

상수원수 내 이취미 제거효율 향상을 위한 분말활성탄 투입지점의 평가

Evaluation on the Locations of Powdered Activated Carbon Addition for Improvement of Taste and Odor Removal in Drinking Water Supplies

김영일¹ · 이상진¹ · 배병욱^{2,*}

Kim, Young-Il¹ · Lee, Sang-Jin¹ · Bae, Byung-Uk^{2,*}

1 충남발전연구원 충청남도수질총량관리센터
2 대전대학교 환경공학과

(2007년 3월 19일 논문 접수; 2007년 6월 14일 최종 수정논문 채택)

Abstract

The efficiency of powdered activated carbon (PAC) for removing taste and odor (T&O) in drinking water supplies is dependent on the contact time, quality of mixing, and the presence of competing compounds. All of these are strongly influenced by the stage in the treatment process at which the PAC is added. In conventional water treatment plants (WTPs), PAC is commonly added into the rapid mixing basin where chemicals such as coagulants, alkaline chemicals, and chlorine, are simultaneously applied. In order to prevent interference between PAC and other water treatment chemicals, alternative locations for addition of PAC, such as at transmission pipe in the water intake tower or into a separated PAC contactor, were investigated. Whatever the location, addition of PAC apart from other water treatment chemicals was more effective for geosmin removal than simultaneous addition. Among several combinations, the sequence 'chlorine-PAC-coagulant' produced the best result with respect to geosmin removal efficiency. Consequently, when PAC has to be applied to cope with T&O problems in conventional WTPs, it is very important to prevent interference with other water treatment chemicals, such as chlorine and coagulant. Adequate contact time should also be given for adsorption of the T&O compounds onto the PAC. To satisfy these conditions, installation of a separated PAC contactor would be the superior alternative if there is space available in the WTP. If necessary, PAC could be added at transmission pipe in the water intake tower and still provide some benefit for T&O treatment.

Key words: Taste and odor(T&O), Powdered activated carbon(PAC), Chlorine, Coagulant, PAC contactor, Transmission pipe

주제어: 이취미, 분말활성탄, 염소, 응집제, 분말활성탄 접촉조, 도수관로

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

1. 서 론

상수원수에서 계절적으로 발생하는 이취미에 대응하기 위한 수단으로 정수장에서는 분말활성탄(powdered activated carbon, PAC)을 널리 사용하고 있다. 일반적으로 정수공정에서 문제가 되는 이취미 물질의 농도범위에서는 pH, 알칼리도, 그리고 경도가 PAC의 이취미 물질 흡착에 영향을 미치지 않으나, PAC의 이취미 흡착효율은 원수의 물리화학적 특성(특히, 유기물의 존재여부), 정수장의 설계 및 운전조건, 그리고 PAC 자체의 물리화학적 특성에 따라 달라진다(Suffet et al., 1995).

기존 정수장에서 적용 가능한 PAC 투입지점은 취수구, 급속혼화지, 그리고 여과지 전방 등이 있으며, 급속혼화지 전방에 별도의 PAC 접촉조를 설치하는 방안도 고려될 수 있다(Najm et al., 1991). 대부분 정수장에서는 PAC를 교반강도가 가장 큰 급속혼화지에 투입하고 있으나, 급속혼화지에는 PAC 이외에 응집제, 알칼리제, 그리고 염소와 같은 수처리제가 동시에 투입되기 때문에 이들 수처리제들과 PAC 간의 상호반응으로 인해 개개 수처리제의 효능이 저하될 우려가 있다. 특히, PAC가 염소와 반응하면 PAC의 흡착능이 저하된다는 사실은 여러 실험에서 증명되었으며(Lalezary et al., 1988; Gillogly et al., 1998; 배 등, 1998), Kawamura(1973)는 탁도와 색도제거에 있어서 염소와 PAC의 투입지점은 응집제와 명확히 구분되어야 한다고 보고하였다. 한편, PAC의 이취미물질 흡착은 탁도 자체에 의해 영향을 받지 않지만, PAC를 응집공정에 투입하는 경우 응집제에 의해 형성된 플러크와 PAC가 결합됨에 따라 접촉 면적이 줄어 대상 물질에 대한 흡착능이 저하된다(Letterman et al., 1970; Najm et al., 1991). 이러한 이유로 인해 수처리제간의 상호반응을 최소화하고 PAC의 이취미 물질 흡착효율을 극대화하기 위하여 실규모 정수장 급속혼화지 전방에 격벽 형태의 PAC 접촉조가 설치되기도 하였다(안, 2003). 이 방법은 수처리제와의 상호반응은 최소화 할 수는 있으나, PAC 접촉조를 설치하기 위한 부지가 소요된다는 단점이 있어 대부분 새롭게 건설된 정수장에 적용되었다. 반면, 부지제약으로 인해 기존 정수장에 PAC 접촉조를 설치하지 못하는 경

우에는 PAC를 도수관로에 투입하는 방법이 “전주권 광역상수도 I 단계 사업”에 적용된 바가 있다(한국수자원공사, 2001).

이상과 같은 배경을 바탕으로 본 연구에서는 PAC와 수처리제와의 간섭작용을 최소화하고 이취미 흡착능을 향상하기 위한 방안으로 PAC를 도수관로에 투입하는 방법과 PAC 접촉조를 이용하는 방법에 대해 평가하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 이취미 제거를 위한 수처리제간의 간섭작용

2.1.1. 응집제, 염소 및 PAC의 geosmin 제거

정수장에서 일반적으로 사용하고 있는 수처리제 중 응집제, 염소, PAC가 geosmin 제거에 미치는 영향을 조사하기 위하여 상수원수에 geosmin을 spike하여 40.5ng/L로 만든 원수를 대상으로 실험을 수행하였다. 모든 실험은 Jar tester(PB900TM Programmable Jar tester, 7790-912, Phipps&Bird, USA)를 이용하였다. 응집제는 10mg/L, 염소는 1 또는 2mg/L, PAC는 10 또는 20mg/L를 원수에 각각 투입하여 1분간 200G에서 교반한 다음 상등수를 채취하여 GF/C(47mm, Whatman International Ltd., UK) 여지와 0.45 μ m cellulose membrane(Millipore HA type, MA, USA)으로 여과한 후 geosmin 농도를 측정하였다. 특히, 염소를 투입한 원수의 경우 반응이 끝난 다음 잔류염소에 의한 추가반응이 일어나지 않도록 아황산나트륨(sodium sulfite, Na₂SO₃) 일정량을 넣었다. 응집제는 PAHCS(poly aluminium hydroxide chloride silicate, Al₂O₃ 16%, 비중 1.35)를 사용하였으며, PAC는 요오드 수 1080, 메틸렌 블루 탈색지수 200인 야자계 PAC를 사용하였다. 염소는 차아염소산나트륨(sodium hypochlorite, NaOCl) 원액을 희석하여 유효 염소농도가 0.1 % (1,000mg/l)인 stock 용액을 만들어 사용하였다.

2.1.2. 염소, PAC, 응집제의 동시 및 시차투입에 따른 geosmin 제거

염소와 응집제가 PAC의 흡착에 미치는 영향을 평가하기 위하여 상수원수에 geosmin을 spike한 원수를 대상으로 수처리제의 간섭효과를 조사하였다. 실험은

총 3가지 방법을 대상으로 수행하였는데, 첫째, PAC 30mg/L만 투입한 경우, 둘째 PAC 30mg/L를 투입하고 응집제를 투입하여 응집실험을 수행한 경우, 그리고 마지막으로 2mg/L 염소를 투입한 다음 PAC 30mg/L를 투입하고 응집제를 투입하여 응집실험을 수행한 경우에 대해 실험을 수행하였다. PAC와 염소를 응집제보다 먼저 투입한 경우에는 50G의 교반강도에서 각각 3분 및 1분간 교반한 다음 응집제 25mg/L를 투입하여 응집실험을 수행하였다. 응집실험은 급속교반 200G, 1분, 완속 교반은 점감식으로 70, 50, 그리고 30G로 각각 5분, 그리고 침전은 30분으로 실험을 수행하였다. PAC에 의한 오차를 최소화하기 위하여 응집실험 후 상등수를 채취하여 GF/C와 0.45 μ m 여지로 여과한 다음 geosmin 농도를 측정하였다. 실험에 사용한 응집제, 염소, 그리고 PAC는 앞에서 수행한 실험과 동일한 것을 사용하였다.

2.2. PAC의 관로투입에 따른 이취미 제거효율 평가

PAC의 관로투입에 따른 이취미 제거효율을 평가하기 위하여 geosmin이 약 77~110ng/L 존재하는 실제 상수원수를 대상으로 실험을 수행하였다. Fig. 1은 실험에 사용한 bench-scale 관로장치를 나타낸 것으로 관로의 지름은 5cm이고 길이가 22.8m인 PE 주름관으로 이루어져 있다. 유량이 1.5L/min일 때 체류시간이 5~30분 범위를 갖도록 설계하였으며, 각 체류시간에서 시료를 채취할 수 있도록 시료채취지점에 밸브를 설치하였다.

일반적으로 이취미 발생기에 정수장에서는 PAC와

응집제를 동시투입하고 있기 때문에 이를 묘사하기 위하여 실험실에서 Jar test를 수행하였으며, PAC의 체류시간 증대를 위한 시차투입 실험은 PAC를 관로에 투입하여 일정시간동안 접촉시킨 다음 동시투입 실험과 동일한 조건에서 Jar test 실험을 수행하였다. PAC와 응집제 동시투입 실험은 실험당시 동일한 원수를 사용하고 있는 정수장의 수처리제 투입농도 (PAC 12mg/L, 응집제 30mg/L, 소석회 8mg/L)를 참고하여 Jar test 실험을 수행하였으며, 시차투입 실험은 동시투입 실험보다 적은 5~10mg/L의 PAC를 투입하여 일정시간 동안 관로장치에서 원수와 접촉시킨 다음 동시투입과 동일한 Jar test 실험을 수행하였다. Jar test는 앞에서 수행한 실험과 동일한 조건에서 수행하였으며, 상등수를 채취하여 GF/C와 0.45 μ m 여지로 여과한 다음 geosmin 농도를 측정하였다.

2.3. PAC 접촉조의 이취미 제거효율 평가

Fig. 2는 실험에 사용된 용량 288리터 수평식 PAC 접촉조의 개략도로서, 접촉조의 길이, 폭, 그리고 수심은 각각 1.6, 0.65, 그리고 0.4m이다. 수로의 길이는 총 3.2m이며, 수로단면의 수심과 폭은 0.3m로 동일하고, 유출부에 삼각웨어를 설치하여 유출수를 배제하였다. 다양한 크기의 격벽을 대상으로 실험할 수 있도록 접촉조 측벽에 홈을 내어 4mm 두께의 격벽을 고정하였다. 실험은 접촉조에 들어가는 격벽의 수를 25개와 13개로 고정할 가운데 측벽에서 격벽까지의 간격을 30mm(전체 통수단면적의 10%)과 90mm(전체 통수단면적의 30%)인 경우로 나누어 실험을 수행하였다.

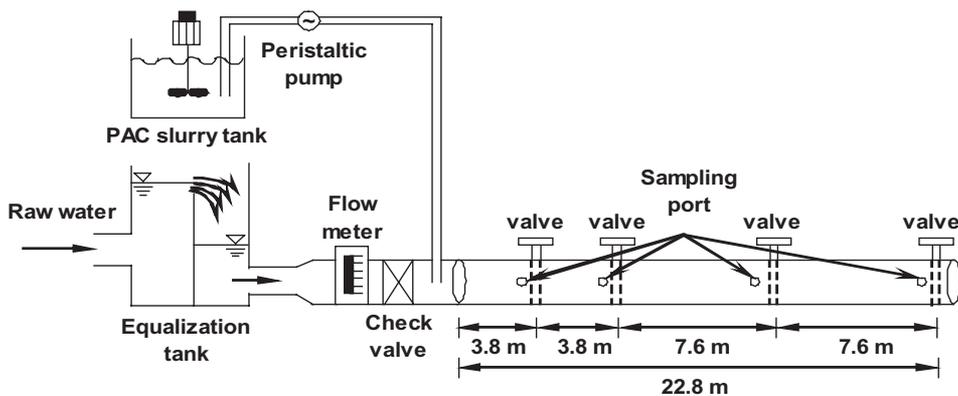


Fig. 1. Schematic diagram of bench-scale pipeline system.

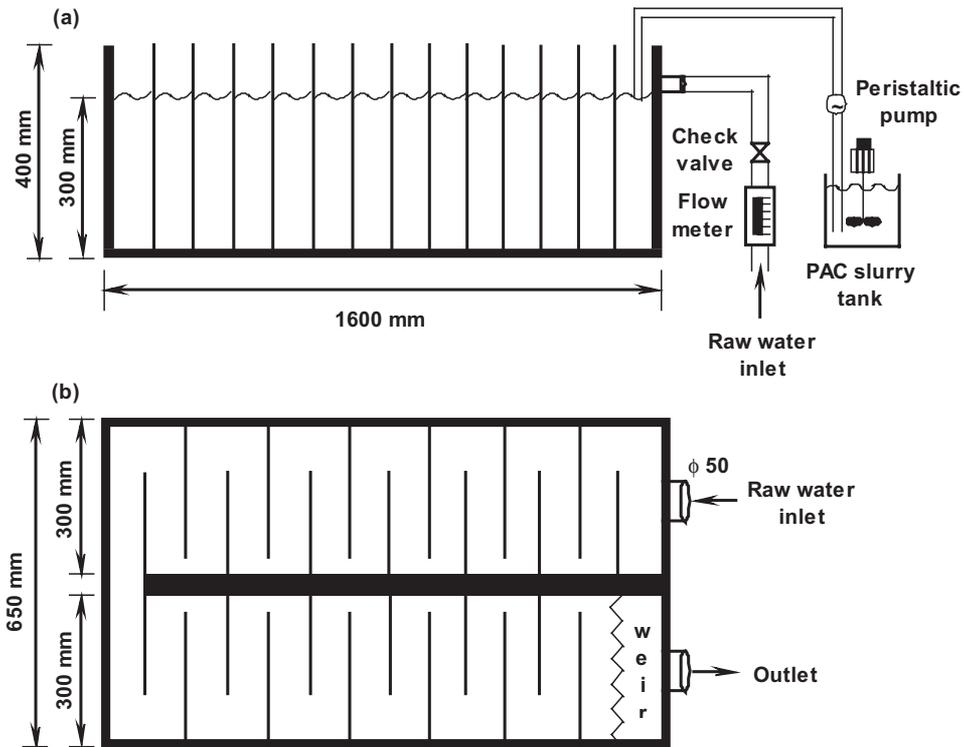


Fig. 2. Schematic diagram of pilot-scale horizontally baffled-channel PAC contactor, (a) cross-sectional view, (b) plan view.

상수원수에 geosmin을 spike하여 약 40~80ng/L 범위가 되도록 만든 원수를 대상으로 실험을 수행하였으며, 원수의 수온, pH, 탁도, 알칼리도, 용존유기탄소(dissolved organic carbon), 그리고 UV₂₅₄는 각각 $15.6 \pm 2.6^{\circ}\text{C}$, 7.7 ± 0.4 , $4.97 \pm 1.02\text{NTU}$, $45.5 \pm 5.1\text{mg/L}$, $1.58 \pm 0.19\text{mg/L}$, 그리고 $0.029 \pm 0.004\text{cm}^{-1}$ 이었다. 105°C 오븐에서 2시간 동안 건조시킨 PAC를 초순수에 넣어 10,000mg/L stock 용액을 실험에 사용하였다. 접촉조의 체류시간이 10분과 20분일 때 일정량의 PAC 용액을 접촉조에 투입하여 최종 PAC 농도가 5~30mg/L가 되도록 조절하였다. 시료를 채취 즉시 PAC에 의한 오차를 최소화하기 위하여 GF/C와 0.45 μm 여지로 여과한 다음 geosmin 농도를 측정하였다.

2.4. 분석방법

pH와 수온은 pH meter(520Aplus, Orion), 탁도는 Turbidimeter(2100P, Hach), DOC는 TOC 분석기

(Rosemount DC-180, Dohrmann), 그리고 UV₂₅₄는 UV/VIS spectrophotometer(UV-1601, Shimadzu)를 이용하여 측정하였다. 알칼리도는 Standard Methods의 2320B법, 잔류염소는 DPD법으로 측정하였다(APHA, 1998). 한편, geosmin은 CLSA 농축장치와 GC/MS(Agilent, 6890N GC/5973N MSD)를 이용하여 분석하였으며, geosmin(077-01891, 1.0mg/mL)은 Wako Chemical사의 표준시약을 사용하였다(배 등, 1999).

3. 실험결과

3.1. 이취미 제거를 위한 수처리제간의 간섭작용

3.1.1. 응집제, 염소 및 PAC의 geosmin 제거

Table 1은 정수장에서 일반적으로 사용하고 있는 수처리제인 응집제, 염소, 그리고 이취미 제거를 위해 사용되고 있는 PAC의 geosmin 제거율을 나타낸 결과이다. 응집제만 10mg/L 투입한 경우도 초기

Table 1. Effect on coagulant, chlorine, and PAC for geosmin removal

Water Treatment Chemical	Dosage(mg/L)	Retention time(min)	Geosmin(ng/L)	Removal rate(%)
Coagulant(PACS)	10		32.8	19.0
Chlorine	1	1	28.8	28.9
	2		22.5	44.4
PAC	10		30.9	23.7
	20		24.6	39.3
Raw water				40.5

geosmin의 19%가 제거되는 것으로 나타났다. 염소만 투입한 경우에는 투입량이 증가할수록 geosmin 제거율이 증가하는 경향을 보였으며, 염소투입량 2mg/L에서 1분 정도의 접촉시간만으로도 초기 geosmin의 약 44%가 제거되는 것으로 나타났다(Lalezary et al., 1986). 한편, PAC만 투입한 경우에도 염소와 마찬가지로 투입량이 증가함에 따라 제거율이 증가하는 것으로 나타났다.

3.1.2. 염소, PAC, 응집제의 동시 및 시차투입에 따른 geosmin 제거

Fig. 3은 염소, PAC, 그리고 응집제를 동시 및 시차 투입한 경우의 결과로서 모든 경우에 있어 수처리제를 동시에 투입한 경우보다 시차를 두고 투입한 경우에 geosmin 제거율이 우수하였다. 동시 투입의 경

우 수처리제의 종류가 늘어날수록 geosmin 제거율이 떨어지는 경향을 보였는데, 이는 수처리제들간의 상호 방해작용으로 인해 개개 수처리제의 효능이 저하되었기 때문이다. 반면, 시차투입의 경우 염소를 먼저 투입하고 일정시간 이후에 PAC와 응집제를 투입하는 것이 PAC를 먼저 투입한 것보다 geosmin 제거율면에서 우수한 것으로 나타났다. 이는 화학 반응시간이 빠른 염소가 먼저 투입되어 산화됨으로 인해 PAC가 투입될 때 잔류염소가 적게 존재하여 PAC 흡착능에 큰 영향을 미치지 않았기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 정수장에서 이취미 제거를 위한 수처리제를 사용함에 있어 염소, PAC, 응집제 순으로 시차 투입하는 것이 이취미 제거효율을 극대화 시킬 수 있는 방안이라 사료된다.

3.2. PAC의 관로투입에 따른 이취미 제거효율 평가

일반적으로 이취미 발생기에 정수장에서는 염소와 PAC와의 간섭작용을 피하기 위하여 전염소를 시행하지 않고 PAC와 응집제를 이용하여 이취미를 제거하기 때문에, 본 실험에서도 PAC와 응집제만을 이용하여 관로투입에 따른 이취미 제거효율을 평가하였다. Fig. 4는 PAC의 관로투입에 앞서 실험실에서 Jar test를 이용하여 시차에 따라 PAC 투입량을 달리해가면서 geosmin 제거효과를 비교한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 geosmin 제거율은 PAC와 응집제 간의 시차가 길어지고 PAC 투입량이 증가할수록 높아지는 경향을 보였으며, PAC 투입량이 증가함에 따라 시차간의 제거율 폭도 커지는 것으로 나타났다. 한편, PAC 15mg/L와 응집제를 60분의 시차를 두고 투입한 경우 geosmin 제거율이 79.2%인 반면, PAC와 응집제를 동시 투입한 경우에는 44.3%에 불과하여

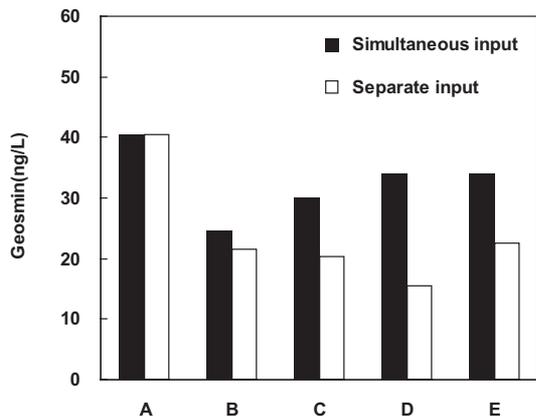


Fig. 3. Variation of geosmin concentration according to simultaneous and separate input of chlorine, PAC and coagulant(A: Raw water, B: Cl₂ 1mg/L + Coagulant 10 mg/L, C: PAC 10mg/L + Coagulant 10mg/L, D: Cl₂ 1mg/L + PAC 10mg/L + Coagulant 10mg/L, E: PAC 10mg/L + Cl₂ 1mg/L + Coagulant 10mg/L).

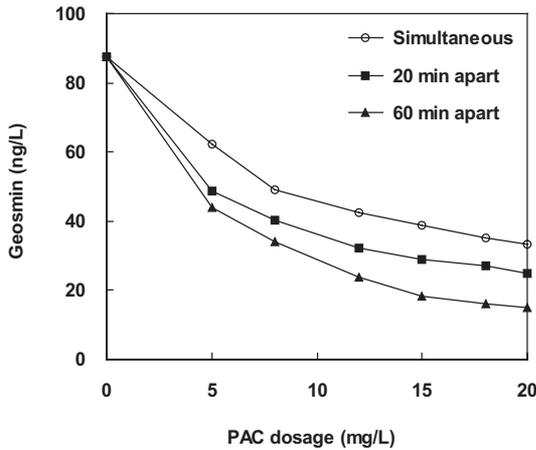


Fig. 4. Variation of geosmin concentration according to simultaneous and separate input of PAC and coagulant.

PAC를 시차투입한 것만으로도 약 35%의 효율증가가 발생한 것으로 나타났다(김, 2003).

Table 2는 bench-scale 관로장치를 이용하여 PAC와 응집제를 시차 투입한 경우와 Jar test를 이용하여 동시 투입한 경우의 실험결과를 정리한 것으로, 제거 가능한 대부분의 geosmin은 접촉시간 10분 이후에 제거되는 경향을 보였다(김 등, 2005). PAC 5~10 mg/L를 투입하여 관로에서 일정시간 접촉한 다음 응집제를 투입하였을 때 접촉시간 20분에서 74.1~81.2% 정도의 geosmin 제거율을 보인 반면, PAC 12 mg/L와 응집제가 Jar test에 동시 투입된 경우에는 72.6%의 geosmin 제거율을 보였다. 이는 관로에 PAC를 투입하더라도 기존 정수장의 급속혼화지에 PAC를 투입하는 것보다 적은 양으로도 거의 유사한 geosmin 제거율을 달성할 수 있다는 것으로, 이는 Najm(1996)이 CSTR(급속혼화지)보다 PFR(관로)이

동일한 이취미를 제거하는데 있어 PAC 투입량이 적다는 것을 수학적 모델을 이용하여 증명한 바가 있다. 한편, 실험을 수행한 시기에 동일한 원수를 처리하고 있는 정수장의 geosmin 제거율도 63~77% 범위(평균 70%)로 동시 투입결과와 유사한 경향을 보였다. 현재까지 관로투입에 대한 구체적인 설계방법이나 효과에 대해 보고된 바는 없지만, 본 연구결과에서와 같이 관로에 PAC를 투입하면 양호한 혼합과 충분한 체류시간이 확보됨으로써 PAC의 흡착능을 최대한 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3. PAC 접촉조의 이취미 제거효율 평가

앞서 수행한 실험에서 PAC와 다른 수처리제와의 상호 간섭작용에 대한 실험을 수행하였기 때문에 본 실험에서는 PAC만을 이용하여 기존의 여러 연구결과들을 참고하여 PAC 접촉조의 이취미 제거효율을 평가하였다(배와 안, 1998, 2001; 안, 2003; 안 등, 2002). Fig. 5는 통수단면적(bend width)이 30 및 90 mm, 격벽의 수를 13 및 25개로 각각 조절하였을 때 geosmin 제거정도를 PAC 투입량과 접촉시간에 따라 나타낸 결과로서, 통수단면적에 관계없이 격벽의 수와 접촉시간, 그리고 PAC 투입량이 증가함에 따라 geosmin 제거율이 증가하는 경향을 보였다. PAC를 20mg/L 투입하고 10분 이상의 접촉시간만 확보되면 geosmin 제거율이 80% 정도는 달성할 수 있을 것으로 판단되며, 격벽의 수를 조절하기 힘든 경우 PAC 투입량을 증가시키면 동일한 제거율을 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 전체적으로 통수단면적이 커지는 경우에는 PAC 투입량 변화에 따른 geosmin 제거율의 변화폭이 크게 나타났을 뿐만 아니라 체류시간에 따른 차이도 크게 나타났다. 실제 정수장에서 이취미

Table 2. Comparison of simultaneous and separate input of PAC and coagulant

Input type	PAC dose	Item \ Contact time	0	5 min	10 min	20 min	30 min
Simultaneous	12mg/L	Geosmin(ng/L)	87.0			24.0	
		Removal Efficiency(%)	-			72.6	
Separate	5mg/L	Geosmin(ng/L)	76.7	41.3	28.2	19.8	16.5
		Removal Efficiency(%)	-	46.1	63.2	74.1	78.5
	8mg/L	Geosmin(ng/L)	76.7	32.8	24.0	17.0	12.2
		Removal Efficiency(%)	-	57.2	68.6	77.8	87.8
	10mg/L	Geosmin(ng/L)	109.9	32.8	23.8	20.6	16.3
		Removal Efficiency(%)	-	70.1	76.2	81.2	85.1

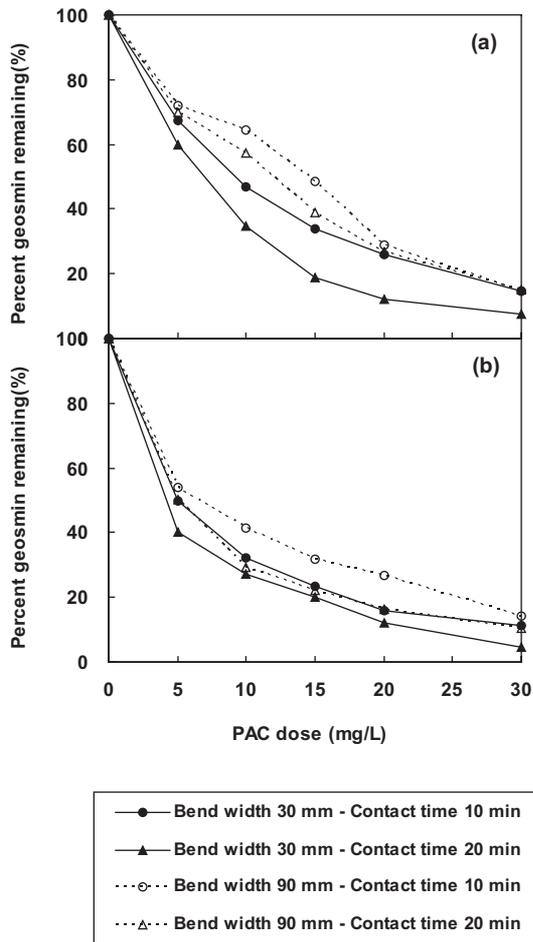


Fig. 5. Percent MIB remaining as a function of PAC dose in the pilot-scale horizontally baffled-channel PAC contactor with various bend width and contact time. (a) 13 baffles, (b) 25 baffles.

제어를 위해 PAC 접촉조를 이용하는 경우 PAC의 흡착능을 극대화하기 위해 통수단면적을 작게 하고 격벽의 수를 늘리는 것이 효과적일 것으로 판단되며, 이러한 결과는 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD)을 이용한 모의에서도 검증된 바가 있다(안 등, 2002).

4. 결 론

1) 응집제 10mg/L를 투입하고 1분간의 접촉시간에 의해서도 약 19%의 geosmin이 제거되었다. 염소

나 PAC만을 투입한 경우에는 투입량이 증가함에 따라 geosmin 제거율이 증가하는 경향을 보였으며, 염소 2mg/L 또는 PAC 20mg/L을 투입하고 1분 정도의 접촉시간을 갖는 경우 geosmin이 약 40% 정도 제거되는 것으로 나타났다.

2) 정수장에서 이취미 제거를 위한 수처리제를 투입함에 있어 수처리제를 동시에 투입하는 것보다 시차를 두고 투입하는 것이 각 수처리제의 효율이 극대화됨에 따라 geosmin 제거율이 우수한 것으로 나타났으며, 특히, 일정한 시차를 두고 염소, PAC, 그리고 응집제 순으로 투입한 경우에 효율이 가장 우수한 것으로 나타났다.

3) 양호한 혼합과 충분한 체류시간을 확보하기 위하여 관로에 PAC를 투입하더라도 기존 정수장의 급속혼화지에 PAC를 투입하는 것보다 적은 투입량으로 거의 유사한 geosmin 제거율을 달성할 수 있었다.

4) PAC 접촉조의 경우 통수단면적에 관계없이 격벽의 수와 접촉시간, 그리고 PAC 투입량이 증가함에 따라 geosmin 제거율이 증가하였으며, PAC를 20 mg/L 투입하고 10분 이상의 접촉시간만 확보된다면 PAC 접촉조를 이용하여 80% 정도의 geosmin 제거율을 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

5) 이취미 제거를 위해 PAC를 투입할 경우에는 PAC만 단독으로 투입하거나 충분한 접촉시간을 갖도록 하는 것이 가장 중요하며, 전염소나 응집제 같은 다른 수처리제에 의해 방해받지 않도록 투입하는 것이 PAC의 흡착효율을 최대화 할 수 있는 방법이다. 이러한 조건들을 만족시키기 위해서는 정수장 내에 부지확보가 용이하면 PAC 접촉조를 설치하고 접촉조 설치가 불가능한 경우에는 관내 혼합방식을 적용하는 것이 현실적인 방법이라 판단된다.

참고문헌

1. 김영일 (2003) 새로운 이취미 분석법과 최적 PAC 적용을 통한 상수원수의 이취미 제어, 대전대학교 박사학위논문.
2. 김영일, 배병욱, 김규형, 홍현수, Paul Westerhoff (2005) ¹⁴C-radiolabeled MIB와 HSDM을 이용한 최적 PAC 투입량 예측프로그램의 개발, *대한환경공학회지*, 27(10), pp. 1123-1128.
3. 배병욱, 김영일, 임경묵 (1998) 염소가 분말활성탄의 흡

- 착능에 미치는 영향, *대한환경공학회지*, **20**(12), pp. 1781-1789.
4. 배병욱, 안창진 (1998) 상수원수 내 이취미 제거를 위한 분말활성탄 접촉조의 설계, *대한환경공학회지*, **20**(8), pp. 1161-1170.
 5. 배병욱, 김영일, 김현영, 김계남 (1999) CLSA와 GC/MS를 이용한 상수원수 내 이취미 물질의 분석, *한국물환경학회지*, **15**(4), pp. 479-487.
 6. 배병욱, 안창진 (2001) 격벽식 분말활성탄 접촉조의 흐름특성, *대한토목학회지*, **21**(4-B), pp. 469-474.
 7. 안창진, 안상진 (2002) 격벽식 분말활성탄 접촉조의 흐름해석을 위한 전산유체역학 프로그램의 적용, *한국수자원학회논문집*, **35**(2), pp. 221-229.
 8. 안창진 (2003) 격벽식 분말활성탄 접촉조에 의한 이취미 제거효율 향상, 충북대학교 박사학위논문.
 9. 한국수자원공사 (2001) 전주권 광역 상수도 1단계(2차) 사업 - 김제 송수관로 및 이취미 제거시설 기본 및 실시설계 보고서, 한국수자원공사.
 10. APHA, AWWA, WEF (1998) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed., APHA/AWWA/WEF, Washington DC, USA.
 11. Gillogly, T.E.T., Snoeyink, V. L., Holthouse, A., Wilson, C. M. and Royal, E. P. (1998) Effect of Chlorine on PAC's Ability to Adsorb MIB, *AWWA*, **90**(2), pp. 107-114.
 12. Kawamura, S. (1973) Coagulation Consideration, *AWWA*, **65**(6), pp. 417-423.
 13. Lalezary, S., Pirbazari, M. and McGuire, M. J. (1986) Oxidation of Five Earthy-Musty Taste and Odor Compounds, *AWWA*, **78**(3), pp. 62-69.
 14. Lalezary, S., Pirbazari, M., Dale, M. S., Tanaka, T. S. and McGuire, M. J. (1988) Optimizing the Removal of Geosmin and 2-Methylisoborneol by Powdered Activated Carbon, *AWWA*, **80**(3), pp. 73-80.
 15. Letterman, R. D., Quan, J. E. and Gemmel, R. S. (1970) Coagulation of Activated Carbon Suspensions, *AWWA*, **62**(10), pp. 652-658.
 16. Najm I. N. (1996) Mathematical Modeling of PAC Adsorption Processes, *AWWA*, **88**(10), pp. 79-89.
 17. Najm, I., 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.
 18. Najm, I. N., Snoeyink, V. L. and Richard, Y. (1991) Effect of Initial Concentration of a SOC in Natural Water on Its Adsorption by Activated Carbon, *AWWA*, **83**(8), pp. 57-63.
 19. Suffet, I. H., Mallevalle, J. and Kawczynski, E. (1995) *Advances in Taste and Odor Treatment and Control*, American Water Works Association Research Foundation.
 20. Young-II Kim, Nam-Jung Jung, Chang-Jin Ahn, Byung-Uk Bae (2007) Application of Computational Fluid Dynamics for Optimal Design of Horizontal Baffled-Channel Powdered Activated Carbon Contactor, in the proceedings of Efficient 2007, Jeju, Korea, May 20-23.