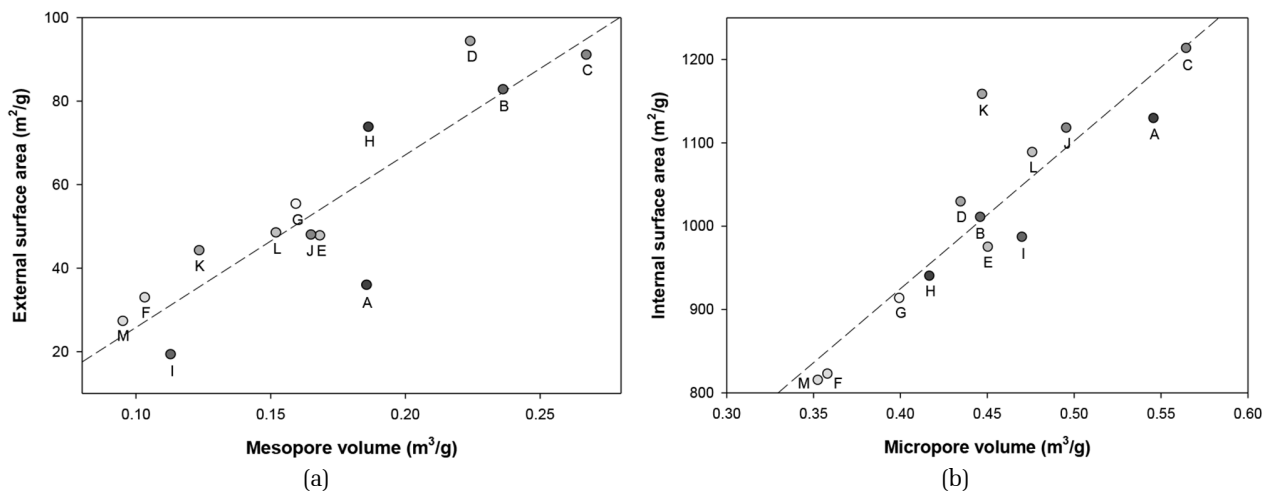


Fig. 2. Correlation of surface area with pore volume (a) mesopore vs. external and (b) micropore vs. internal.

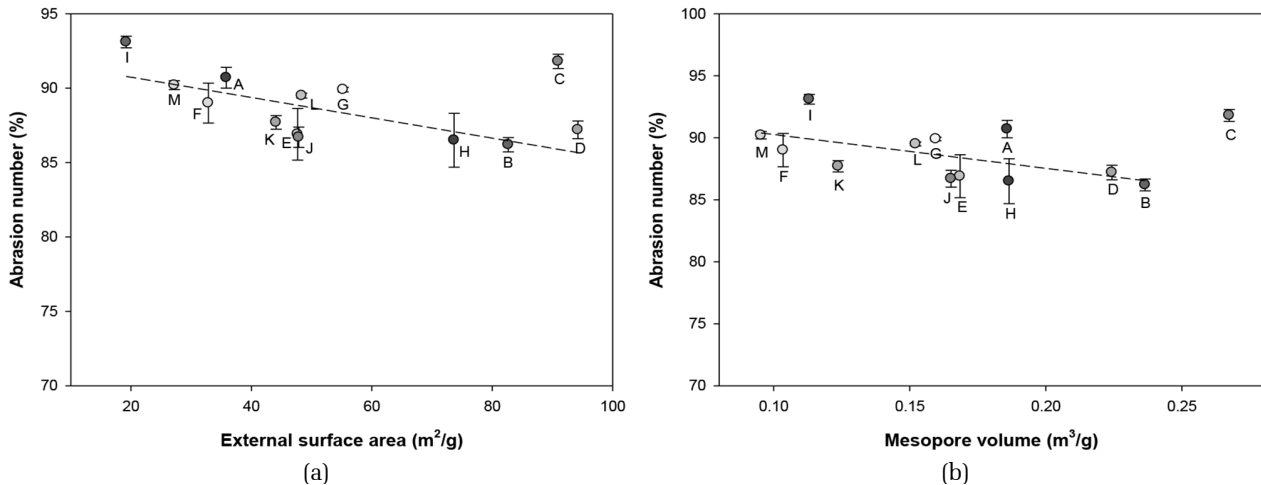


Fig. 3. Correlation of abrasion number with (a) external surface area and (b) mesopore volume.

이러한 결과는 외부표면적 (External surface area)은 미세기공 (Mesopore)과 거대기공(Macropore)의 표면적을 나타내는 인자라고 한 Cecen (2014)의 해석과 일치하는 결과이다. 또한, 내부표면적 (internal surface area)과 미세기공부피 (micropore volume)간의 비례관계 ($r^2 = 81\%$)가 존재함을 알 수 있었다 (Fig. 2 (b)). 입상활성탄의 물리적 특성(내부/외부 표면적 및 중간/미세 기공부피)과 평가항목(마모지수, 부유허성 그리고 수용성회분)간의 상관관계를 평가하였는데, 부유허성은 물리적 특성과 특별한 상관관계를 나타내지 않았지만, 마모지수 및 수용성회분과 상관관계가 존재함을 알 수 있었다.

마모지수는 내부표면적 및 미세기공부피와는 상관관계가 없었지만, 외부표면적 및 중간기공부피와 반비례관

계를 나타내었다. 이는 활성탄 제조 과정 중 활성화 단계에서 가열속도에 따라 중간, 거대 기공이 발달하게 되면서 낮은 강도와 마모 저항을 갖는 결과와 일치하였다 (Menendez and Gullon, 2006). 즉, 외부표면적과 중간기공부피가 작은 입상활성탄은 마모로 인한 손실이 적다는 것을 의미하며, 외부표면적과 중간기공부피가 발달한 입상활성탄은 마모로 인한 손실이 상대적으로 높다는 것을 보여주고 있다 (Fig. 3). 추가적으로, 석탄계열 입상활성탄 C를 제외한 나머지 12개 입상활성탄의 외부표면적 및 중간기공부피와 마모지수의 상관관계는 신뢰도 (r^2)가 각각 17%에서 53% 및 5%에서 34%로 증가함을 알 수 있었다. 석탄계열 입상활성탄 C를 제외한 선형회귀 결과를 직선으로 Fig. 3에 나타내었다.

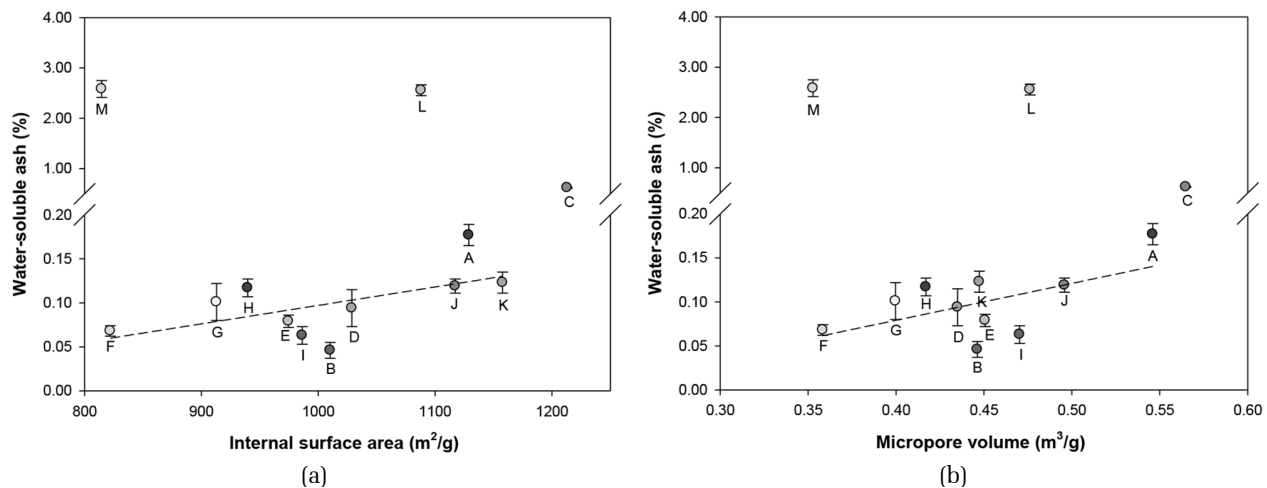


Fig. 4. Correlation of water-soluble ash with (a) internal surface area and (b) micropore volume.

반면에, 야자계열 입상활성탄 (L과 M)과 석탄계열 입상활성탄 C를 제외한 10개 입상활성탄의 수용성회분은 외부표면적 및 중간기공부피와는 상관관계가 없었지만, 내부표면적 및 미세기공부피와 비례관계를 나타내었다 (Fig. 4). 내부표면적이 외부표면적에 비해 월등히 넓기 때문에 물과의 접촉면적이 넓어 수용성회분이 상대적으로 용이하게 용출되는 것으로 해석될 수도 있으며, 내부표면적과 미세기공부피의 비례관계로부터 수용성회분과의 비례관계도 유추될 수 있다. 또한, 야자계열 입상활성탄 L과 M 및 석탄계열 입상활성탄 C를 제외한 내부표면적 및 미세기공부피와 수용성회분의 신뢰도 (r2)는 각각 34% 및 33%였다. 여기서 주의해야 할 점은 내부표면적 및 미세기공부피가 큰 입상활성탄의 수용성회분은 높지만, 원료성분이 석탄계열일 경우, 수용성회분의 값이 미비하기 때문에 내부구조 (내부표면적, 미세기공부피)가 발달된 입상활성탄의 우수 활성탄으로의 선정은 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 추가적으로 마모지수, 부유평성, 수용성회분 세 평가항목 간에는 상관관계를 평가하였는데, 상관관계가 없음을 확인하였다.

3.3 RSSCT를 이용한 활성탄의 흡착특성

입상활성탄 (D, E, I, M)을 선정하여 RSSCT를 진행하였다. 입상활성탄 I는 마모지수가 높고 부유평성이 낮으며 수용성회분이 적은 대표시료로 선정되었으며, 입상활성탄 E는 마모지수가 낮고 부유평성이 높으며 수용성회분이 적은 대표시료로, 입상활성탄 M은 마모

지수가 높고 부유평성이 높으며 수용성회분이 높은 대표시료로, 그리고 입상활성탄 D는 마모지수가 낮고 부유평성이 낮으며 수용성회분이 낮은 대표시료로 선정하였다. 또한, 입상활성탄 D, E, I는 석탄계열이며, 입상활성탄 M은 야자계열 대표시료로 적용하였다.

RSSCT 실험을 통해 구한 파과곡선은 실제공정시간에 scaling factor (9.444)를 곱하여 변환시킨 scaled operation time을 적용하였으며, Fig. 5는 scaled operation time에 따른 유출수의 DOC와 UV254를 나타내었다.

DOC (Fig. 5. (a))의 경우, 선정된 네 가지 입상활성탄 중 M이 가장 파과가 빠르게 진행되어 14일에서 약 82%까지 증가하였으며, I에서는 14일에서 약 60%, 그리고 47일에서 약 80%까지 증가하였다. 반면, 입상활성탄 D와 E는 비교적 파과가 서서히 진행되면서, 84일까지 60% 파과되었으며, 운전을 끝낸 160일까지는 60~70%로 유지되었다.

또한 UV254 (Fig. 5. (b))의 경우에도 마찬가지로 입상활성탄 M과 I에서 빠른 파과가 일어나고 입상활성탄 D와 E에서 서서히 파과가 일어났다. 그러나 전체적으로 동일한 scaled operation time에서 DOC에 비해 UV254의 파과율이 약 10~15% 정도의 차이를 보였는데, 이는 DOC보다 UV254에서 더 영향을 받는 고분자 물질의 제거가 많기 때문인 것으로 사려 된다 (Archer and Singer, 2006).

입상활성탄 (D, E, I, M)의 물리적 특성 및 평가항목을 RSSCT 흡착 특성 결과와 비교하였을 때, 파과가 빠르게 일어난 야자계열 입상활성탄 M은 마모지수, 부유평성 그리고 수용성회분이 높고, 다른 입상활성

- pp. 001-008
- pp. 009-017
- pp. 019-031
- pp. 033-040
- pp. 041-049
- pp. 051-058
- pp. 059-067
- pp. 069-075
- pp. 077-085
- pp. 087-097
- pp. 099-104
- pp. 105-111

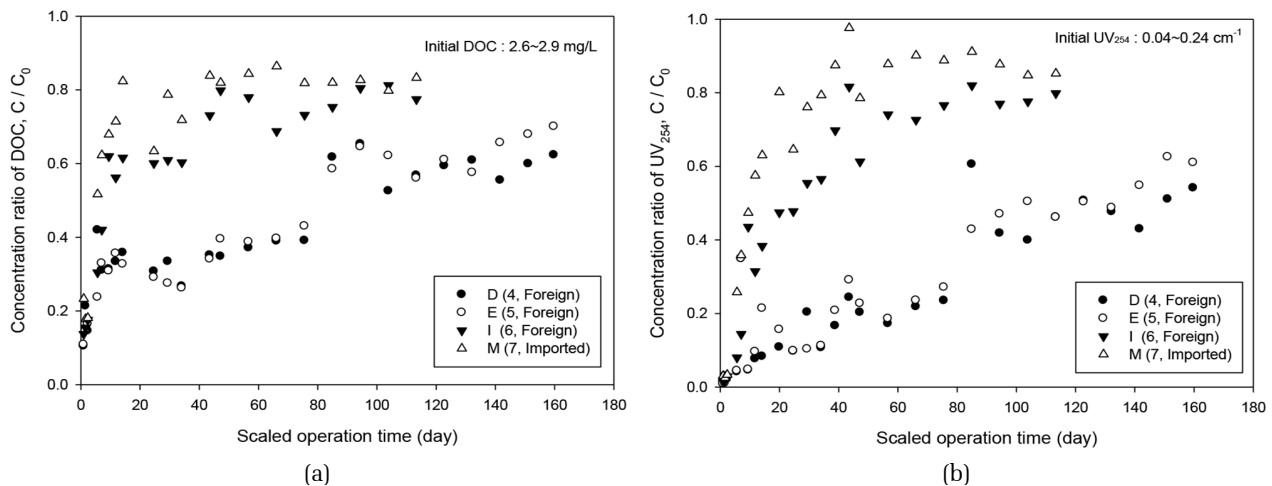


Fig. 5. (a) DOC and (b) UV₂₅₄ breakthrough in the different activated carbon.

탄 대비 전체적인 기공부피와 표면적 발달이 적었다. 그리고 나머지 선정된 석탄계열 입상활성탄 (D, E, I) 은 모두 수용성회분이 낮고, 내부표면적과 미세기공 부피가 발달되어 있었는데, 이중 빠른 파과가 일어난 석탄계열 입상활성탄 I는 마모지수가 높고, 중간기공 부피와 외부표면적이 작았다. 이처럼 유사한 미세기공 부피와 내부표면적을 가졌지만 입상활성탄 D와 E 보다 I에서 빠른 파과가 일어난 것은 흡착질이 미세기공까지 도달하기 위해 중요한 통로역할을 하는 중간기공을 충분히 갖지 못해 분자량이 큰 자연유기물질에 의하여 기공 폐색이 일어났기 때문이다 (Menendez and Gullon, 2006; Li et al., 2003). 최종적으로 흡착 특성 평가에서 빠른 파과가 발생하여 상대적으로 흡착 능력이 떨어진 입상활성탄 (I, M)은 공통적으로 중간기공 부피와 외부표면적이 작고, 이와 반비례적인 상관관계를 갖는 마모지수가 높은 것으로 나타났다.

4. 결 론

활성탄 여과지에 적용되는 F/A GAC의 특성을 평가하기 위하여 국내 입상활성탄 규격기준으로 설정되어 있지 않은 마모지수, 부유평형 그리고 수용성회분을 평가 인자로 설정하여 실험방법을 설계하고 13가지의 상업용 입상활성탄을 분석하였다. 각각의 입상활성탄에 관하여 측정된 평가항목들은 활성탄의 물리적 특성인 표면적 및 기공부피와의 상관관계를 분석하였다. 또한, 대표 샘플을 선정된 뒤, RSSCT 실험에 적용

하여 활성탄의 흡착특성을 평가하였다.

1) 평가항목 중 마모지수는 입상활성탄의 외부표면적과 중간기공부피가 클수록 마모에 대한 저항이 약하다는 것을 확인하였고, 전체 13개 입상활성탄의 평균 마모지수는 89%로 나타났다.

2) 부유평형 결과, 2.7~3.5%의 손실이 발생하는 높은 부유평형을 갖는 그룹과 0.5% 낮게 부유하는 그룹으로 나눌 수 있었으며, 야자 계열의 입상활성탄 2개 시료는 모두 높은 값을 가졌다.

3) 수용성회분은 야자계열 입상활성탄에서 더 많은 양이 용출되었으며 (야자계열은 약 2.6%, 석탄계열은 1% 미만), 석탄계열 입상활성탄에서 수용성회분과 pH는 비례적인 상관관계를 나타내었다. 또한 내부표면적과 미세기공부피가 클수록 불순물의 용출 가능성이 큰 것으로 나타났다.

4) 미세기공부피와 내부표면적이 발달한 석탄계열 입상활성탄 중 중간기공부피와 외부표면적이 작은 석탄계열 입상활성탄과 수용성 회분이 높고, 내외부 기공부피와 표면적이 모두 상대적으로 작은 야자계열 입상활성탄에서 빠른 파과가 발생하였다.

사 사

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 20년도 산학연 협력 기술개발사업(산학연협력 기술개발사업(연구마을), 과제번호: C0220692)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.



References

- AWWA. (2006) AWWA Standard "Granular Activated Carbon", *Journal of AWWA*, ANSI/AWWA B604-12.
- Ahn, H., Chae, S., Kim, S., Wang, C., Summers, R. S. (2007) Efficient taste and odour removal by water treatment plants around the Han River water supply system, *Water Science & Technology*, 55(5), pp. 103-109.3.
- Archer, A. D., Singer, P. C. (2006) SUVA and NOM coagulation using the ICR database, *Journal of AWWA*, 98(7), pp. 110-123.
- ASTM. (2004) Standard Test Method for Water Solubles in Activated Carbon, *American society for testing and materials (ASTM)*, D 5029-98.
- Babi, K. G., Koumenides, K. M., Nikolaou, A. D., Vassilatonpoulou, G., Tzoumerkas, F. K., Makri, C. A., Lekkas, T. D. (2007) GAC Filter - A MULTI PURPOSE FILTER FOR DRINKING WATER TREATMENT, Proceedings of the 10th International Conference on *Environmental Science and Technology*, Kos island, Greece, 5-7 September 2007.
- Bansal, R. P., Goya, M. (2005) Activated Carbon Adsorption, CRC Press, *Taylor & Francis Group*.
- Carbochem. (2015) Method of Carbochem about GAC requirements, Carbochem; Activated Carbon Manufacturer & Chemical Supplier.
- Cecen, F. (2014) Activated Carbon, Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, *John Wiley and Sons*, New york, DOI: 10.1002/0471238961.0103200902011105.a01.pub3.
- Clements, M. (2002) Granular Activated Carbon Management at a Water Treatment Plant, Master's Thesis, Rand Afrikaans University, Johannesburg, South African, 173 pages.
- Crittenden, J. C., Reddy, P. S., Arora, H., Trynoski, J., Hand, D. w., Perram D. L., and Summers, R. S. (1991) Predicting GAC performance with rapid small-scale column tests, *Journal of AWWA.*, 83(1), pp. 77-87.
- Graese, S. L., Snoeyink, V. I., Lee R. G. (1987) Granular Activated Carbon Filter-Adsorber Systems, *Journal of AWWA.*, 79(12), pp. 64-74.
- JWWA. (2006) Standards of GAC for drinking water treatment, *JWWA.*, A 114.
- Kim, J. K., Kang, B. S. (2008) DBPs removal in GAC filter-adsorber, *Water Research*, 42, pp. 145-1529.
- Kim, S. S., Lim, J. L., Lee, K. H., Lee, S. R. (2006) Evaluation of Removal Efficiency in F/A Process Combined with Pre-ozonation around the Han River Water Supply System, 2006 Joint Conference KSWW. & KSWE., Incheon, KNO. University, 006(0), pp. 673-676.
- Li, Q., Snoeyink, V. L., Mariaas, B. J., Campos, C. (2003) Elucidating competitive adsorption mechanisms of atrazine and NOM using model compounds, *Water RES.*, 37(2003), pp. 773-784.
- Marsh, H., Reinoso, F. R. (2006) Activated Carbon, *Elsevier*, Amsterdam.
- Mazyck, D. W., Cannon, F. S., Bach, M. T., Radovic, L. R. (2005) The role of calcium in high pH excursions for reactivated GAC, *Carbon*, 43, pp. 511-518
- Menendez, J. A., Gullon, I. M. (2006) Chapter 1 Types of carbon adsorbents and their production, T. Badndosz Ed., *Elsevier*, ISBN: 0-12-370536-3, pp. 1-48.
- Ministry of Environment in Korea. (2007) Standards and labeling for water treatment, Notice, 2007-92.
- New Mexico Environment Department. (2015) New Mexico Water Systems Operator Certification Study Manual, NMED. Utility Operator Certification Program, Version IV.2.
- Ratnoji, S. S., Singh, N., (2014) A study of coconut shell - activated carbon for filtration and its comparison with sand filtration, *International Journal of Renewable Energy and Environmental Engineering*, ISSN 2348-0157, 02(03), pp. 201-204.15.
- Summers, R. S., Hooper, S. M., Solarlk, G., Owen, D. M., Hong, S. (1995) Bench-scale evaluation of GAC for NOM control, *Journal of AWWA.*, 87(8), pp. 69-80.

pp. 001-008

pp. 009-017

pp. 019-031

pp. 033-040

pp. 041-049

pp. 051-058

pp. 059-067

pp. 069-075

pp. 077-085

pp. 087-097

pp. 099-104

pp. 105-111