입상활성탄 공정의 효율적 운영을 위한 입상활성탄 재생횟수별 수처리 효율 평가

Evaluation of Water Treatment Efficiency according to Number of Regeneration of GACs For Efficient Operation of GAC Process

김상구 · 손희종[†] · 황영도 · 염훈식 · 박흥기

Sang-Goo Kim · Hee-Jong Son[†] · Young-Do Hwang · Hoon-Sik Yoom · Hong-Ki Park

부산광역시 상수도사업본부 수질연구소

Water Quality Institute, Busan Water Authority

(Received February 20, 2018; Revised April 19, 2018; Accepted April 26, 2018)

Abstract : This study was conducted to evaluate the effect of increasing the number of regenerated granular activated carbon (GAC) on the adsorption efficiency of DOC and THMs from 2011 to 2016. As increase the number of regeneration times, the apparent density, hardness and 12 number were decreased, and the ash was increased. Average breakthrough period of virgin GAC for DOC ($C/C_0=0.8$) was about 8 months and each GAC basin (300 m³) adsorbed about 4,246 kg of DOC. The regenerated GACs reached to breakthrough 7 to 10 months and these GACs have 3,514~4,656 kg/basin adsorption capacity. The average THMs breakthrough ($C/C_0=1.0$) period of virgin GAC was about 7 months and each basin adsorbed 60.6 kg of THMs. 1st and 2nd and more regenerated GACs had 44.8 kg/basin, 21.6 kg/basin and 10.8 kg/basin adsorption capacity respectively. To determine the optimum regeneration times, 6th regenerated GAC has almost same degree of adsorbing DOC capacity of virgin GAC that means it is difficult to determine the appropriate regeneration times for DOC, on the other hands for THMs, 2nd regenerated GAC's adsorption capacity has one thirds of virgin GAC of that and more 4th regenerated GAC has only one sixths of virgin of that, therefore, more two times of regenerated GAC needs to be considered for THMs removal.

Key Words : Granular Activated Carbon (GAC), Regeneration, Regeneration Times, Trihalomethanes (THMs), Dissolved Organic Carbon (DOC), Breakthrough.

요약 : 본 연구는 2011년부터 2016년까지 재생탄들의 재생횟수 증가가 수중의 DOC와 THMs 흡착 효율에 미치는 영향을 평가하기 위해 수행되었다. 재생횟수가 증가할수록 재생탄들의 겉보기 밀도, 경도 및 요오드가는 감소시켰고, 회분은 증가하였다. 신탄은 평균 8개월 정도 운전하면 DOC ($C/C_0=0.8$)가 파과에 도달하였고, 한 지당 평균 4,246 kg의 DOC를 흡착하였다. 재생횟수에 관계없이 재생탄들도 운전 7개월~10개월 후에 DOC가 파과에 도달하였으며, 한 지당 평균 3,514 kg~4,656 kg의 범위로 DOC를 흡착하여 재생횟수가 증가하여도 DOC 흡착능은 신탄과 유사하였다. THMs의 경우, 신탄은 평균 7개월 정도 운전으로 파과에 도달($C/C_0=1.0$)하였고, 한 지당 평균 60.6 kg을 흡착하였다. 재생횟수가 1차, 2차 및 그 이상 증가할수록 THMs 평균 파과도달 기간이 평균 4개월, 2개월 및 1개월 정도로 감소하였으며, 한 지당 평균 흡착량도 재생횟수가 1차, 2차 및 그 이상 증가할수록 한 지당 평균 44.8 kg, 21.6 kg 및 10.8 kg으로 감소하였다. 6차 재생탄의 DOC 흡착능이 신탄과 비슷하여 DOC를 위한 적절한 재생 차수를 결정하기 어려웠으나, THMs의 흡착능의 경우, 2차 재생탄이 신탄의 1/3, 4차 이상의 재생탄은 신탄의 1/6로 감소하여 재생횟수가 증가함에 따라 DOC의 흡착효율은 유지되는 반면 THMs의 흡착효율은 빠르게 저하되는 것으로 나타났다.

주제어 : 입상활성탄, 재생, 재생횟수, 트리할로메탄, 용존 유기탄소, 파과

1. 서론

1990년대 중반부터 국내의 대규모 정수장에 수중의 유기성 오염물질 제거목적으로 오존/생물활성탄 공정이 도입되기 시작하여 현재 많은 정수장에서 운영 중에 있다.¹⁾ 오존/생물활성탄 공정은 고도 정수처리공정의 일종으로 악화되는 상수 원수의 수질과 강화되는 수질 법규에 대처하기 위하여 기존의 응집-침전-모래여과공정이 직면한 여러 문제점들을 보강하기 위하여 도입되었다.¹⁾ 생물활성탄(biological activated carbon, BAC) 공정은 전 세계적으로 널리 사용되고 있는 효과적이고 성숙한 수처리 공법이다.²⁻⁴⁾ BAC 공정에서의 유기성 오염물질의 제거 메커니즘은 활성탄에 의한 유기성 오

염물질의 흡착과 부착 박테리아에 의한 생물분해이며,⁵⁻⁷⁾ BAC 공정은 몇몇 조류 독소물질들,⁸⁾ 이취 유발물질들,⁹⁾ 수중 잔류 의약품물질류 및 개인위생용품류^{10,11)} 및 소독부산물 전구물질^{12,13)}의 제거에 효과적인 것으로 보고되고 있다.

BAC 공정에서 BAC 부착 박테리아는 수중의 용존 유기물질의 생물분해뿐만 아니라 무엇보다도 활성탄의 표면 및 거대 세공에 흡착되는 또는 이전부터 흡착되어 있던 유기성 오염물질을 대사작용을 통해 기질로 이용한다.³⁾ 부착 박테리아들의 이러한 생태학적 활동들로 인해 생물활성탄 내에서는 지속적인 생물학적 재생이 이루어지므로 BAC 공정의 운영기간이 연장되는 효과를 유발한다.^{2,14)}

그러나 종속 영양성 박테리아에 의한 생물분해에 내성을

[†] Corresponding author E-mail: menuturk@hanmail.net Tel: 051-669-4788 Fax: 051-669-4669

가지는 일부 유기성 오염물질들의 경우에는 활성탄이 가지는 흡착용량에 도달하거나 초과하게 되면 BAC 공정 처리수의 농도가 오히려 높아지는 악영향을 초래한다.¹⁵⁾ 이와 같이 활성탄이 일부 오염물질들에 대한 흡착능을 완전히 소진한 경우 파과(breakthrough)에 도달한 것으로 평가하며, 신탄으로 교체하거나 파과에 도달한 활성탄을 재생(regeneration)하여 사용한다.¹⁶⁾

국내의 낙동강 하류에 위치한 대규모 정수장들에서는 다양한 목적으로 전염소 처리 공정을 운영 중이며,¹⁷⁾ 전염소 처리에 의해 생성된 소독부산물들 중 트리할로메탄(trihalomethanes, THMs)은 생물분해에 매우 강한 내성으로 인하여 생물활성탄 내에서 생물학적 재생은 불가능하여 활성탄의 교체시점을 판단하는데 있어 하나의 지표로 삼고 있다.¹⁸⁾

1995년도에 국내에서 최초로 도입된 낙동강 하류에 위치한 H 정수장의 오존/생물활성탄 공정은 운영비와 자체적으로 운영하고 있는 다단로의 부하 등을 고려하여 대략 3년을 주기로 재생을 하고 있는 실정이다. 현재 일부 활성탄은 7차 재생 후에 H-정수장의 BAC 공정에서 사용되고 있다.

본 연구에서는 열재생 조건이나 재생 주기의 변화는 없는 상태에서 단지 재생횟수의 증가가 수처리 효율에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 낙동강 하류에 위치한 H-정수장의 입상활성탄 여과지에 동일한 운전 시점은 아니지만 신탄과 재생횟수별 재생탄들을 충전하여 정수장의 운영·관리시 최종처리수의 유기성 오염물질의 지표로 사용되고 있는 용존 유기탄소(dissolved organic carbon, DOC)와 THMs에 대해 각각의 활성탄 여과지 처리 전·후의 농도를 측정하여 DOC와 THMs 흡착능을 재생에 따른 재생회수의 증가가 실제 정수장의 활성탄 공정에 미치는 영향을 파악하였다. 또한, 무엇보다 입상활성탄의 적절한 재생횟수 선정에 기초 자료를 제시하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 입상활성탄

본 실험에는 석탄계 재질의 활성탄 신탄(Virgin) 및 1차 재생탄(1st Regen.), 2차 재생탄(2nd Regen.), 1차 및 2차 재생 혼합탄((1st+2nd) Regen.), 1차 및 4차 재생 혼합탄((1st+4th) Regen.), 2차 및 3차 재생 혼합탄((2nd+3th) Regen.), 3차 및 4차 재생 혼합탄((3th+4th) Regen.), 4차 및 5차 재생 혼합탄((4th+5th) Regen.) 및 6차 재생탄(6th Regen.)이 사용되었다. 입상활성탄은 정수장에서 2년~3년 사용 후 재생하였으며, 재생은 24 m³/일 처리용량의 6단 다단로를 이용하였다. 6단 다단로에서 활성탄은 약 35분간 체류하며, 상부 1단과 2단은 건조 단계(200℃~300℃), 3단과 4단은 탄화 단계(400℃~600℃)이며, 5단과 6단은 활성화 단계(800℃ 정도)이다. 스팀 주입량은 활성탄 투입량 대비 1.0 kg/kg, 로 내의 압력은 -5~5 mmAq로 고정하였으며, 수율 80%를 기준으로 재생로를 운전하였다.

Table 1. Physicochemical characteristics of virgin and various regenerated GACs

No. of regeneration times	Apparent density (g/cc)	Ash (%)	Hardness (%)	I ₂ number (mg/g)
Virgin	0.46±0.02	8.0±0.22	99.9±0.5	1095±33
1 st Regen.	0.46±0.03	11.0±2.2	95.4±3.1	733±75
2 nd Regen.	0.43±0.00	12.8±1.6	93.5±7.5	699±117
(1 st +2 nd) Regen.	0.44±0.02	11.2±0.4	88.5±11.1	703±16
(1 st +4 th) Regen.	0.42	14.5	87.6	684
(2 nd +3 rd) Regen.	0.43	12.2	83.2	702
(3 rd +4 th) Regen.	0.44±0.02	12.1±0.2	80.7±25.2	691±63
(4 th +5 th) Regen.	0.43±0.02	11.5±0.5	82.7±0.0	695±22
6 th Regen.	0.43	12.9	83.5	666

실험에 사용된 신탄 및 재생탄들의 재생횟수 증가에 따른 물성치 변화를 Table 1에 나타내었다. 신탄 및 재생활성탄들은 열재생시(800℃) 세공붕괴로 인한 세공 크기의 증대로 충전 밀도(apparent density), 경도(hardness) 및 요오드(I₂ number)는 재생횟수가 증가함에 따라 점진적인 감소경향을 나타내었다. 또한, 회분(ash)의 경우는 재생에 의해 세공 내에 축적되어 있던 무기물질들이 재생시 산소와 접촉하여 증가하기 때문에 재생횟수가 증가함에 따라 점진적인 증가하였다.

2.2. 입상활성탄 공정 유입수 성상

2011년 1월부터 2016년 6월까지 5년 6개월 동안 낙동강 하류에 위치한 H-정수장의 입상활성탄 공정 유입수의 DOC와 THMs 평균, 최대 및 최소농도를 Table 2에 나타내었다. H-정수장은 전염소, 전오존, 응집-침전, 모래 여과 및 후오존-생물활성탄 공정으로 구성되어 있다. 실험기간 동안의 평균 생산량은 367,000 m³/일이었고, 유입수의 평균 DOC와 THMs 농도는 각각 1.85 mg/L과 27 µg/L였으며, 최대 및 최소농도에 많은 차이를 나타내었다. THMs의 경우는 하절기 고수온의 영향과 상수원수 중 조류농도 증가로 인해 하절기에 최대 54 µg/L까지 증가하였다. DOC의 경우도 하절기 조류농도 증가와 갈수기(동절기)시 원수 중의 유기물질 농축 영향에 의해 연중 입상활성탄 유입수 중의 DOC 농도 변화폭이 매우 크게 나타났다.

2.3. 입상활성탄 공정의 운영

입상활성탄 공정에서 활성탄 여과지는 총 18지로 지당 약 300 m³의 입상활성탄을 충전하였다. Table 3에는 2011년 1월부터 2016년 6월까지 5년 6개월 동안 사용된 신탄 및 다

Table 2. DOC and THMs concentrations of influent water during experiment periods

DOC (mg/L)			THMs (µg/L)		
Aver.	Max.	Min.	Aver.	Max.	Min.
1.85	2.56	1.33	27	54	8

Table 3. Numbers of experiments of virgin and various regenerated GACs during experiment periods

Virgin	Regeneration times										
	1 st	2 nd	(1 st +2 nd)	(1 st +4 th)	(2 nd +3 rd)	(2 nd +3 rd +4 th)	(2 nd +5 th)	(3 rd +4 th)	(3 rd +4 th +5 th)	(4 th +5 th)	6 th
9	4	4	2	1	4	1	1	3	1	2	1

양한 재생횟수를 가진 재생탄들이 각각의 입상활성탄 여과지들에 충전·운영되어진 횟수를 나타내었다. Table 3에서 볼 수 있듯이 신탄의 경우는 총 9번 충전·운영되었으며, 다양한 재생횟수별 재생탄들은 1회~4회 정도 충전·운영되었다. 또한, 재생횟수가 다른 재생탄들을 혼합하여 충전·운영한 경우는 괄호를 사용하여 나타내었다. 입상활성탄 여과지는 2년~3년의 주기로 신탄 또는 재생탄으로 교체하여 충전·운영하였고, 사용된 활성탄은 재생하여 다시 충전·사용되었다. 실험기간 동안 입상활성탄 여과지의 EBCT는 평균 21분 정도로 나타났다.

2.4. 활성탄 파과시점 결정

입상활성탄의 흡착효율 평가와 파과시점 결정을 위하여 각각의 입상활성탄 여과지별로 유입수와 유출수 중의 DOC와 THMs 농도를 주 1회 분석하였다. DOC의 파과시점은 잔존비(C/C_0)로 평가하여 월 평균 잔존비가 0.8에 도달한 시점을 파과시점으로 결정하였다. 입상활성탄 공정에서 DOC의 파과는 입상활성탄에 부착된 박테리아들에 의한 생물분해 및 생물학적 재생에 의한 효과로 유입수와 유출수의 잔존비가 1.0까지 도달하지 않고, 대략 0.8 부근에서 일정하게 유지된다.¹⁹⁾ 이러한 이유로 본 연구에서는 입상활성탄의 DOC에 대한 파과시점을 잔존비가 0.8에 도달한 시점으로 결정하였다. 또한, THMs는 DOC의 경우와는 달리 활성탄에 흡착 후 세공 내에서 생물분해에 의한 생물학적 재생이 불가능하다.¹⁵⁾ 따라서 유입수의 농도와 유출수의 농도가 월 평균으로 동일해지는 시점($C/C_0 = 1.0$)을 THMs 파과 시점으로 결정하였다.

2.5. 활성탄 물성치 및 수질 분석

실험에 사용된 신탄 및 재생횟수별 재생탄들의 재생 후의 물리·화학적 특성을 비교·평가하기 위하여 경도, 회분, 요오드가 및 충전밀도를 환경부 수처리제 기준에 준하여 분석하였다. 또한, 입상활성탄 공정의 유입수와 유출수 중의 DOC 농도는 초순수로 pre-washing한 0.45 μm 여지(Millipore, U.S.A.)로 여과한 여액을 TOC analyzer (5310C, Sievers, U.S.A.)로 분석하였다. 또한, THMs 농도는 headspace 전처리 장치(7697A, Agilent, U.S.A.)가 부착된 GC-ECD (7890A, Agilent, U.S.A.)로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 신탄 및 재생횟수별 재생탄의 DOC 및 THMs 파과 특성

실험기간 동안의 신탄과 다양한 재생횟수별 재생탄들에 대

한 DOC와 THMs 파과곡선들을 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 1과 Fig. 2의 DOC와 THMs의 파과곡선들은 2011년부터 2016년 10월까지 신탄 및 각각의 재생차수별 재생탄들에 대해 충전·사용되어진 여러 번의 운전결과를 평균하여 나타내었다.

Fig. 1에 나타난 DOC의 파과곡선들을 보면 활성탄을 충전·운영한 후 몇 개월간은 DOC 농도가 유입수 농도의 80% 이내를 유지하였으나 7개월에서 10개월 정도 운영한 이후에는 유출수의 DOC 농도가 유입수 DOC 농도의 80%(잔존비: 0.8)에 도달하였다. Fig. 3(a)에는 신탄과 다양한 재생횟수별 재생탄들에서의 DOC가 파과에 도달하는 개월 수(month)를 나타내었으며, 신탄의 경우는 평균적으로 운전 시작 후 약 8개월에 파과에 도달하였으나, 재생탄들의 경우는 파과에 도달하는 평균 개월 수가 7개월부터 10개월까지로 나타나 파과도달 시점에는 약간의 차이를 보였다. 또한, 특이한 점은 6차 재생탄(Fig. 1(l))을 제외한 나머지 재생탄들에서는 DOC의 파과도달 시점이 신탄과 동일하거나 오히려 신탄보다 연장되는 것으로 나타났다. 이러한 이유로는 활성탄의 열재생시 유발되는 세공의 증대효과와 관련이 있다.²⁰⁾ Son 등¹⁸⁾의 연구결과에서는 신탄에서는 15 Å 이하의 미세 세공이 분포비율이 높았으나, 재생횟수가 증가함에 따라 20 Å~100 Å 사이의 중간 세공의 분포비율이 증가하는 것으로 보고하고 있다. 미세 세공의 경우, 저분자 유기물질의 흡착에 유리한 반면 중간 세공은 수중에 존재하는 다양한 분자량대의 유기성 오염물질들의 흡착에 용이한 것으로 알려져 있다.¹⁾

Fig. 2에는 신탄 및 다양한 재생횟수별 재생탄들에서의 THMs 파과곡선을 나타내었다. THMs 파과곡선들의 경우는 DOC의 파과 경향과는 달리 신탄이 가장 늦게 파과에 도달하였고, 재생횟수가 증가할수록 파과시점이 점점 단축되는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 앞의 DOC의 파과 경향에서도 설명하였듯이 열재생에 의해 미세 세공이 감소하여 나타난 결과로 THMs는 활성탄에 흡착될 때 20 Å 이하의 미세 세공에 주로 흡착된다.¹⁵⁾ 따라서 재생횟수가 증가하여 미세 세공이 감소할수록 THMs의 흡착능은 감소한다.

Fig. 3(b)에는 신탄과 다양한 재생횟수별 재생탄들에서의 THMs가 파과에 도달하는 개월 수(month)를 나타내었으며, 신탄의 경우는 평균적으로 운전 시작 후 약 7개월(최소: 3개월, 최대: 13개월)에 파과에 도달하였으나, 재생탄들의 경우는 파과에 도달하는 평균 개월 수가 2개월부터 5개월까지로 나타나 파과도달 시점에 많은 차이를 나타내었다. 또한, DOC의 경우와는 달리 재생횟수가 증가할수록 파과에 도달하는 개월 수의 감소경향이 뚜렷이 나타나고 있다.

활성탄의 흡착능을 평균 파과도달 운전기간으로 평가해 보면, DOC는 신탄 및 다양한 재생횟수별 재생탄들 모두

Fig. 1. DOC breakthrough curves.

Fig. 2. THMs breakthrough curves.

Fig. 3. The months to reach the breakthrough of DOC and THMs according to the different number of regeneration times.

7~10개월 정도로 유사한 운전기간을 나타내어 재생횟수가 DOC의 흡착능에 미치는 영향은 미미한 것으로 평가되었다. 그러나 THMs의 경우는 평균 파과도달 운전기간의 범위가 신탄 및 다양한 재생횟수별 재생탄들에서 1~7개월로 나타났고, 재생횟수에 비례하여 파과도달 개월 수의 감소경향이 뚜렷이 나타나 재생횟수가 증가할수록 THMs 흡착능은 비례하여 현저히 감소하였다.

3.2. 신탄 및 재생횟수별 재생탄의 DOC 및 THMs 흡착량 평가

실험기간 동안의 신탄과 다양한 재생횟수별 재생탄들에서 DOC와 THMs가 파과에 도달하기까지 활성탄에 흡착된 흡착량을 계산하여 Table 4에 나타내었다. 신탄과 다양한 재생횟수별 재생탄들에서의 DOC와 THMs 흡착량 계산은 아래 식 (1)을 이용하여 구하였다.

$$A_{Total} = \sum_{M=1}^{M=BT} \{ (C_{In} - C_{Out}) \times Q_M \times 10^{-3} \} \quad (1)$$

여기서, A_{Total} (total adsorption amount)는 입상활성탄 지별 총 흡착량(kg), M (month)은 파과에 도달하는 개월 수, BT는 breakthrough, C_{In} (influent concentration)는 유입수의 월 평균 DOC 및 THMs 농도(mg/L), C_{Out} 는 유출수의 월 평균 DOC 및 THMs 농도(mg/L) 및 Q_m 는 월 처리수량($m^3/month$)을 의미한다.

Table 4에서 볼 수 있듯이 신탄의 각기 운전시점이 다른 9지의 활성탄 여과지에 대해 평가한 평균 8개월(평균 파과도

달 시점) 동안 활성탄 여과지 한 지당 평균 DOC 흡착량은 4246 kg으로 나타났으며, 재생횟수별 재생탄들의 경우는 6차 재생탄(6th)이 파과에 도달하기 전 7개월간 한 지당 3514 kg의 DOC를 흡착하였고, 3차 및 4차 재생 혼합탄(3th+4th)은 평균 10개월의 파과시점까지 한 지당 평균 4656 kg의 DOC를 흡착한 것으로 나타났다. 나머지 재생탄들의 경우는 파과시점까지 대략 한지 당 평균 4000 kg의 정도의 DOC를 흡착한 것으로 나타나 재생횟수가 증가하여도 DOC의 흡착량에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

또한, 파과시점까지의 평균 THMs 흡착량의 경우는 신탄을 충전하여 운전한 활성탄 여과지에서는 평균적으로 여과지 한 지당 60.6 kg의 THMs를 흡착한 반면, 1차 재생탄을 충전하여 운전한 여과지에서는 평균 44.8 kg, 2차 재생탄을 충전하여 운전한 경우는 한 여과지 당 평균 21.6 kg, 2차 및 5차 재생 혼합탄(2nd+5th)의 경우는 15.1 kg, 4차 및 5차 재생 혼합탄(4th+5th)의 경우는 11.0 kg 및 6차 재생탄(6th)의 경우는 한 여과지 당 10.8 kg의 THMs를 흡착하였다. 2차 재생 이후에는 신탄에 비해 THMs 흡착능이 1/3 이하로 저하되었으며, 4차 재생 이후(4th+5th)에는 1/6 이하로 감소하는 것으로 평가되었다.

4. 결론

실제 정수장에서 신탄과 재생횟수별 다양한 재생탄들을 충전하여 운영하면서 DOC와 THMs의 파과 특성, 파과 도달 개월 수 및 흡착량을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

Table 4. Total adsorption amount (kg) of DOC and THMs according to the virgin and different regeneration times of each GACs basin

GAC	Virgin		Regenerated																					
			1 st		2 nd		(1 st +2 nd)		(1 st +4 th)		(2 nd +3 rd)		(2 nd +3 rd +4 th)		(2 nd +5 th)		(3 rd +4 th)		(3 rd +4 th +5 th)		(4 th +5 th)		6 th	
	DOC	THMs	DOC	THMs	DOC	THMs	DOC	THMs	DOC	THMs	DOC	THMs	DOC	THMs	DOC	THMs	DOC	THMs	DOC	THMs	DOC	THMs	DOC	THMs
Min.	3189	25.0	3656	15.5	2841	8.1	3227	12.7	-	-	3012	8.6	-	-	-	-	3471	8.8	-	-	3520	5.8	-	-
Max.	4870	91.1	5714	65.1	4638	37.6	4806	39.2	-	-	4528	34.1	-	-	-	-	6502	38.6	-	-	4512	16.2	-	-
Ave.	4246	60.6	4394	44.8	3979	21.6	4017	26.0	4136	18.4	3997	19.6	4281	5.2	4139	15.1	4656	23.7	4339	19.2	4016	11.0	3514	10.8

1) 활성탄의 물리·화학적 특성을 나타내는 충전밀도, 회분 및 경도의 경우 재생횟수가 증가할수록 급작스런 변화 없이 점진적으로 감소 또는 증가하였으나, 요오드 흡착능은 신탄을 재생한 1차 재생 후부터 급감하였다.

2) 신탄은 평균 8개월 정도 운전하면 DOC가 파과에 도달하였고, 한 지당 평균 4246 kg의 DOC를 흡착하였다. 재생 횟수에 관계없이 재생탄들도 운전 7개월~10개월 후에 DOC가 파과에 도달하였으며, 한 지당 평균 3514 kg~4656 kg의 범위로 DOC를 흡착하여 재생횟수가 증가하여도 DOC 흡착능은 신탄과 유사하였다.

3) THMs의 경우, 신탄은 평균 7개월 정도 운전으로 파과에 도달하였고, 한 지당 평균 60.6 kg을 흡착하였으나, 재생횟수가 1차, 2차 및 그 이상 증가할수록 THMs 평균 파과 도달 기간이 평균 4개월, 2개월 및 1개월 정도로 감소하였으며, 한 지당 평균 흡착량도 신탄의 60.6 kg에 비해 재생횟수가 1차, 2차 및 6차로 증가할수록 한 지당 평균 44.8 kg, 21.6 kg 및 10.8 kg을 흡착한 것으로 나타났다.

4) 입상활성탄의 적절한 재생횟수 선정을 위해 DOC를 지표로 활용할 경우, 6차까지 재생하여도 DOC 흡착능은 거의 신탄과 유사한 수준이었으나, THMs를 선정 지표로 활용하면 2차 재생 이후에는 THMs 흡착능이 신탄의 1/3 수준으로 저하되었고, 4차 재생 이후에는 1/6 수준으로 저하되었다.

KSEE

References

- Na, Y. S., Ryu, D. C., Kim, S. G., Bae, E. Y., Song, M. J., Son, H. J. and Lee, S. J., "Characteristics of water treatment by virgin and reactivated granular activated carbon on the full-scale BAC process," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **23**(6), 1001~1012(2001).
- Nishijima, W. and Speitel, G. E., "Fate of biodegradable dissolved organic carbon produced by ozonation on biological activated carbon," *Chemosphere*, **56**, 113~119(2004).
- Simpson, D. R., "Biofilm processes in biologically active carbon water purification," *Water Res.*, **42**, 2839~2848(2008).
- Kasuga, I., Nakagaki, H., Kurisu, F. and Furumai, H., "Abundance and diversity of ammonia-oxidizing archaea and bacteria on biological activated carbon in a pilot-scale drinking water treatment plant with different treatment processes," *Water Sci. Technol.*, **61**, 3070~3077(2010).
- Aktas, O. and Cecen, F., "Bioregeneration of activated carbon: a review," *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, **59**, 257~272(2007).
- Reungoat, J., Macova, M., Escher, B. I., Carswell, S., Mueller, J. F. and Keller, J., "Removal of micropollutants and reduction of biological activity in a full scale reclamation plant using ozonation and activated carbon filtration," *Water Res.*, **44**, 625~637(2010).
- Yapsakli, K. and Cecen, F., "Effect of type of granular activated carbon on DOC biodegradation in biological activated carbon filters," *Process Biochem.*, **45**, 355~362(2010).
- Wang, H., Ho, L., Lewis, D. M., Brookes, J. D. and Newcombe, G., "Discriminating and assessing adsorption and biodegradation removal mechanisms during granular activated carbon filtration of microcystin toxins," *Water Res.*, **41**, 4262~4270(2007).
- Son, H. J., Lee, J. K., Kim, S. G., Park, H. K. and Jung, E. Y., "Removal characteristics of geosmin and MIB in BAC process : biodegradation and adsorption," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **39**(6), 318~324(2017).
- Reungoat, J., Escher, B. I., Macova, M. and Keller, J., "Bio-filtration of wastewater treatment plant effluent : effect removal of pharmaceuticals and personal care products and reduction of toxicity," *Water Res.*, **45**, 2751~2762(2011).
- Seo, C. D., Son, H. J., Jung, J. M., Choi, J. T., Ryu, D. C. and Jang, S. H., "Biodegradation of UV filters in biological activated carbon (BAC) process : biodegradation kinetic," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **36**(11), 739~746(2014).
- Wang, J., Liu, G. F., Lu, H., Jin, R. F., Lei, T. M., Zhang, W. and Yang, H., "Biodegradation of bromoamine acid using combined airlift loop reactor and biological activated carbon," *Bioresour. Technol.*, **102**, 4366~4369(2011).
- Chu, W. H., Gao, N. Y., Yin, D. Q., Deng, Y. and Templeton, M. R., "Ozone-biological activated carbon integrated treatment for removal of precursors of halogenated nitrogenous disinfection by-products," *Chemosphere*, **86**, 1087~1091(2012).
- Scharf, R. G., Johnston, R. W., Semmens, M. J. and Hozalski, R. M., "Comparison of batch sorption tests, pilot studies, and modeling for estimating GAC bed life," *Water Res.*, **44**, 769~780(2010).
- Son, H. J., Roh, J. S., Kim, S. G., Bae, S. M. and Kang, L. S., "Removal characteristics of chlorination disinfection by-products by activated carbon," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **27**(7), 762~770(2005).
- AWWA Standard B605-07, "Reactivation of granular activated carbon," Foreword ix~xi(2007).
- Lee, J. K., Son, H. J., Kim, S. G., Hwang, Y. D. and Ryu, D. C., "Effect of pH control, ozonation and coagulation on THMs formation in drinking water treatment process of the downstream of Nakdong river," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **39**(3), 105~111(2017).
- Son, H. J., Ryu, D. C. and Jang, S. H., "Effect of pore structure change on the adsorption of NOM and THMs in water due to the increase of reactivation number of coal-based activated carbon," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **32**(10), 965~972(2010).
- Son, H. J., Yoo, S. J. and Yoo, P. J., "Biological activated carbon (BAC) process in water treatment," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **31**(4), 308~323(2009).
- Moore, B. C., Cannon, F. S., Westrick, J. A., Metz, D. H., Shrive, C. A., DeMacro, J. and Hartman, D. J., "Changes in GAC pore structure during full-scale water treatment at Cincinnati: a comparison between virgin and thermally reactivated GAC," *Carbon*, **39**, 789~908(2001).