

분말활성탄 접촉조의 맛·냄새 및 유기물 제거 효율 평가

배병욱[†] · 임문구

대전대학교 환경공학과

Performance Evaluation of Powdered Activated Carbon (PAC) Contactor for the Removal of Organics and Taste and Odor

Byung-Uk Bae[†] · Mun-Gu Lim

Department of Environmental Engineering, Daejeon University

(Received 8 January 2010, Revised 22 May 2010, Accepted 25 May 2010)

Abstract

In order to evaluate the performance of a powdered activated carbon (PAC) contactor, two water treatment plants (WTP) were selected as target sites. The result of tracer tests showed that the plug flow portion of a bisymmetry-type contactor (H WTP) was more than 70%. A maze-type contactor (C WTP) also had more than 70% of plug flow portion after intra-basin baffles were installed. According to the operating data of the target WTPs, there was no clear evidence that the addition of PAC contributed to the removal of organics. However, the results of jar tests, conducted with the raw water taken from the H WTP, proved that PAC could remove dissolved organic carbon (DOC) to some extent when the proper velocity gradient was maintained. It was estimated that the production rate, defined as the ratio of the operating flowrate to the design flowrate, of the C and H WTPs was only 27 and 50%, respectively. Because of these lower production rates, the mixing intensity in the contactor was much less than the designed value and, finally, the performance of the PAC contactor was much lower than what was expected.

keywords : Powdered activated carbon (PAC), PAC contactor, Taste and odor removal, Tracer test, Velocity gradient

1. 서론

음용수의 맛·냄새 문제는 소비자가 수돗물에 대해 불신감을 갖게 하는 주원인이 되고 있다. GAC(granular activated carbon, 입상활성탄) 혹은 오존+GAC 같은 고도정수공정이 설치되지 않은 기존 정수장에서는 PAC(powdered activated carbon, 분말활성탄)가 맛·냄새 대응용으로 널리 사용되고 있다. PAC는 맛·냄새 발생기에 한시적으로 투입할 수 있다는 장점이 있지만, PAC를 혼화지에 투입할 경우 여타 수처리제(응집제와 알칼리제, 그리고 염소)와의 반응으로 인해 효율이 저하된다는 우려가 제기되어 왔다(Najm et al., 1991). 이와 같은 배경에서 PAC의 흡착효율을 극대화하기 위하여 기존 정수공정과 공간적으로 분리된 별도의 PAC 접촉조(contactor)를 혼화지 전방에 설치하는 안이 제기된 바 있다(Bae et al., 2007).

PAC 접촉조는 한국수자원공사의 8개 정수장에 설치되었으며, 2005년에 준공된 대전광역시 신탄진정수장에도 PAC 접촉조가 설치되어 있다. 대부분의 PAC 접촉조는 장폭비가 큰 장방향으로, 수리학적 에너지를 이용한 응결지(hydraulic flocculator) 이론에 근거하여 설계되었다(Kawamura,

2000). 그러나 현장에서 운영 중인 PAC 접촉조를 대상으로 그 성능을 체계적으로 조사한 연구가 없다. 이와 같은 배경에서 본 연구에서는 한국수자원공사의 2개 정수장(C 정수장, H 정수장)에서 운영 중인 PAC 접촉조를 대상으로 맛·냄새 물질과 유기물질 제거효율을 평가하였다. 또한, 2개 정수장을 대상으로 추적자실험을 수행하여 흐름특성을 조사하였다.

2. 연구방법

2.1. 모델정수장 현황 및 PAC 접촉조의 구조

PAC 접촉조의 성능평가를 위해 한국수자원공사의 C 정수장과 H 정수장을 모델정수장으로 선정하였다. Fig. 1은 C 정수장의 미로형(maze-type) PAC 접촉조의 평면도이다. 각기 다른 취수장에서 취수된 원수가 유입되는 구조로서, 두 원수의 맛·냄새 강도에 따라 PAC를 따로 투입할 수 있도록 원수유입 라인이 완전히 구분되어 있다. PAC 접촉조(Fig. 1의 수로 ①)는 2지로 구성되어 있고, 접촉조의 제원은 길이 69.5 m, 폭 8.2 m, 수심 4.0 m이다. 격벽의 수는 수평우류식 도류벽의 형태로 9 개씩 설치되어 있다. 만곡부의 폭은 전체 통수 단면적의 약 50%에 해당하는 1.95 m로 실측되었고, 설계 체류시간은 20.3분이었다. 그러나, C

[†] To whom correspondence should be addressed. baebu@dj.ac.kr

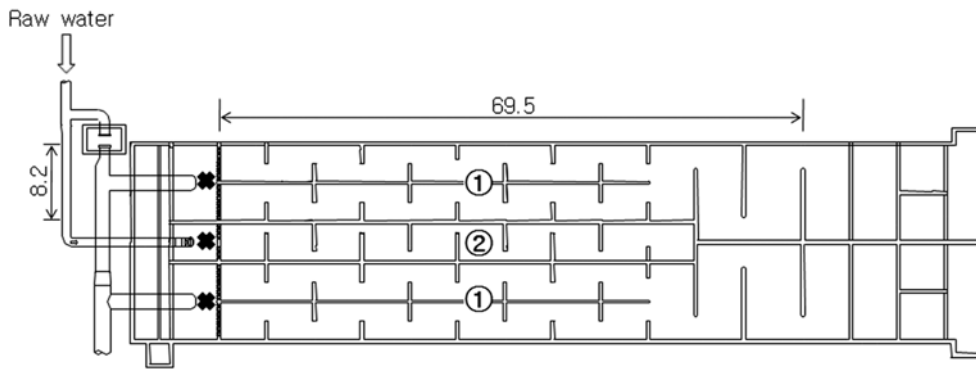


Fig. 1. Original plan view of PAC contactor at the C WTP (unit : m, * : adding point of PAC).

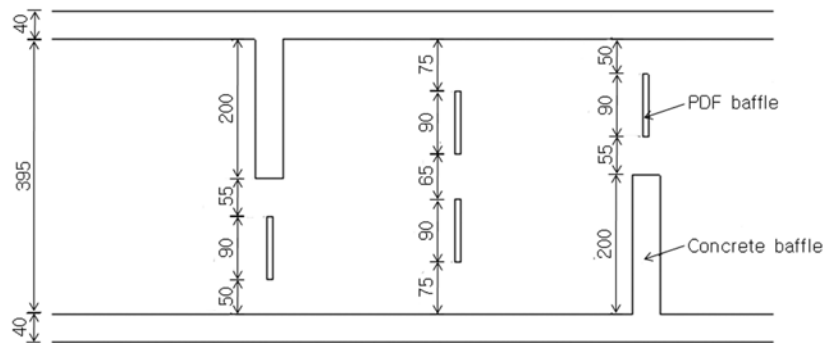


Fig. 2. Details of PAC contactor at the C WTP after installation of intra-basin baffles (unit : cm).

Table 1. Dimension of full-scale PAC contactor tested in this study

WTP	Design flow rate (m ³ /d)	Contactor dimension (W × L × H (m))	Contactor number	Residence time (min)
C	403,000	8.2 × 69.5 × 4.0	2	20.3
		4.0 × 69.5 × 4.0	1	
H	62,000	6.0 × 25.0 × 3.0	2	20.0

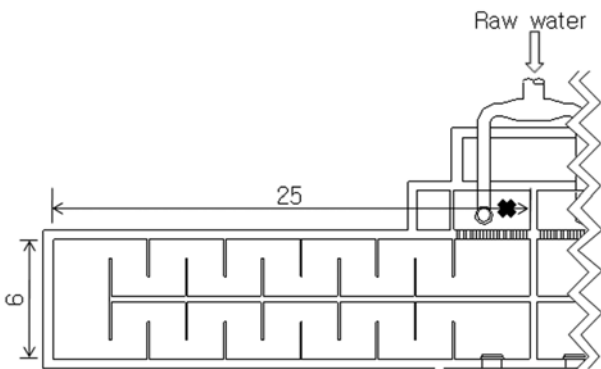


Fig. 3. Plan view of PAC contactor at the H WTP. (unit : m, * : adding point of PAC)

정수장 접촉조는 교반강도(G)를 증가하기 위하여 Fig. 2에서 보는 바와 같이 PDF(polyethylene double frame) 판넬을 이용하여 접촉조 내 Baffle(도류벽)을 추가로 설치하고 수로를 미로형(maze-type)으로 변경하였다.

Fig. 3은 H 정수장의 PAC 접촉조의 평면도이다. 좌우대칭형(bisymmetry-type)의 2지로 구성되어 있고, 길이 25.0 m, 폭 6.0 m, 그리고 수심 3.0 m로 설계되었다. 격벽은 수

평유류식으로 각각 20 개씩 설치되어 있고, 만곡부의 폭은 통수 단면적의 약 30%에 해당하는 1.0 m로 설계되었다. 설계 체류시간은 20분이다. 참고로, Table 1에 각 PAC 접촉조의 제원을 수록하였다.

2.2. 불소(F) 추적자 실험

PAC 접촉조의 흐름특성을 조사하기 위하여 pulse dose법을 이용하여 추적자실험을 수행하였다. 추적자(tracer)로는 분석의 용이성과 안전성을 고려하여 불화나트륨(NaF, Onoda Chemical, Japan)을 선정하였고, 목표농도는 환경부 수질기준(1.5 mg/L) 미만인 0.6 mg/L로 주입하였다. 또한, 일정한 시간 간격으로 유출부(수심 2 m 한 지점)에서 시료를 채취하여 발색법(Hach, DR-210)으로 측정하였으며, 무차원 시간($\theta = t/T$, t =경과시간, T =이론적 체류시간)에 대한 유입수 농도와 유출수 농도비(C/C_0)를 나타내었다(Kim and Bae, 2007).

2.3. 분석방법

유기물의 정량화를 위하여 DOC의 농도를 TOC 분석계(VCPH, Shimadzu)를 사용하여 분석하였다. DOC의 측정을

위해 시료를 GF/C 여지로 여과하였다. 또한, 유기물 함량을 나타내는 지표로 UV₂₅₄ 흡광도를 분석하였다. UV₂₅₄ 흡광도는 UV/VIS spectrophotometer(UV-1601, Shimadzu)를 이용하여 측정하였다. 대표적인 맛·냄새 물질인 Geosmin의 정량분석을 위해 closed-loop stripping analysis(CLSA)+GC/MS를 사용하였으며(배병욱 등, 1999), Standard Methods 6040B에 따라 분석하였다(APHA, 2005).

3. 결과 및 고찰

3.1. 접촉조의 흐름 특성

Fig. 4는 대상정수장 접촉조의 추적자실험 결과이다. 실험 당시 실제 체류시간은 C 정수장의 경우 처리 수량(3,264 m³/hr)을 기준으로 한 이론 체류시간(약 42분)의 약 64%에 해당하는 27분이었고, H 정수장은 처리수량(1,270 m³/hr)을 기준으로 한 이론 체류시간(약 21.3분)과 거의 유사한 20.3분이었다.

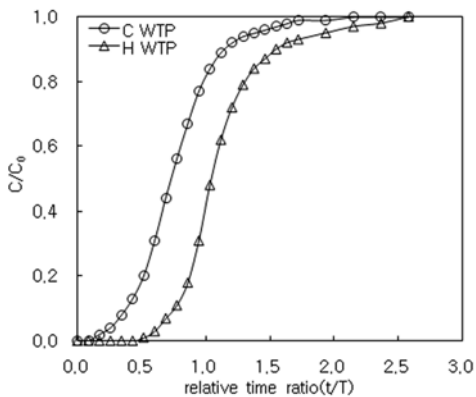


Fig. 4. Tracer curves from each PAC contactor.

Table 2는 대상정수장 PAC 접촉조의 추적자 실험을 Index 분석방법과 Graphic 분석방법을 이용하여 평가한 결과이다. Index 분석방법은 혼합의 정도와 사영역의 크기를 정량적으로 결정할 수 없고 단지 정성적인 평가만 가능하기 때문에 Rebhun과 Argaman이 제시한 그래프 분석방법으로 흐름특성을 정량적으로 평가하였다(Hudson, 1981). Index 분석방법에서 Modal Index(tp/T)는 반응조 내에서의 압출형 흐름의 정도를 나타내는 상수로 1에 가까울수록 이상적 상태의 압출형 흐름에 가까운 것을 의미한다. 반면,

Table 2. Hydrodynamic characteristics of PAC contactor at the target WTPs

	Index method		Graphic method		
	Modal index (tp/T)	Morrill index (t ₉₀ /t ₁₀)	p (%)	1-p (%)	m (%)
C WTP	0.62	2.6	77.5	22.5	-54.9
H WTP	0.95	2.03	75.7	24.3	-25.4

T : Theoretical retention time
 tp : Time to reach peak concentration (mode time)
 t₁₀ : Time of 10 percent of tracer to have appeared in effluent
 t₉₀ : Time of 90 percent of tracer to have appeared in effluent

Morrill Index(t₉₀/t₁₀)는 반응조 내에서의 혼합정도를 나타내는 상수로 이상적인 압출형 흐름에서는 1, 완전혼합 흐름에서는 1보다 매우 큰 값을 가진다. C 정수장의 경우 Graphic 분석방법에 의해 구해진 압출형 흐름 비율(p)은 77.5%, 완전혼합 흐름 비율(1-p)은 22.5%로 계산되었고, H 정수장은 각각 75.7%와 24.3%로 계산되었다. C 정수장은 접촉조 내 Baffle(도류벽)을 추가로 설치하고 수로를 미로형(maze-type)으로 변경했기 때문에 압출형 흐름 비율이 상대적으로 높게 측정된 것으로 판단된다.

3.2. 정수장 자료를 이용한 유기물 제거효율 평가

Fig. 5는 2007년부터 2원년 대상정수장 원수와 정수의 TOC 농도를 월별로 정리한 결과이다. 원수의 TOC 농도에서 정수의 TOC 농도를 뺀 값이 전체 공정에서 제거된 TOC 농도이다. 현장 운영자에 의하면, C 정수장에서는 일차적으로 맛·냄새에 대응하기 위하여 한시적으로 PAC를 투입하고 있다. 2007년 10월과 11월에 PAC를 각각 10 및 5 mg/L 투입하였고, 2008년 9월과 10월에 PAC를 10 mg/L 투입하였다. 그림에서 보는 바와 같이 PAC를 5~10 mg/L 투입한 시기에 제거된 TOC 농도는 PAC를 투입하지 않은 시기에 제거된 TOC와 거의 비슷하다. 2007년도 월별 데이터에서 PAC 비투입기에 제거된 평균 TOC 농도는 0.6 mg/L이고, PAC가 투입된 10월과 11월에 제거된 평균 TOC 농도는 0.7 mg/L로 계산된다. 2008년도에도 비슷한 결과를 보이는데, PAC 비투입기에 제거된 TOC 농도는 0.6 mg/L인 반면에, PAC 투입기에는 평균 0.75 mg/L가 제거되었다. 이 결과는 현장 PAC 접촉조를 통해 달성 가능한 TOC 저감효과가 미미함을 의미한다.

지난 2년간 H 정수장 원수의 월별 수질 자료에 의하면, TOC 농도는 3.1±0.7 mg/L로 C 정수장보다 높은 수준이다. H 정수장에서는 원수의 높은 TOC 농도에 대응하고자 2007년 5월부터 11월까지 지속적으로 PAC를 투입하였고(5~10 mg/L), 2008년도에도 10월부터 11월까지 PAC 5~6 mg/L를 투입하였다. 2007년도 원수와 정수의 월별 TOC 농도를 비교하면, PAC 비투입기에 제거된 TOC 농도는 평균 0.63 mg/L인 반면에, PAC 투입기에 제거된 TOC 농도는 0.91

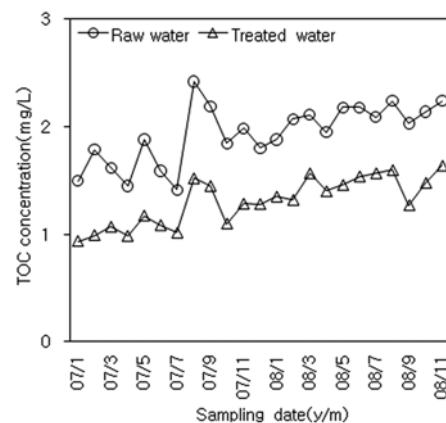


Fig. 5. TOC concentration of raw and treated water at the C WTP.

mg/L이었다. 2008년에는 제거된 TOC 농도가 각각 0.79 및 0.52 mg/L이었다. 이들 결과는 H 정수장에서 PAC의 투입으로 얻어진 TOC 개선효과가 거의 없음을 의미한다.

3.3. H 정수장 접촉조의 유기물 제거효율

Table 3은 H 정수장 접촉조의 유기물 제거율을 조사하기 위하여 PAC가 투입되고 있는 현장에서 시료를 채취하여 UV₂₅₄와 DOC를 측정된 결과이다. PAC 접촉조의 유입부와 중간 지점, 그리고 유출부에서 시료를 채취하였으며, 채수 수심은 2 m이었다. 채수 직후에 시료를 GF/C 여지로 걸러 PAC 입자의 영향을 배제하였다. 1차 실험(08년 12월 1일) 당시 유량은 34,648 m³/d로 체류시간은 37.4분이었으며, PAC 투입량은 5 mg/L이었다. 2차 실험(08년 12월 12일) 당시 유량은 34,828 m³/d로 체류시간은 37.2분이었으며, PAC 투입량은 5 mg/L로 동일하였다. 모든 실험에서의 DOC 제거율은 1% 미만이었으며, 이는 현장 접촉조의 유기물 제거율이 극히 저조함을 의미한다.

Table 3. Variation of DOC concentration and UV₂₅₄ in the PAC contactor at the H WTP

Test number	Parameter	Sampling point		
		Inlet	Halfway	Outlet
1st trial	DOC (mg/L)	2.74	2.73	2.72
	UV ₂₅₄	0.048	0.046	0.045
2nd trial	DOC (mg/L)	2.81	2.79	2.78
	UV ₂₅₄	0.055	0.054	0.053

3.4. C 정수장 접촉조의 유기물 및 맛·냄새 제거효율

C 정수장 PAC 접촉조의 유기물 및 맛·냄새 제거율을 조사하기 위하여 PAC가 투입되고 있는 현장에서 시료를 채취하여 SS(suspended solids), UV₂₅₄와 DOC, 그리고 Geosmin 농도를 측정하였다. 1차 실험(09년 8월 17일) 당시 유량은 83,552 m³/d로 체류시간은 34분이었고, 2차 실험(09년 8월 24일) 당시 유량은 74,464 m³/d로 체류시간은 38.2분이었다. PAC 투입량은 20 mg/L로 동일하였다. PAC 접촉조로 유입되는 원수를 포함하여 중간부와 유출부에서 시료를 채취하였고, 수심 2 m에서 4까지 1 m 간격으로 채수 하였다.

Table 4는 각 지점 별 PAC의 농도를 SS 값으로 측정된 결과이다. 1차 및 2차 실험 모두 유출부 하부(수심 4 m)에서의 SS 농도가 가장 높게 나왔는데, 이는 적은 운전유량으로 인해 PAC 입자가 유출부 하부에서 침전됨을 의미한다.

Table 5는 각 지점별 유기물 농도변화를 나타낸 결과이다. 유입부 데이터는 PAC가 투입되기 전의 원수를 대상으로 측정된 값이다. 원수의 초기 DOC는 각각 2.43 mg/L와 1.9 mg/L이었고, 구간에 따른 큰 차이를 보이지 않았다. UV₂₅₄도 초기에 0.057과 0.056이었으나, 제거율에는 큰 효율이 없는 것으로 나타났다. 그러나 접촉조의 하층부(수심 4 m)에서의 유기물 농도가 가장 낮았는데, 이는 접촉조 하층부에서 PAC 입자의 농도가 가장 높았던 결과와 관련이 있는 것으로 판단된다.

Table 4. Distribution of PAC particles in the PAC contactor at the C WTP (unit : mg/L)

Test number	Sampling point						
	Inlet	Halfway			Outlet		
		2 m	3 m	4 m	2 m	3 m	4 m
1st trial	20	17	20	24	14	22	39
2nd trial	20	14	19	26	12	21	43

Table 5. Variation of DOC concentration and UV₂₅₄ in the PAC contactor at the C WTP

Test number	Parameter	Sampling point						
		Inlet	Halfway			Outlet		
			2 m	3 m	4 m	2 m	3 m	4 m
1st trial	DOC (mg/L)	2.43	2.28	2.22	2.14	2.23	2.18	2.14
	UV ₂₅₄	0.057	0.054	0.053	0.053	0.053	0.052	0.052
2nd trial	DOC (mg/L)	1.90	1.87	1.82	1.74	1.69	1.54	1.43
	UV ₂₅₄	0.056	0.050	0.050	0.049	0.049	0.048	0.047

Table 6. Variation of geosmin concentration in the PAC contactor at the C WTP (unit : ng/L)

Test number	Sampling point						
	Inlet	Halfway			Outlet		
		2 m	3 m	4 m	2 m	3 m	4 m
1st trial	7.8	6.4	5.2	3.5	<2.0	<2.0	<2.0
2nd trial	5.6	2.4	2.2	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0

Table 6은 각 지점 별 Geosmin의 농도변화를 나타낸 그래프이다. 원수의 Geosmin 농도는 1차 실험과 2차 실험에서 각각 7.8과 5.6 ng/L로 검출되었다. Geosmin 농도는 중간지점에 도달하는 과정에서 얼마간 감소된 후, 유출부에서는 검출한계(2 ng/L) 미만이었다. 중간지점에서 측정된 Geosmin 농도는 수심에 따라 차이가 컸는데, 이는 PAC 입자의 농도가 수심에 따라 달랐던 Table 4와 일치하는 결과이다.

3.5. 교반강도와 반응시간에 따른 UV₂₅₄ 변화

Fig. 6은 교반강도와 반응시간에 따른 PAC의 흡착효율을 조사한 결과이다. 초기 UV₂₅₄ 값이 0.060인 H 정수장 원수에 현장에서 사용하는 PAC(SPS-100)를 10 mg/L 투입하고, 교반강도와 반응시간에 따른 UV₂₅₄의 변화를 Jar test로 측

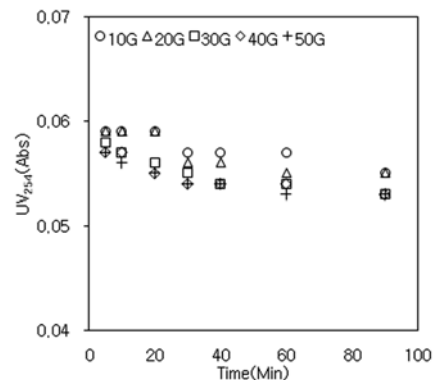


Fig. 6. Effect of contact time and velocity gradient(G) on the removal of UV₂₅₄ absorption.

정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 교반강도가 20 sec⁻¹ 보다 작은 경우, 반응시간 20분까지는 UV₂₅₄ 제거율이 1.5%에 불과하였다. 교반강도 20 sec⁻¹ 이하에서는 Jar test용 비이커에 PAC 입자가 침전되는 현상이 관찰되었는데, 이와 같은 상황에서는 원수와 PAC 입자가 충분히 혼합되지 않을 것으로 예상된다. 그러나, 교반강도가 30 sec⁻¹ 이상인 경우에는 반응초기부터 UV₂₅₄가 뚜렷하게 감소하였다. 이 결과에 의하면 현장 PAC 접촉조에서 유기물 제거효율이 저조한 이유가 충분하지 못한 교반강도 때문임을 의미한다.

3.6. 설계유량 대비 운전유량

대상 정수장의 지난 2년간(2007년 1월부터 2008년 12월 까지) 가동률(설계유량 대비 운전유량)을 조사한 결과, C 정수장의 평균 가동률은 27%, H 정수장의 평균 가동률은 50%이었다. 가동률이 작아지면 접촉조 내 유속이 그에 비례해서 작아지고, 결국 교반강도도 감소하게 된다.

일반적으로 수력에 의한 교반에서 교반강도(G)는 다음 식 (1)과 같이 표현된다. 식 (1)에서 보는 바와 같이 G 값은 유량(Q)의 1/2승에 비례한다. C 정수장이 설계유량의 약 1/4 수준에서 운전된다면, 이때 G 값은 설계 값의 50%로 감소한다. 일반적으로 PAC 접촉조의 G 값이 30 sec⁻¹로 설계된다는 점을 고려하면, C 정수장 접촉조의 실제 G 값은 15 sec⁻¹에 불과하다는 것을 알 수 있다. 평균 가동률이 50%인 H 정수장의 경우, 접촉조의 실제 G 값은 설계 값의 약 71%로 계산된다.

$$G = \left(\frac{Q\rho gh_L}{\mu V} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{\rho gh_L}{\mu t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

여기서, G = 교반강도 혹은 속도경사(sec⁻¹),
 Q = 유량(m³/s) ρ = 물의 밀도(kg/m³),
 g = 중력가속도(9.81 m/s²) h_L = 수두손실(m),
 μ = 동점성계수(kg/m·s), V = 접촉조의 용적(m³)

4. 결론

PAC 접촉조의 성능 평가를 위해 불소(F) 추적자실험을 수행하였으며, 맛·냄새 및 유기물질 제거효율을 조사하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 불소추적자 실험결과, 좌우대칭형(bisymmetry-type)으로 설계된 H 정수장의 PAC 접촉조는 압출형흐름 분율이 70% 이상으로 양호한 흐름특성을 보였다. 한편, 격벽을 보완한 미로형(maze-type)인 C 정수장 접촉조도 압출형흐름 분율이 70% 이상으로 흐름특성이 양호하였다.

- 2) 지난 2년 동안의 C 정수장 운영자료에 의하면, 5 내지 10 mg/L의 PAC를 일시적으로 투입하였음에도 불구하고, PAC의 투입으로 인해 정수의 TOC가 개선되었다는 뚜렷한 증거를 발견할 수 없었다. H 정수장의 경우에도 5~10 mg/L의 PAC를 지속적으로 투입하였음에도 불구하고, TOC 제거 효과가 미미하였다.
- 3) H 정수장 접촉조에서는 PAC의 투입으로 인한 유기물 제거효과가 거의 없었던 반면에, 실험실 Jar test에서는 PAC에 의한 유기물 제거를 확인할 수 있었다. 실험실 Jar test로 얻은 결과와 현장 접촉조에서 얻은 결과에 현저한 차이가 나는 것은 교반강도 달랐기 때문인 것으로 판단된다.
- 4) 대상정수장의 가동률(설계유량 대비 운전유량)을 조사한 결과, C 정수장이 27%, H 정수장 50%로 확인되었다. 결론적으로 낮은 가동률로 인한 교반강도의 감소가 접촉조의 효율저하를 초래하는 결정적인 원인임을 확인하였다.

사 사

본 연구는 한국수자원공사의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

배병욱, 김영일, 김현영, 김계남(1999). CLSA(closed-loop stripping apparatus)와 GC/MS를 이용한 상수원수 내 이취미 물질의 분석. *수질보전 한국물환경학회지*, **15**(4), pp. 479-487.

APHA, AWWA, WEF (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21th Edition.

Bae, B. U., Shin, H. S., and Choi, J. J. (2007). Taste and odor issues in Korea's drinking water industry. *Water Science and Technology*, **55**(5), pp. 203-208.

Hudson, H. E. Jr. (1981). *Water Clarification Process, Practical Design, and Evaluation*, Van Nostrand Reinhold, New York.

Kawamura, S. (2000). *Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities*, John Wiley & Sons, Inc., New York.

Kim, Y. I. and Bae, B. U. (2007). Design and evaluation of a hydraulic baffled channel PAC contactor for taste and odor removal from drinking water supplies. *Water Research*, **47**(5), pp. 2256-2264.

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.