

활성탄소섬유 카트리지 필터에 의한 수중 잔류염소의 흡·탈착 거동

송승필 · 이재광 · 유승곤[†]

충남대학교 공과대학 화학공학과
(1999년 9월 21일 접수, 1999년 12월 27일 채택)

Adsorption/Desorption Behavior of Residual Chlorine from Aqueous Solution by Activated Carbon Fiber Cartridge Filter

Seung-Phill Song, Jae-Kwang Lee and Seung-Kon Ryu[†]

Dept. of Chem. Eng., Chungnam National University, Taejeon 305-764, Korea
(Received 21 September 1999; accepted 27 December 1999)

요 약

활성탄소섬유 카트리지 필터를 제조하고 이 필터의 수중 잔류염소 흡착 및 탈착 거동을 조사하였다. 2 ppm 잔류염소의 흡착과과곡선에서 0.2 ppm의 잔류염소농도를 과과점으로 할 때, 과과점까지 활성탄소섬유 카트리지 필터(Activated Carbon Fiber 함량: 100 g)는 31.5 ton, 활성탄소섬유/활성탄 카트리지 필터(Activated Carbon Fiber 함량: 50 g, Activated Carbon 함량: 50 g)는 8.4 ton을 정수하였다. 카트리지 필터에 의한 압력손실은 유량이 10 l/min일 경우, 활성탄소섬유 필터의 경우는 120 ton 처리까지 0.2 kg/cm² 미만이나, 활성탄소섬유와 활성탄을 1:1로 혼합하여 만든 경우는 120 ton 처리까지 2.3 kg/cm²이었다. 카트리지 필터의 탈착은 90 °C의 뜨거운 물로 역세척하여 수행하였다. 충분히 역세척이 이루어진 카트리지 필터의 과과점까지의 제2차 수중 잔류염소 흡착실험으로 탈착률(재생률)을 검사하였다. 그 결과 활성탄소섬유로만 사용한 카트리지 필터의 탈착률은 70.5%이었으나, 활성탄소섬유와 활성탄을 1:1로 혼합하여 만든 카트리지 필터의 탈착률은 36.9%이었다. 활성탄소섬유 카트리지 필터의 탈착률은 역세척수의 온도가 상승할수록 상승했으며, 활성탄이 더해짐에 따라 잔류염소 탈착률이 감소했다.

Abstract – Cylindrical Activated Carbon Fiber cartridge filters were prepared to investigate their adsorption/desorption behavior of residual chlorine from 2 ppm aqueous solution. From breakthrough profiles, the amount of purified water was 31.5 ton with Activated Carbon Fiber cartridge filter(Activated Carbon Fiber: 100 g) while only 8.4 ton with Activated Carbon Fiber/Activated Carbon cartridge filter(Activated Carbon Fiber: 50 g, Activated Carbon: 50 g) at the breakpoint when the breakpoint was fixed to 0.2 ppm(C/C₀=0.1) residual chlorine. The pressure drop through Activated Carbon Fiber and Activated Carbon Fiber/Activated Carbon cartridge filter were 0.2 kg/cm² and 2.3 kg/cm², respectively, when 120 ton aqueous solution was passing the cartridges at 10 l/min flow rate. The desorption of chlorine from fully used cartridges was performed by reverse washing with hot water at 90 °C. The desorption efficiency of cartridge was determined by comparison the 2nd adsorption capacity of residual chlorine with the 1st adsorption capacity at breakpoint. The desorption efficiency of Activated Carbon Fiber cartridge was 70.5% while that of Activated Carbon Fiber/Activated Carbon cartridge was 36.9%. The desorption efficiency of cartridge increased with the temperature of washing water and decreased with the amount of Activated Carbon charged in cartridge.

Key words: Adsorption, Desorption, Activated Carbon Fiber Cartridge Filter, Activated Carbon Fiber, Regeneration, Residual Chlorine

1. 서 론

수중의 유기물을 제거하기 위해서는 활성탄이 널리 사용되고 있으나, 입상 활성탄을 흡착탑의 흡착제로 사용하면 탑내에 편류현상(channeling)과 압력손실(pressure drop)이 발생하여 비효과적이다. 최근에 개발된 섬유상 활성탄은 비표면적과 세공용적이 입상 활성탄 보

다 훨씬 클 뿐만 아니라 발달된 세공이 모두 미세공이고 표면에 노출되어 있어서 흡착질에 대한 확산 저항이 없기 때문에 흡착속도가 빠르고 흡착용량이 크다. 또한 기본 형태가 섬유이므로 직포, 부직포, 종이 등으로 성형하여 사용할 수 있다. 심 등[1]은 활성탄소섬유를 이용하여 수중의 중금속의 흡착을, 이 등[2]은 활성탄소섬유 카트리지 필터를 사용한 수중의 잔류염소를 제거하는 실험을 하여, 활성탄소섬유의 흡착성능을 보고하였다. 또한, 박 등[3]은 수용액상의 여러 가지 중금속이온을 입상활성탄과 활성탄소섬유로 흡착 실험하여 성능을 비

[†]E-mail: skryu@hanbat.chungnam.ac.kr

교하고 활성탄소섬유가 훨씬 우수함을 보고하였다.

한편, 활성탄소섬유 카트리지 필터의 재생에 관한 연구는 아직까지 보고된 바가 없다. 따라서, 본 연구는 정수용 활성탄소섬유 카트리지 필터를 사용하여 수돗물내의 잔류염소를 흡착시키고 이를 다시 탈착시켜 활성탄소섬유 카트리지 필터의 잔류염소 흡착력 및 재생력을 검토하는데 목적이 있다.

2. 실험

2-1. 실험재료

실험에 사용한 활성탄소섬유(Activated Carbon Fiber, 이하 ACF)는 일본 Toyobo사 KF-15(비표면적 $1,500 \text{ m}^2/\text{g}$)이다. 이를 (주)코리아 ACF에서 약 4 mm 길이로 짧게 자르고 진공 압축방법으로 내경 30 mm, 외경 65 mm, 길이 250 mm의 원통형 정수형 카트리지로 성형하였다. 성능을 비교하기 위하여 활성탄소섬유와 활성탄(일본 Kuraray Chemical Co., Ltd. AC-48, Activated Carbon(이하 AC)을 무게비 1:1로 섞어 성형한 것을 준비하였다. 실험에 사용한 시약은 차아염소산 칼슘($\text{CaCl}_2 \text{ O}_2$, 시약급)으로 정제처리한 수돗물에 용해시키고 희석하여 사용하였다. 잔류염소 분석은 미 환경보건국 수질 처리방법인 'Standard Methods'의 수중 잔류염소측정에 관한 기준 중 분광광도도를 이용한 방법 [4]에 따라 자외선 분광광도계(일본 Shimadzu사, UV-2401PC)로 시행하였다. Table 1에서는 실험에 사용한 ACF와 AC의 물성치를 나타내었다.

2-2. 실험방법

Table 1. Physical properties of AC and ACF

	AC-48	ACF-15
Apparent particle density($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.40-0.46	0.03-0.10
Grain size(mm), fibrous diameter(μm)	0.149-0.297(mm)	15.4-22.4(μm)
Precursor	Coconut	Viscose rayon
Specific surface area($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	1150	1500
Micropore fraction(%)	56.3	98.6

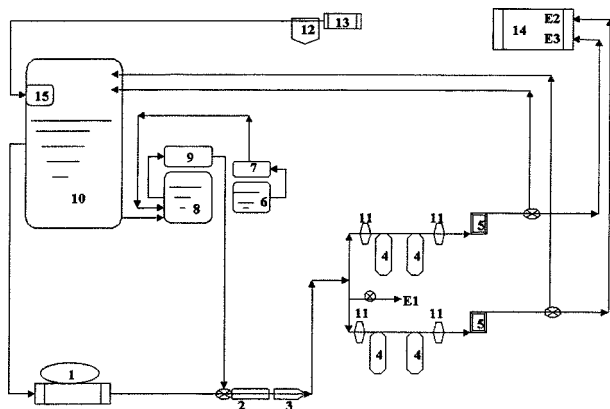


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

1. Water pump
2. In-line mixer
3. Relief valve
4. ACF filter
5. Flow meter
6. Chlorine tank
7. Peristaltic pump
8. Feed reservoir
9. Metering pump
10. Water reservoir
11. Pressure gauge
12. Prefilter
13. Tap water line
14. Drain line
15. Hydraulic controller
- E1. E2. E3. Sampling port

ACF 카트리지 필터의 정수실험은 이전에 보고[2]된 정수실험장치를 사용하여 시행하였다. 즉, 염소수용액의 유입농도 2 ppm, 유량 10 l/min, 수온 25 °C의 조건에서 ACF 카트리지 필터를 통과하는 유출액의 농도를 시간별로 측정하여 파과곡선을 그리고 정수능력을 분석하였다. 정수 장치는 Fig. 1에 도시하였다.

ACF 카트리지 필터의 탈착은 파과곡선에서 유출되는 물의 잔류염소농도가 더 이상 증가하지 않는다고 판단되는 시점(ACF: 처리수 120 ton, ACF/AC: 처리수 95 ton)에서 흡착실험을 멈추고 카트리지를 꺼내어 105 °C에서 2시간 건조한 후, 뜨거운 물(80 °C, 90 °C, 100 °C)로 4시간 동안 역세척하여 수행하였다. ACF 카트리지 필터의 가열탈착장치는 Fig. 2와 같다. 그림에서 1차 증류수를 항온조에 채우고 높은 온도를 유지시킨 후에 카트리지 필터 정수기의 출구쪽으로 공급하여 역세척하였다. 압력 게이지를 재생 필터 앞·뒤에 설치하여 압력차를 측정하고, 유량은 흡착시와 같은 조건인 10 l/min와 5 l/min, 2.5 l/min로 수행하였다.

ACF 카트리지 필터의 탈착률(재생률)은 역세척한 카트리지 필터를 105 °C에서 2시간 건조한 후, 다시 잔류염소 흡착실험을 수행하여 유출액의 잔류염소농도가 0.2 ppm이 되는 시점을 파과점(breakpoint, $C/C_0=0.1$)으로 선정하고, 파과점($C/C_0=0.1$)까지 통과된 수량의 1차 통과

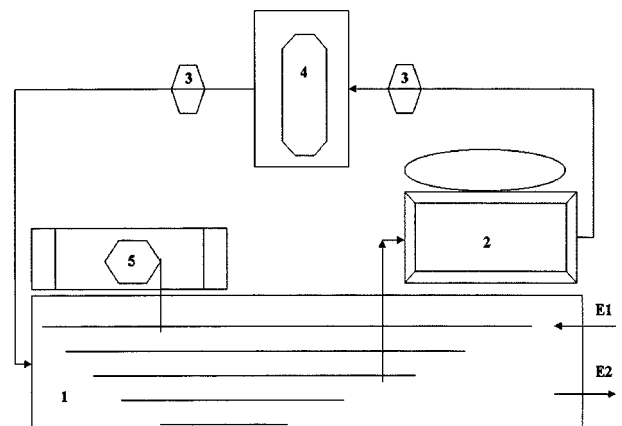


Fig. 2. Regeneration system of used ACF cartridge filter.

1. Thermostat
2. Water pump
3. Pressure gauge
4. The used ACF cartridge filter
5. Digital thermometer
- E1. Inlet port
- E2. Outlet

Table 2. Regeneration conditions of AC/ACF and ACF cartridge filter

Run	Materials	T_r (°C)	N_{rc} (-)	q (l/min)
1	ACF/AC	80	1	10
2	ACF/AC	90	1	10
3	ACF/AC	100	1	10
4	ACF/AC	90	2	10
5	ACF/AC	90	3	10
6	ACF/AC	90	1	5
7	ACF/AC	90	1	2.5
8	ACF	80	1	10
9	ACF	90	1	10
10	ACF	100	1	10
11	ACF	90	2	10
12	ACF	90	3	10
13	ACF	90	1	5
14	ACF	90	1	2.5

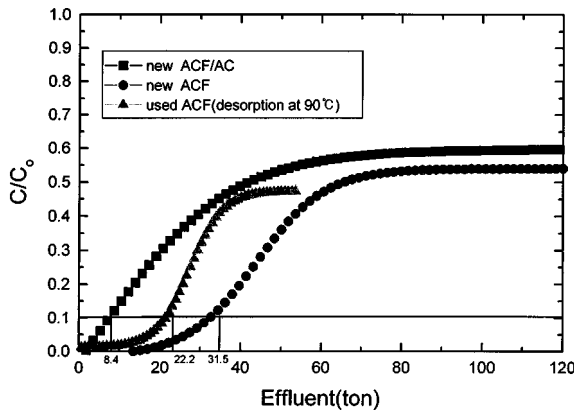


Fig. 3. Breakthrough curves of residual chlorine on ACF cartridge filter and regenerated ACF cartridge filter(backwashed by 90 °C water, 4 hr, 10 l/min), ($C_0=2$ ppm, 10 l/min, temp.=298 K).

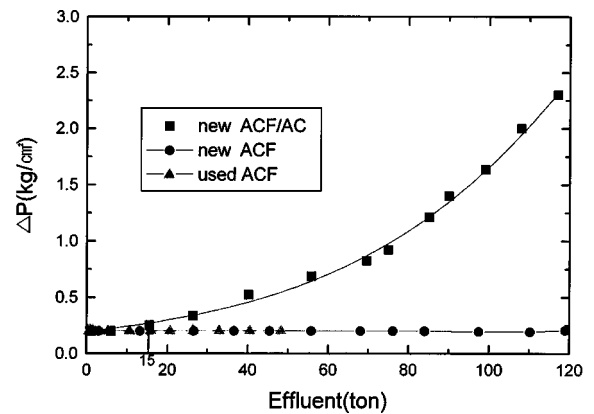


Fig. 4. Pressure drop of ACF/AC and ACF cartridge filter($C_0=2$ ppm, 10 l/min, temp.=298 K).

량에 대한 백분율로 정의하였다. Table 2에 카트리지 필터의 탈착조건을 정리하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 여러 가지 ACF 카트리지 필터를 통과한 잔류염소의 파괴곡선들을 도시한 것이다. 정수실험을 실시한 결과 유출되는 잔류염소는 초기 농도의 50%에 이른 후부터는 거의 일정해지고 있다. 이것은 아직까지 사용되지 않은 다소 큰 세공이 흡착활동을 계속하고 있기 때문으로 판단된다. 새 카트리지의 파괴점($C/C_0=0.1$)에서의 유출량은 평균 31.5 ton이었으나, ACF와 AC를 1:1로 섞어 만든 카트리지 필터는 8.4 ton에 지나지 않았다. 즉, AC를 섞으면 파괴점까지의 유출량이 크게 감소하는데 이는 AC의 비표면적이 $1,150 \text{ m}^2/\text{g}$ 으로 ACF의 비표면적 $1,500 \text{ m}^2/\text{g}$ 보다 작고 세공구조가 다르기 때문이다. 120 ton 유출이 있는 후 사용한 카트리지를 90 °C의 뜨거운 물로 10 l/min 유량으로 4시간동안 역세척한 다음, 다시 파괴점까지 제2차 수중 잔류염소 흡착실험을 한 결과 22.2 ton을 정수하였다. 파괴점을 기준으로 할 때 새 카트리지 필터에 대한 재생률($\eta_r=Q_{br}/Q_b$)은 70.5%에 이르러서 ACF:AC 결합 카트리지 필터 보다 우수하였다. 또한 2차 재생에서도 재생률이 45.1%에 이르는 것을 알 수 있다. 이렇게 ACF 카트리지 필터의 재생률이 높은 것은 ACF의 기공은 흡착에 관여하는 미세기공이 대부분을 차지하는데 반해 분말상인 AC는 흡착에 직접 관여하지 않은 대기공과 증기공이 상대적으로 높으며 미세기공에 흡착된 흡착질을 역세정시키려면 탈착매질이 대기공과 증기공을 거쳐야 한다. ACF는 미세공만으로 이루어져 있고 이들이 외부에 직접 노출되어 있어 상대적으로 유리하다고 할 수 있다[5]. 이는 박 등[3]이 수용액으로부터 중금속이온 흡착실험에서 활성탄소섬유가 활성탄에 비해 흡착용량이나 흡착처리 속도가 매우 우수했다는 결과와 일치한다. 또한, Brasquet 등[6]도 발표한 수용액상의 페놀류 흡착실험에서 활성탄소섬유의 흡착속도가 활성탄보다 훨씬 빠르다고 보고했다.

Fig. 4는 정수 흡착실험시에 카트리지 필터의 전·후 압력손실을 측정된 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 ACF 카트리지 필터는 120 ton을 처리해도 압력손실이 $0.2 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 이었으며, 재생 카트리지 필터 역시 압력 손실이 새 것과 같았다. 그러나, ACF/AC 카트리지 필터는 유량 15 ton부터 서서히 압력손실이 증가하여 70 ton 이후부터는 급격히 증가하여 120 ton의 처리에서는 $2.3 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 에 이르렀다. 김 등[7]은 입상 AC와 입도 분포가 비슷한 이온교환수지로 구리이온을 제거하는 실험에서 고정층에서 압력손실이 발생한다고 보고하였다. 본

실험에서도 입상 AC를 섞어 제조한 카트리지 필터에서는 압력손실이 발생하였으나, ACF만으로 제조한 카트리지 필터는 압력손실이 걸리지 않았다. 이것은 ACF의 미세기공구조가 활성탄과 달리 모두 관통되어 있기 때문이다.

Fig. 5와 6은 재생온도를 80 °C, 90 °C, 100 °C로 변화시키면서 수행한 재생 ACF/AC 카트리지 필터와 재생 ACF 카트리지 필터의 잔

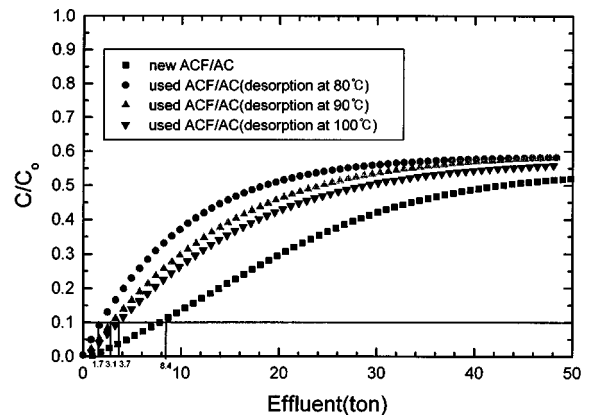


Fig. 5. Breakthrough curves of residual chlorine on regenerated ACF/AC cartridge filter(80 °C, 90 °C and 100 °C regenerated; backwashed by hot water, 4 hr, 10 l/min).

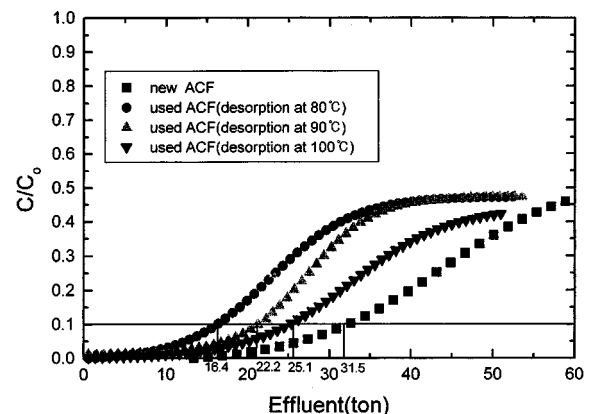


Fig. 6. Breakthrough curves of residual chlorine on regenerated ACF cartridge filter(80 °C, 90 °C and 100 °C regenerated; backwashed by hot water, 4 hr, 10 l/min).

류염소 흡착 파괴곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 ACF 카트리지 필터나 ACF/AC 카트리지 필터 모두 재생온도가 증가할수록 재생 효율이 증가하는 것으로 나타났다. 박 등[8]은 기상실험에서 탈착가스의 온도가 증가할수록 탈착효율이 증가하고 탈착시간도 줄어들음을 보였다. 본 실험에서도 기상실험과 유사하게 역세척한 온도가 증가할수록 재생 효율이 증가함을 보였다. 즉, 역세척한 온도가 높을수록 탈착이 유리하므로 카트리지의 재생은 그 온도가 매우 중요한 역할을 하고 있다.

재생률(η_r)은 다음과 같이 정의하여 계산하였다.

$$\eta_r(\%) = \frac{Q_{b,r}}{Q_b} \times 100$$

여기서, Q_b 는 새로운 ACF cartridge filter의 파괴점(ton)이고, $Q_{b,r}$ 는 재생한 ACF cartridge filter의 파괴점(ton)이다.

Fig. 7과 8은 재생시에 사용한 뜨거운 물의 유량에 따른 재생 ACF 카트리지 필터와 ACF 카트리지 필터의 정수 파괴곡선을 나타내었다. 그림에서 재생시의 사용 유량이 증가할수록 재생성이 높아지는 것으로 나타났다. 박 등[8]이 탈착가스의 유량이 증가하여도, 단순히 탈착률이 증가하는 것이 아니라 탈착에 필요한 탈착가스의 최적의 유량이 있다고 발표하였다. 하지만 본 실험에서는 폐카트리지를 역세척하는 뜨거운 물의 유량이 증가하면, 폐카트리지의 재생률이 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 역세척하는 물의 유량이 증가하면 카

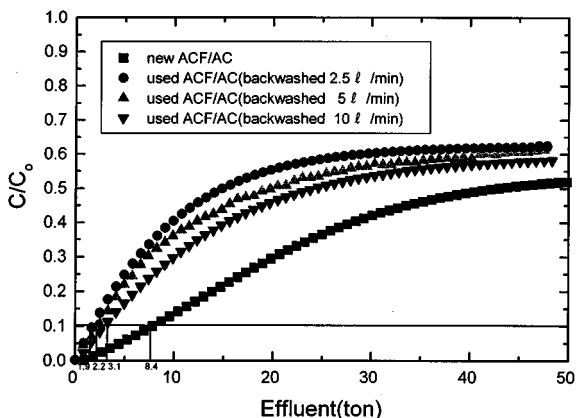


Fig. 7. Breakthrough curves of residual chlorine on regenerated ACF/AC cartridge filter(backwashed by 10, 5 and 2.5 l/min; regeneration by 90 °C water, 4 hr).

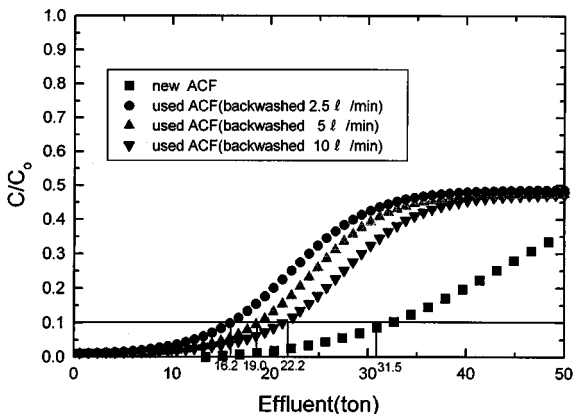


Fig. 8. Breakthrough curves of residual chlorine on regenerated ACF cartridge filter(backwashed by 10, 5 and 2.5 l/min; regeneration by 90 °C water, 4 hr).

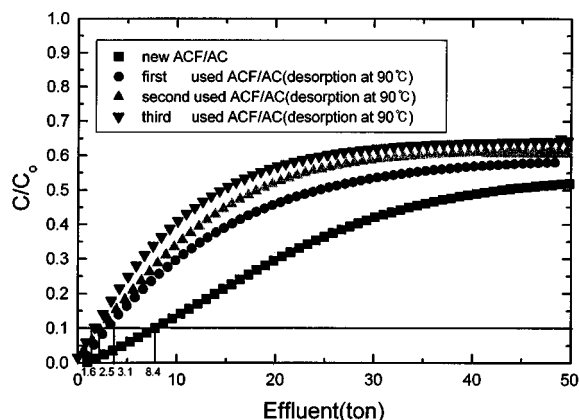


Fig. 9. Breakthrough curves of residual chlorine on regenerated ACF/AC cartridge filter(first, second and third regenerated; backwashed by 90 °C water, 4 hr, 10 l/min).

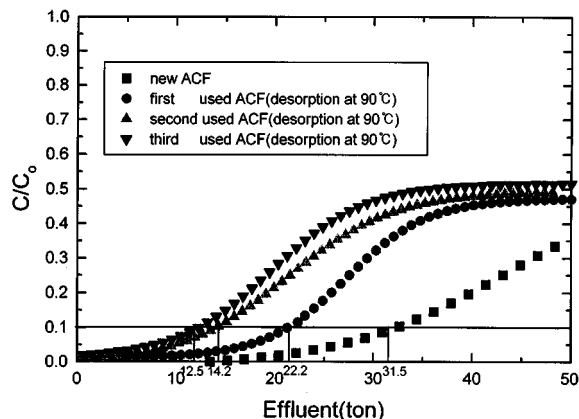


Fig. 10. Breakthrough curves of residual chlorine on regenerated ACF cartridge filter(first, second and third regenerated; backwashed by 90 °C water, 4 hr, 10 l/min).

트리지내에 흡착제에 흡착된 흡착질과 탈착매질인 뜨거운 물과의 농도차이가 증가하여 카트리지 필터의 탈착률이 증가하는 것으로 판단된다.

Fig. 9와 10은 재생횟수에 따른 재생 ACF/AC 카트리지 필터와 ACF 카트리지 필터의 정수흡착 파괴곡선을 나타내었다. 그림에서 재생횟수가 증가하면 재생성이 떨어지는 것으로 나타났다. 강 등[9]은 폐활성탄을 열재생한 실험에서 탄산가스 수증기 질소의 혼합가스를 반응기 내에 공급하면서 650 °C의 온도로 재생시키면 10분에서 20분 사이에 흡착제 자체가 열분해되어서 재생횟수가 1회 증가할수록 활성탄무게도 1.5%정도 감소한다고 발표하였다. 하지만, 본 실험에서는 100 °C 이내의 끓는 물로 역세척하므로 흡착제 자체가 열분해되어 무게가 줄어드는 현상이 발생하지 않았다.

Table 3은 각각의 탈착조건에 대한 ACF/AC 카트리지 필터와 ACF 카트리지 필터의 재생률을 표시하였다. 표에서 재생온도가 높을수록, 재생 유량이 많을수록, 재생횟수가 적을수록, AC 함량이 적을수록 재생 효율이 증가하는 것으로 나타났다. 특히, AC와 ACF가 섞인 카트리지 필터의 경우는 각각의 조건에서 재생률이 45%를 넘지 못하였다. 하지만, ACF 카트리지 필터의 경우는 재생횟수가 2, 3회인 경우를 제외하고는 각각의 조건에서 재생률이 50%이상을 보이고 있다. 이는 앞에서도 언급한 바 있는 ACF가 AC보다 흡착속도가 빠를 뿐만 아니라, 탈착 후의 재생도 더 잘 이루어지기 때문으로 생각된다.

Table 3. Characteristics of regenerated AC/ACF and ACF cartridge filter

Run	Materials(condition)	$Q_{b,r}$ (ton)	Q_b (ton)	Q_b (hr)	η_r (%)
1	ACF/AC(80/1/10)	1.7	8.4	2.8	20.2
2	ACF/AC(90/1/10)	3.1	8.4	5.2	36.9
3	ACF/AC(100/1/10)	3.7	8.4	6.2	44.0
4	ACF/AC(90/2/10)	2.5	8.4	4.2	29.8
5	ACF/AC(90/3/10)	1.6	8.4	2.7	19.0
6	ACF/AC(90/1/5)	2.2	8.4	3.7	26.2
7	ACF/AC(90/1/2.5)	1.9	8.4	3.2	22.6
8	ACF(80/1/10)	16.4	31.5	27.3	52.1
9	ACF(90/1/10)	22.2	31.5	37.0	70.5
10	ACF(100/1/10)	25.1	31.5	41.8	79.7
11	ACF(90/2/10)	14.2	31.5	23.7	45.1
12	ACF(90/3/10)	12.5	31.5	20.8	39.7
13	ACF(90/1/5)	19.0	31.5	31.7	60.3
14	ACF(90/1/2.5)	16.2	31.5	27.0	51.4

*: Input conc.=2 ppm, flow rate=10 l/min, temp.=298 K, breakthrough point ($C/C_0=0.1$)=0.2 ppm

4. 결 론

활성탄소섬유 카트리지 필터에 의한 2 ppm 잔류염소의 흡착과 과극선에서 0.2 ppm의 잔류염소농도를 과과점으로 할 때, 활성탄소섬유 카트리지 필터(100 g)는 31.5 ton을 정수하였고, 압력손실은 유량이 10 l/min 일 경우, 0.2 kg/cm² 미만이었다. 활성탄소섬유와 활성탄을 1:1로 혼합하여 제작한 카트리지 필터는 과과점까지의 정수량이 감소하였고 압력손실은 2.3 kg/cm²로 증가하여 충분히 포화흡착된 카트리지 필터의 뜨거운 물에 의한 역세척 결과, 90 °C에서 역세척한 카트리지 필터의 과과점까지의 재생률은 70.5%이었다. 활성탄소섬유와 활성탄을 1:1로 혼합하여 만든 카트리지 필터의 재생률은 36.9%이었다. 활성탄소섬유 카트리지 필터의 탈착은 온도의 증가에 비례하였으며, 활성탄이 더해짐에 따라 재생률이 떨어졌다.

사용기호

- C : concentration of adsorbate in fluid [mg/l, ppm]; C_0 in feed : C_e in equilibrium
 q : volumetric flow rate of hot water in desorption [l/min]
 Q : the amount of treated aqueous solution [ton], Q_b at break point for ACF cartridge filter; $Q_{b,r}$ at break point for regenerated ACF cartridge filter
 T : temperature [°C, K]; T_r at regeneration of ACF cartridge filter

그리스 문자

- η_r : regeneration efficiency [%], $(Q_{b,r}/Q_b) \times 100$
 N_{rc} : number of regeneration cycle

참고문헌

1. Shim, J. W., Jung, H. H., Jung, C. H., Oh, W. Z. and Ryu, S. K.: *HWAHAK KONGHAK*, **35**, 162(1997).
2. Lee, J. K., Ko, C. Y. and Ryu, S. K.: *HWAHAK KONGHAK*, **36**, 235(1998).
3. Park, H. Y., Shin, J. H., Kim, J. W., Lee, C. H. and Kim, W. S.: *HWAHAK KONGHAK*, **37**, 198(1999).
4. Arnold, E. G., Lenore, S. C. and Andrew, D. E.: "Standard Methods," 4500-Cl, DPD Colorimetric Method, American Public Health Association(1992).
5. Kim, Y. O., Ko, K. R., Park, Y. T. and Ryu, S. K.: *HWAHAK KONGHAK*, **30**, 347(1992).
6. Brasquet, C. and Cloirec, P. L.: *Carbon*, **35**, 1307(1997).
7. Kim, S. J., Park, Y. G. and Moon, H.: *Korean J. Chem Eng.*, **15**, 417 (1998).
8. Park, J. H., Jun, J. H., Hwang, K. S. and Lee, W. K.: *HWAHAK KONGHAK*, **33**, 301(1995).
9. Kang, S. H. and Rhew, D. W.: *HWAHAK KONGHAK*, **13**, 253(1975).