

머릿말

우리나라 상수원은 인구증가와 산업의 고도화에 따른 오염 심화로 크고 작은 수질사고가 1988년 이후부터 여러번 발생됨에 따라 시민들은 수돗물에 대해 강한 불신감을 나타냈다. 그럼에도 불구하고 먹는 물에 대한 가치가 점차 증대되어감에 따라 이에 대한 대책이 시급한 상황이다. 수질오염문제를 해결하는 방법은 여러 가지가 존재하나 상수의 오염문제는 단지 상수만을 잘 처리한다고 해서 해결될 문제가 아니라 근본적인 오염원의 저감이 이루어져야 한다.

그러므로 현재 택할 수 있는 방법은 생활하수의 경우 발생량을 줄여 원천적으로 오염원을 제거할 수 있는 처리수 재이용 시스템(중수도시스템)이 도입되어야 할 것이다. 또한, 먹는 물에 대한 중요성이 부각됨에 따라 수돗물의 경우에는 양질의 물을 공급하기 위해 고도정수처리시스템을 도입하여야 한다.

고도정수처리시설(BAC공정)의 효율적 운영관리

글 _ 전일상 정수담당 · 박현석 박사 부산광역시 상수도사업본부 화명정수사업소
김유복 부산광역시청 환경보전과



1994년 초 발생한 낙동강 하류부 정수장의 악취사건은 국내 정수장의 고도정수처리시설 도입이 선택이 아니라 필수 사항이라는 인식을 심어주었으며, 정부의 '4대강 수질관리 개선대책' 일환으로 원수수질이 악화된 18개 정수장에 먼저 고도정수처리시설의 도입을 추진하게 되는 계기가 되었다. 선진외국에서는 1974년 Rook, Bellar 등이 염소 소독과정에서 발암물질인 트리할로메탄(Trihalomethanes, THMs)이 생성된다는 것을 발견한 이래로 이들의 처리를 위한 기술개발이 진행되었고, 미국은 수돗물 내에 Cryptosporidium 및 Giardia와 같은 원생동물 유입사건 이후 EPA를 중심으로 최적 처리기술(Best Available Technology, BAT)을 설정하여 현장에 적용하고 있다. 프랑스와 독일 등 유럽 등지에서 주로 보급되어 있던 오존시설을 입상활성탄과 병행하여 사용하게 되었으며, 1978년 Miller 등이 입상활성탄 내부에서 흡착기능이 아닌 미생물의 활동에 의한 유기물질 제거능력이 밝혀지면서 생물활성탄(Biological Activated Carbon, BAC)공정의 개발과 보급이 이루어졌다. 일본에서도 1970년대부터 고도

정수처리기술에 대한 검토가 이루어졌으며, 기존정수공정에 오존처리와 입상활성탄 여과공정 등을 부가시키는 형태로써 개발되었고 이들을 현장에 적용하고 있다. 우리나라 정수장에서도 초기에는 오존처리 또는 입상활성탄여과처리 공정이 각각 독립적으로 짧은 기간에 기존 재래식 공정설비에 추가 도입되었다. 또한, 1994년 최초로 H 정수장의 BAC(오존+입상활성탄여과)공정의 도입을 시작으로 낙동강 하류에 위치하고 있는 대구, 마산, 양산 등지에 위치한 대부분의 정수장에 BAC 공정이 설치되었다. BAC여과공정 운영에 관한 Know How나 전문인력이 전혀 없는 상태에서 공정설비 도입이 이루어지다 보니 많은 문제점이 발생되었고, 수많은 시행착오를 거쳐 설비개선 및 운영경험을 쌓아 갈 수밖에 없는 실정이었다. 약 10여 년의 짧은 기간동안 BAC공정에 대한 실제적인 경험과 지속된 연구로 미흡하나마 발전을 이루어 왔다. 이러한 축적된 경험과 연구를 토대로 한 BAC여과에 대한 개요를 소개하고, 주어진 고도설비에서 어떻게 하면 BAC공정을 효율적으로 운영할 것인가에 초점을 맞춰 전개해 나감으로써, 이미 도입하여 운전하고 있거나 앞으로 도입하고자 하는 정수장에 많은 참고자료가 되길 바란다.

1. 생물활성탄(BAC)여과란 무엇인가?

생물활성탄(BAC)공정이란 입상활성탄(GAC)에 형성된 갈라진 틈, 거대기공 및 미세기공에 작용하는 생물학적 과정을 말한다. 인위적으로 활성탄의 재용집에 의해 만든 기공은 박테리아 등과 같은 미생물이 서식하기에 아주 좋은 환경을 가지고 있고, 또한 작은 활성탄 입자 내에는 박테리아가 서식하기에 충분한 크기의 열린 기공이 무수히 많기 때문에 전처리 단계에서 살아남은 적은 양의 박테리아라 할지라도 입탄(GAC) 여과지에 유입하면 쉽게 증식될 수 있다. 활성탄은 탄소로 이루어져 있고 옛 성서시대부터 흡착제로 이용되어 왔으며, 다양한 원료로 만들어 질 수 있다. 또한 이러한 활성탄구조는 탄소끼리 이중결합에 의해 형성된 망상구조로 극성이 작고 표면이 거칠어 주로 무극성인 유기물질을 잘 흡착하는 특성을 가진다. 활성탄의 기공은 크게 거대기공(Macropore), 중간기공(Mesopore), 미세기공(Micropore)으로 구분되며, 유기물질들의 흡착메카니즘을 그림 1)에 나타내었다.

일반적으로 물속에는 자연발생적으로 함유된 유기물질(NOM), 맛과 냄새(T&O) 분자물질, 인위적으로 유입된 산업적 화학물질 및 살충제 등이 존재하며, 이들 대부분은 응집, 침전공정에서 제어되고 남은 미량의 유기물은 후오존공정을

거쳐 입상활성탄 공정에서 활성탄에 의해 쉽게 흡착된다. 활성탄에 서식하는 박테리아는 흡착된 유기물을 먹이로 살아가게 되므로 여과지에 유입되는 영양분이 적을 경우에는 미생물의 생체량이 줄어들게 된다. 또한 박테리아의 유기물질 대사에 필요한 것은 산소이므로 BAC공정에서는 여과지 전단계에 반드시 산소, 공기, 오존 등을 주입하게 된다. 일반적으로 오존을 많이 사용하게 되는데 이는 오존이 강력한 산화제로써 유기물질을 산화시켜 미생물에 의해 잘 분해될 수 있도록 도와주기 때문이다. 따라서 BAC에 관련된 오존의 역할은 호기성 박테리아의 활성화와 생물난분해성 용존유기탄소(NBDOC)를 생물분해성 용존유기탄소(BDOC)로 전환시키는 것이다.

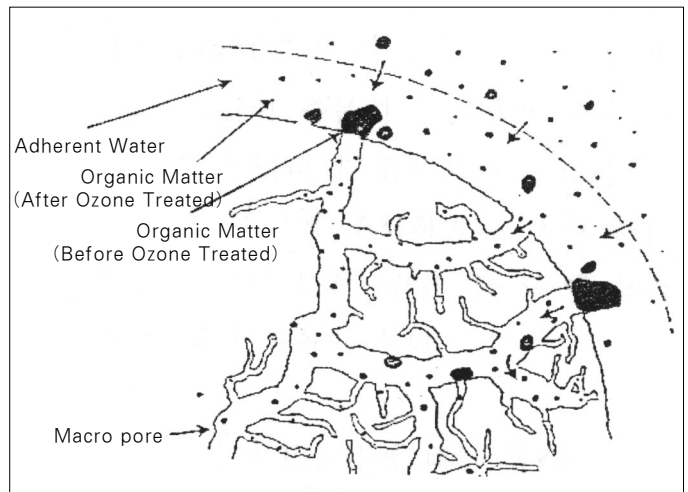


그림 1) 활성탄 기공내의 유기물질 흡착

이와 같이 유기물의 흡착과 미생물에 의한 분해 메카니즘의 반복으로 유기물 제거 능력을 지속시켜 주기 때문에 활성탄을 오랫동안 사용할 수 있어 경제적으로도 큰 장점을 가진다. 그 반면에 THMs 등과 같은 분자크기가 작은 분자들은 쉽게 흡착되나 미생물에 의해 분해 되지 않기 때문에 어느 정도 포화되면 대부분 제거되지 않고 빠져나가게 되므로 대량의 유해물질이 유입될 경우에 제거능력이 거의 없어지는 단점도 가지고 있다.

2. BAC공정에 미치는 변수

일반적으로 BAC공정에 영향을 미칠 수 있는 변수는 다음 5가지로 요약할 수 있다. 이들 요인을 실제 현장에서 적용된 사례와 함께 세부적으로 살펴보고자 한다.

- BAC공정에 영향을 주는 변수
 - 공탑체류시간(Empty Bed Contact Time; EBCT)
 - 수온
 - 역세척 주기
 - 산화물질의 존재
 - 원수 내 함유된 유기물

(1) 공탑체류시간

공탑체류시간(EBCT)은 수온, 활성탄종, 처리목표물질 등과 같은 여러 가지 변화요인에 의존하게 되며, 보통 수온이 더 낮아졌을 때 같은 수질결과를 얻기 위해서는 EBCT를 더 높여야 할 것이다. 모래와 Anthracite와 같이 생물학적 지지가 적은 경우에도 동일 수질결과를 얻기 위한 EBCT값은 더 길어져야 한다. 그래서 처리목표물이 기준흡착 요구량에 도달할 때까지 접촉시간이 충분히 길어야만 한다.

유럽에서의 접촉시간은 살충제에 대한 매우 엄중한 목표에 도달하기 위해서 10~15분 이상이다. 실제 현장에서 적용하고 있는 EBCT에 대한 예를 표 1)에 조사하였다. 일반적인 물에서 생물학적 성장을 활성화하기 위해서 실제 필요한 GAC 접촉시간은 2~5분에 불과하지만 차가운 물에서는 접촉시간을 약 20분 이상으로 길게 하여야 한다.

H 정수장에서는 표 2)와 같이 실제 BAC공정의 활성탄 층고 조절로 EBCT를 변화시켜 2002년 3~11월까지 약 9개월간 유

구분	해당정수장
15분 이상	덕산(5차, 2단계) : 16.분/덕산(6차1단계) : 16.1분/ 명장 : 15분/동두천 : 15.6분/ 파주 : 15분/공주(옥룡) : 16.8분/양산(웅상) : 16.4분/ 일본(가네마치) : 15분
10~15분 미만	대구(매곡, 두류) : 10분/울산(회야) : 12.5분/ 울산(선암) : 13.7분/프랑스Choisy : 10분

표 1) 현장 적용중인 EBCT에 대한 사례

구분	활성탄 층고	EBCT
여과지	(설계 : 2.35m)	(설계 : 8.17분)
4호지(야자계재생탄)	2.60m	12.4분
15호지(야자계재생탄)	3.50m	16.7분

표 2) 활성탄 층고 조절에 따른 EBCT 변화실험 조건

기물 제거효율을 조사하였으며 그 결과를 다음 그림 2)에 나타내었다.

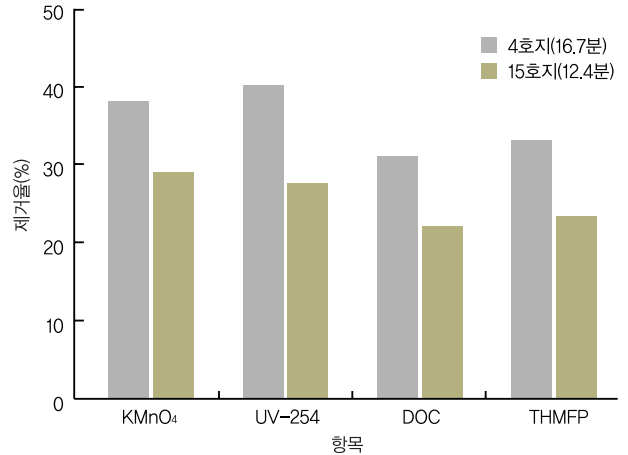


그림 2) EBCT에 따른 유기물 제거효율 변화

위의 그림 2)에 나타난 실험결과는 EBCT에 따른 유기물 항목별 평균 제거율이며, 현장 실험이라 여러 가지 변수가 작용하였지만 대체로 KMnO₄소비량과 DOC는 약 8%의 제거율 차이를 보이거나 UV-254 및 THMFP는 약 10%이상의 높은 차이를 나타내었다.

(2) 수온

수온의 변화는 미생물의 생체량 및 효소반응속도에 직접적인 영향을 미치므로 유기물질의 제거효율이 달라진다. 일반적으로 BAC공정에서의 활성탄 내 부착세균수가 약 108 cfu/g(습중량) 정도가 적정한 것으로 알려져 있으나 수온이 낮은 동절기에는 대체로 미생물 생체량이 크게 감소하여 106~107 cfu/g 정도를 유지하게 된다. 실제 H정수장의 BAC공정에서 수온변화에 따른 유기물 제거효율을 약 1년간 조사한 자료를 아래의 그림 3)에 나타내었고, 그 결과를 보면 수온의 변화와 제거효율이 잘 일치됨을 볼 수 있었다.

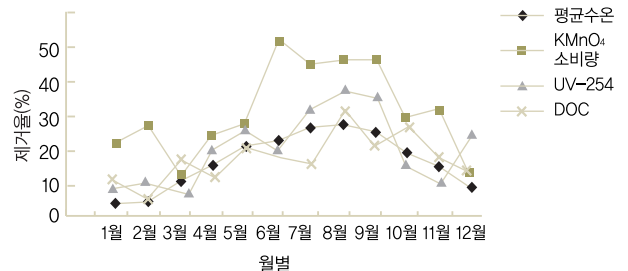


그림 3) 월별 평균 수온변화에 따른 BAC 처리효율

(3) 역세척 주기

BAC공정에 영향을 미치는 변수인 역세척 주기에 대하여 언급하고자 한다. 역세척 주기 또한 EBCT, 수온에 깊은 연관성을 가지고 있으며, 앞서 언급한 EBCT와 수온은 인위적으로 조절하기 어려우나 역세척 주기는 운전자의 경험을 토대로 적절히 조절할 수 있다는 특징을 가진다. 따라서 적절한 역세척 주기를 조절하는 것은 BAC 운영에 있어서 매우 중요하다고 볼 수 있다. 역세척 주기 결정요인은 운영하는 여건에 따라 달라질 수 있고 현재까지 정확한 정보가 부족한 실정임으로 지속적인 연구가 필요하다고 본다. 역세척 주기를 결정할 수 있는 중요한 요인은 미생물 및 탁질의 유출이며, 여러 번의 실험으로 이들 기준을 설정할 필요가 있기 때문에 여과정수 부분에 입도 분석계(Particle Counter Meter)가 설치되어야 한다. Camper(1987년) 및 Syrotynski(1971년) 등에 의하면 입상활성탄 여상이 깊을수록, 유입수 탁도가 높을수록, 여과속도가 클수록 여과수 중에 미생물과 탁질 등이 관찰되며, 특히 높은 여과속도(1.44~2.52L/min/m²)의 경우에는 더 많이 보였다고 발표한 바 있다. 하절기의 경우 수온의 증가로 미생물 증식속도가 빨라짐으로 유출되는 미생물 개체수가 많아지기 때문에 역세척 주기를 빨리 해야 할 필요가 있으며, 앞서 설명한 바와 같이 입상활성탄 층고(EBCT)가 클수록 유출 미생물 생체량이 증가함으로 역세척 주기를 빠르게 하여야 한다.

H 정수장의 BAC여과지 운영조건을 아래의 표 3)에 나타내었다. 여기서 보면 역세척이 수세식이며, 팽창율이 약 20% 밖에 되지 않기 때문에 활성탄 층고를 높여 EBCT변화를 줄 경우 역세척이 제대로 이루어지지 않을 것이므로 활성탄 층고 변화와 역세방식(물+공기 동시세척)을 병행 개선하여야 함을 알 수 있다.

또한, 사용연수 즉 처리수량이 많을수록 미생물 유출이 많아지기 때문에 역세척 주기를 앞당겨야 하고 활성탄 재생탄의 경우는 신탄보다 기공크기가 다소 커져 미생물 증식이 더 활성화되기 때문에 기존 신탄일 때보다는 역세주기를 약간 빨리 하여야 할 것이다. 이러한 모든 요인은 여과지에서 유출되는

공탐체류시간(EBCT)	8.17 분
선속도(LV)	17.26 m/hr
공간속도(SV)	7.34 m ³ /m ² /hr
역세척(수세방식) 속도 및 시간	30~35 m ³ /m ² /hr 및 10분
역세시 활성탄 팽창률	20%

표 3) BAC여과지의 운영조건

미생물과 연관이 있으나, 미생물의 생체량 실험인 경우 일주일 이상 소요되기 때문에 이 실험결과로 역세척 주기를 결정하기에는 문제가 있는 것으로 판단된다. 따라서 미생물과 관련된 경험적인 요소를 기준으로 하여 역세척 주기를 결정하는 것이 바람직하다. 아울러 BAC공정에서의 역세척 주기는 사여과지와 달리 손실수두와는 무관하나 공정상의 문제로 손실수두가 형성될 수도 있다. 역세척 주기가 적절하지 않을 경우 여과 유출수에 암모니아성 질소가 유출될 수 있는데 이는 미생물의 과다 증식으로 여과지 심층부에서 약간의 혐기성화가 일어나는 현상으로 보여진다.

사용연수 수온변화	1년 이하	1~2년	2년 이상
20°C 이상	5일	4일	2~3일
7~20°C	6~7일	5일	3~4일
7°C 이하	8일	6~7일	4~5일

표 4) 계절 및 사용연수에 따른 역세척 주기

실제 H 정수장 BAC공정에서 적용하고 있는 역세척 주기를 표 4)와 같이 나타내었으나, 앞서 언급한 활성탄 층고 및 역세 팽창률, 재생정도에 따라 달라질 수 있으므로 정수장 마다 나름대로의 여건에 알맞은 적정 기준을 설정할 필요가 있다. 유량에 따른 역세척 주기는 40만 톤/일 생산을 기준으로 설정하였으며, 40만 톤 이상인 경우 약 5일로 40만 톤 이하에서는 8일 주기로 하였다. 또한 원수 내 고탁도 유입 및 조류증가 등과 같은 수질변화 시나 사여과수 탁도 0.2NTU 이상일 경우 또는 이취미물질 증가시에는 역세주기를 1~3일로 단축시키고 역세시간을 10분에서 13~15분으로 연장시켜 운전하였다.

(4) 산화제의 존재

BAC여과공정의 유입수에 차아염소산(HOCl), 이산화염소(ClO₂), 클로라민(NH₂Cl), 오존(O₃, OH라디칼) 등과 같은 산화제가 존재할 경우 이들은 환원제의 역할을 하는 활성탄과 직접적으로 산화환원반응을 일으키거나 활성탄 외부로 노출되어 있는 미생물에 작용하게 되어 여과지 내의 전반적인 미생물의 생체량이 감소하게 됨으로 BAC여과의 형성을 저하시킬 것이다. 따라서 후오존 주입시 입탐유입수의 잔류오존농도가 0.1ppm 이상이 되지 않도록 조절하여야 하며, 후오존공정 이후에 약 30~40분 정도의 체류지가 설치되어야 한다. 충분한 체류지가 확보되어 있지 않은 동절기에는 수온이 낮아지기 때

문에 오존의 용해도가 증가하여 후오존을 적게 투입하여도 입탄유입수의 잔류오존농도가 높아지게 된다. 수온이 낮은 경우 미생물 활성이 감소하고 유기물질에 대한 오존반응속도가 느려지기 때문에 충분한 오존 투입이 필요하다.

H 정수장은 후오존 접촉조 후단에 별도의 체류지가 없으며, 후오존수를 자연유하로 입탄여과지에 유입시킬 수 없기 때문에 흡수정에서 펌프로 유입시키고 있다. 이 흡수정의 크기가 약 4,000m³로 체류시간이 약 12분밖에 되지 않기 때문에 충분한 체류지 역할을 하지 못하여 동절기에는 보통 0.3~0.7ppm 정도 오존을 투입하고 있는 실정이다.

동절기의 경우 원수 내 암모니아성 질소 및 규조류 등이 증가하게 되어 전처리 공정에서 전염소를 과량으로 투입하게 되므로 잔류염소와 클로라민이 BAC여과지에 유입되는 경우가 빈번히 발생한다. 특히, 클로라민은 염소나 오존보다 반응성이 약하고 활성탄에 흡착이 잘 되기 때문에 활성탄 기공내의 미생물에까지 영향을 미치게 되므로 미생물의 생체량이 크게 감소하게 된다.

(5) 원수 내 함유된 유기물

유기물질은 활성탄의 거대기공 내에서 서식하고 있는 미생물의 영양분이다. 따라서 원수수질이 너무 좋아 유기물 함량이 적을 경우 BAC여과지의 미생물에 직접적인 영향을 미치게 된다. 실제 현장에 '99년 후반기에 낙동강 원수수질이 크게 향상되어 원수 DOC 함량이 2.0ppm 이하로 유지된 때가 있었으며, 이때 활성탄의 미생물 생체량이 크게 감소하였음을 알 수 있었다. 이처럼 원수 내 존재하는 유기물질의 양이 적은 경우에는 미생물 개체수 감소와 함께 제거효율도 감소하게 된다.

3. BAC여과 효율을 어떻게 향상시킬 것인가?

'BAC여과공정에서 유기물 제거효율을 어떻게 향상시킬 것인가?' 라는 것이 공정운영에 있어서 주요관점이며, 앞서 설명한 요소 중 인위적으로 쉽게 조절할 수 있는 것은 역세척 주기와 전단계 오존(산화제) 투입농도이므로 적절한 역세척주기와 오존 투입비 조절로 제거효율을 최대화시키는 것이 가장 바람직하다고 본다. 적절한 오존의 투입은 강한 산화력으로 유기분자의 크기를 작게 하거나, 극성이 크고 용해성이 큰 관능기(카르복실기)를 가진 분자로 전환시킴으로써 박테리아에 의해 쉽게 동화되도록 하여 효율을 향상시킨다. 따라서 H 정수장에서는 예전에 후오존 주입비를 사여과수의 DOC함량에 따라 비례적으로 결정하였으나, 지금은 그림 4)와 같이 유지관리가



그림 4) 후오존 접촉조에 설치된 잔류오존농도계

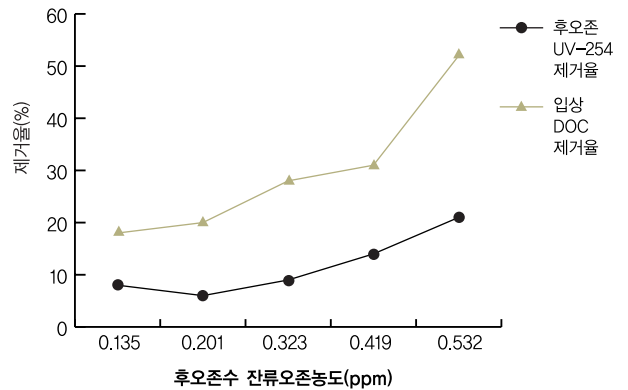


그림 5) 후오존 잔류오존농도 변화에 따른 DOC 제거효율

쉽고 정확성이 높은 잔류오존농도계를 구입하여 후오존수의 잔류오존농도를 측정함으로써 일정 잔류오존농도 기준으로 하여 오존을 투입하고 있다. 잔류오존농도는 수질 및 유량변화에 따라 변화하기 때문에 일정한 잔류오존농도가 유지되도록 하여 오존을 투입하면 문제가 되지 않으나, 계절별 수온변화 등에 따라 BAC여과 제거효율변화가 있기 때문에 잔류오존농도 변화에 따른 지속적인 제거효율조사가 필요하다. 수온이 약 18℃ 정도 되는 5월말~6월경에 실험한 결과자료는 위의 그림 5)에 나타내었다.

이 결과에 의하면 잔류오존농도가 높을수록 제거효율은 증가함을 볼 수 있으나, 원수수질조건에 따라 최적의 제거효율을 나타내는 잔류오존농도가 달라짐을 볼 수 있었다.

BAC 효율향상은 앞서 설명한 바와 같이 유기물질을 오존으로 산화시켜 미생물 분해가 잘 일어나도록 하는 것과 직접적인 관련이 있기 때문에 오존접촉효율을 향상시킬 필요가 있다. H 정수장의 후오존 접촉방식은 포러스 디퓨져식(산기식)으로 산

기관은 세라믹 디스크형을 사용하고 있고 디퓨저 교체 후 약 6개월 정도 사용하게 되면 접촉효율이 약 5~10% 정도 감소하게 되며, 약 2년 정도 사용하게 되면 약 20~30% 정도 크게 감소하기 때문에 전반적인 교체를 하고 있다. 접촉효율이 저하되는 이유는 공기압축기 교체 또는 단수작업 등 오존이 투입되지 않을 경우 물속에 존재하는 미세한 오존산화물질이 역방향으로 압력이 걸려 세라믹 기공을 막는 현상이 발생하게 되고, 공기를 원료로 오존을 만들 경우 발생기내에서 산화질소가 함께 만들어져 이것이 접촉조 디퓨저로 오게 되면 물과 접촉하여 강산화제인 질산 등이 만들어진다. 그러므로 오존에 강한 바이톤과 같은 박킹을 사용하더라도 부식이 일어나게 된다. 따라서 압력을 받으면 막힘과 부식 작용에 의해 산기관의 약한 부분으로 오존과 공기가 빠져 나오므로 Bulking 현상이 발생하여 접촉효율이 저하된다.

오존접촉효율을 향상시키기 위해서는 접촉방식을 개선하거나 과산화수소 및 자외선(UV) 등과 함께 오존을 접촉시키는 고도산화법(AOP) 도입이 필요하다. 주로 국외 정수장에서는 과산화수소(H₂O₂)를 사용하여 OH라디칼 형성을 촉진시키는 방식을 많이 사용하고 있다.

4. BAC여과공정이 수처리에서 왜 중요한가?

BAC여과 공정에 대한 중요성은 지역에 따라 원수수질이 다르기 때문에 차이가 있을 수 있다. 따라서 도입 전에 원수수질을 파악하고 처리효과 등을 분석하기 위하여 Pilot-plant를 설치하여 지속적으로 실험하고 검토한 다음에 도입목적을 설정하는 것으로 판단된다. 일반적으로 정수처리에서 사용하는 원수는 대부분이 표류수를 사용하기 때문에 천연유기물질(NOM)이 많이 포함되어 있고 염소나 오존처리를 할 경우 소독부산물 발생하게 된다.

이들 소독부산물(Disinfectant By-Products; DBPs)의 전구물질인 NOM은 BAC여과공정에서 잘 제거되나 대부분 전처리 단계에서 염소나 오존을 투입하기 때문에 소독부산물이 먼저 형성되게 된다. 따라서 전처리에 사용하는 염소나 오존은 농도를 적절히 조절하여 소독부산물의 형성을 최소화시켜야 한다. 형성된 소독부산물 중에서 트리할로메탄(THMs)은 BAC여과공정에서 거의 제거되지 않으나 초기 활성탄 충전 후 약 2개월까지는 80% 이상의 제거효과를 나타낸다. 염소소독부산물인 할로아세틱엑시드(HAAs), 할로아세토니트릴(HANs), 클로랄하이드레이트(CH)와 오존소독부산물인 브로메이트(BrO₃), 알데히드류 등의 대부분이 제거되는 것으로 알

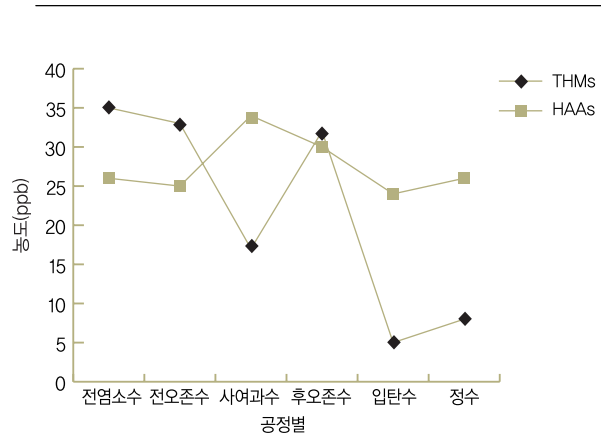


그림 6) 정수공정별 THMs 및 HAS 농도변화

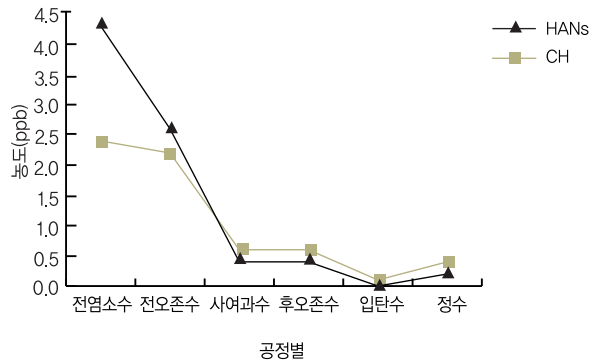


그림 7) 정수공정별 HANs 및 CH 농도변화

려져 있으며, 실제 정수공정에서 형성되는 염소소독부산물에 대한 조사를 그림 6)과 그림 7)과 같이 여러 번 실시하였다. 정수공정상에서 응집, 침전 및 BAC 공정에서 소독부산물 전구물질이 대부분 제거되기 때문에 후염소처리 된 정수의 소독부산물이 크게 증가되지 않았음을 볼 수 있다.

이외에 BAC여과는 활성탄종이나 사용연수에 따라 차이가 있을 수 있지만 미량의 살충제 및 환경호르몬물질 등을 제거시킬 수 있는 능력을 가지고 있다. Pilot상에서 고농도(30ppm)의 환경호르몬물질을 제조하여 정성적인 실험을 실시한 적이 있었는데 흡착능이 크게 떨어지지 않는 대부분의 활성탄에서는 잘 제거됨을 그림 8)처럼 알 수 있었다.

여기서 야자계 및 석탄계는 1차 재생탄으로 실제 현장에서 사용하지 6개월 이상 된 활성탄을 채취하여 충전하였고, 제오카본은 Pilot상에서 1년 이상 사용한 것으로 실험하였다. 석탄계-A(N사)와 석탄계-B(C사)는 충전초기 요오드가 약 200mg/g 정도 차이 나는 것을 사용하였기 때문에 제거효율도 크게 차이 나는 것으로 사료된다.

BAC여과공정은 원수 내 조류의 증가로 형성되는 흙, 곰팡이 냄새를 내는 Geosmin 및 2-MIB(2-Methyl-Isoborenol),

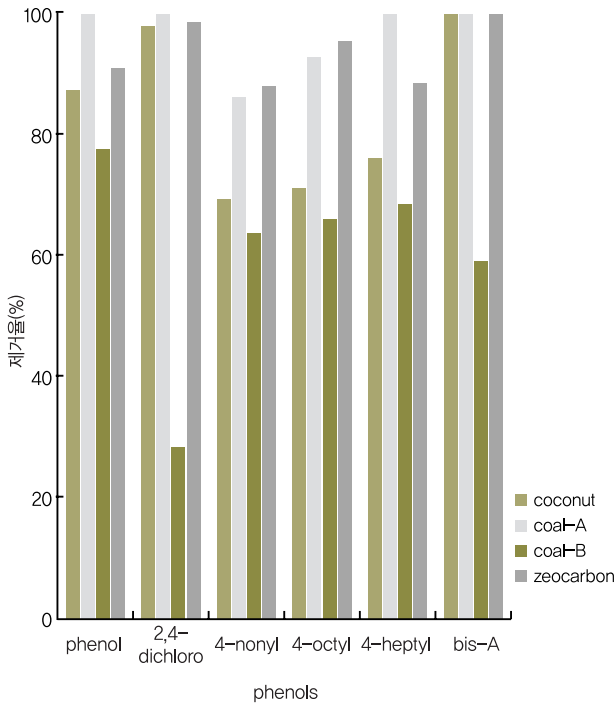


그림 8) 페놀류 환경호르몬물질의 BAC여과 제거효율

IPMP(2-Isopropyl-3-Methoxy Pyrazine), IBMP(2-Isobutyl- 3-Methoxy Pyrazine) 등의 이취미물질을 제거하기 위한 공정으로 사용되어 왔으며, 표 5)와 같이 Pilot상의 BAC공정에서 실험한 결과 후오존처리에서는 IPMP 및 IBMP 각각 81%, 64%의 높은 처리효율을 나타내었으며, 입상활성탄 흡착조를 통과할 경우 활성탄중에 상관없이 거의 100% 제거됨을 알 수 있었다.

생물활성탄(BAC)여과는 1~2년(재생전)까지는 DOC제거율 약 15~30%의 일정 제거효율을 유지시키고 소독부산물 및 전구 물질 등을 저감시키기 때문에 지속적인 수질을 유지시키는 효과를 가진다.

5. 생물학적 작용분석

생물활성탄(BAC)여과지의 활성탄에 서식하는 미생물생체량 및 미생물 생태 조사는 매우 중요하므로 활성탄 충전 이후 약 6개월마다 미생물생체량을 조사하고 활성탄 표면을 전자현미경으로 촬영하였다. 미생물은 표 6)과 같이 1~2개월 만에 증식되어 활성탄 표층 및 심층(1m)에서 미생물생체량은 활성탄 습식중량 1g당 107~108CFU로 유지되었다. 대체로 심층(1m)에서는 미생물 생체량(약 107CFU)이 적고 표층의 미생물 생체량이 높게 유지되는데 이는 표층쪽이 용존산소가 가장 높아 AOC의 흡착 분해 메커니즘이 원활히 이루어지고 있음을 의

구분	사여과수	후오존 처리수	석탄계	야자각	목탄계
IPMP(mg/L)	2.06	0.41	0.001	0.01	0.01
IBMP(mg/L)	0.89	0.32	0~0.0001	0.0003	0.0006

1997년 부산상수도 연구보(제3집) 인용

표 5) 후오존과 입상활성탄에서의 이취미물질 제거효과

미한다. 또한 동절기에도 미생물 생체량이 106~107CFU/g 습 중량으로 낮은 원인은 수온이 떨어져 미생물 활성이 저하되고 종속영양세균의 영양분인 AOC의 양이 감소되기 때문인 것으로 예측된다.

전자현미경(SEM)촬영결과에 따르면 수온이 10~20℃에서는 우점종이 주로 사상균과 간균이며, 수온이 낮은 동절기에는 사상균이, 수온이 높은 하절기에는 구균이 우점종이었다(그림 9, 10, 11 참조). 또한 수온에 따라 세균의 종이 변화하며, Psychrophilic (Cold-Loving) Bacteria는 4~10℃에서, Thermophilic (Heat-Loving) Bacteria는 50~55℃, Mesophilic (Moderation-Loving) Bacteria는 20~40℃범위에서 가장 적절히 성장됨이 알려졌다. 따라서 활성탄에 서식하는 종속영양세균의 종이 제거효율에 어떠한 영향을 미치는가를 알아보기 위해서 세균 종의 분석기술과 이에 따른 많은 연구가 필요한 실정이다.

입상활성탄 처리과정에서 발생하는 종속영양세균수의 증가는 효율적인 소독효과를 유지하는데 있어 매우 중요한 의미를 갖는다. 몇몇 연구에서는 활성탄 여과 후의 소독에 의해 유출되는 세균은 적절히 제어될 수 있다는 결론이 내려졌다. 그러나 다른 연구에서는 유출되는 활성탄 미립자에 부착되어 있는 세균은 소독제로부터 보호되기 때문에 소독이 어려우므로 염소 소독방법에 대한 검토가 요구된다. 특히 신탄(GAC) 및 재생탄 투입 직후 미탄의 유출 가능성이 매우 높으므로 활성탄(신탄) 세척을 충분히 한 후 생산하여야 한다.

6. BAC 여과공정의 제거효율

H 정수장에서 사용하고 있는 활성탄은 야자껍질을 원료로 제조된 S사 신탄 1지(200m³), 1차재생탄 8지(1600m³), 2차재생탄 3지(600m³)로 충전되어 있으며, 역청탄을 원료로 제조된 N사, C사의 외국산 입상활성탄은 1차 재생하여 각각 1지씩 충전하였다. 나머지 국내산 석탄계 신탄 3지, 1차재생탄 1지로 충전되어 있으며 그러한 활성탄의 물성치는 표 7)과 같다.

BAC공정 가동 이후 매일 공정별로 채수하여 수질분석하였

여과지명(품명)	시료채취 지점	미생물활성도 (mgC/m ³ ,h)	미생물 생체량 (cfu/g)
1호지 (석탄계 신탄)	표층	2.66	3.0 × 10 ⁸
"	0.5m	2.52	1.2 × 10 ⁷
"	1.0m	2.27	4.1 × 10 ⁶
3호지 (야자계 재생탄)	표층	2.72	1.3 × 10 ⁷
5호지 (야자계 재생탄)	표층	3.08	4.2 × 10 ⁷
"	0.5m	2.56	1.6 × 10 ⁷
"	1.0m	2.42	1.1 × 10 ⁷
11호지 (C사 석탄계)	표층	2.85	6.4 × 10 ⁷
12호지 (N사 석탄계)	표층	2.96	8.1 × 10 ⁷
"	0.5m	2.56	2.1 × 10 ⁷
"	1.0m	2.48	1.7 × 10 ⁷
14호지(야자계)	표층	2.75	3.0 × 10 ⁷

표 6) BAC 미생물 조사 결과

물 성	활 성 탄 종 류			
	Coconut virgin	Coconut 재생탄	Coal-A(N사) 재생탄	Coal-B(C사) 재생탄
충진밀도 (g/cc)	0.46	0.43	0.33	0.48
경도(%)	97.4	94.7	95.0	94.8
MB탈착력 (ml/g)	220	219	195	157
요오드흡착력 (mg/g)	1,200	1,084	824	622
비표면적 (m ² /g)	1,250	1,204	-	-
세공용적 (cc/g)	0.54	0.62	-	0.53
입도 (8×32 mesh)	99	99	-	-

표 7) GAC의 물리적 특성

고, 시료채수 지점은 입탄수를 포함하여 12개 지점이다. 미량 유기물질의 대표 항목인 용존유기탄소(DOC), UV-254, KMnO₄ 소비량 및 THMFP의 제거효율을 연도별로 그림 9)에 나타내었다.

그림 9)에서 보면 사용한지 약 3년 정도 경과한 '98년도 DOC 및 UV-254 연평균 제거율이 약 10%정도밖에 되지 않음을 알 수 있으나, '99년도 5지의 야자계를 위탁 재생함으로써 약간 증가하였고 2000~2001년에 걸쳐 자체 재생공장을 확보하여 재생을 추진함으로써 제거율이 점차 증가하였다.

열처리 재생 방식에 의해 재생된 활성탄의 특성은 신탄과는 다른 양상을 나타낸다. 기공구조의 변화, 경도의 변화, 용출유기물량의 변화 등이며, 이중 재생탄의 수처리 능력과 관련해서 중요한 것은 바로 기공 구조의 변화이다. 일반적으로 열처리 재생에 의해 활성탄의 기공들은 조금씩 확대되는 양상을 보인다. 즉 미세기공(Micropore)의 비율이 상대적으로 감소하고, 중기공(Mesopore)의 비율이 증가한다. 이러한 기공상의 변화가 클수록 활성탄의 용존 유기물 흡착능력은 저하되며, 결국에는 재생탄의 정수처리 능력 저하로 연결된다.

N사 활성탄은 BAC 또는 GAC 정수장 전용 활성탄으로써 최초 생산공정에서부터 재생탄의 정수처리 능력을 감안하여 개발되었기 때문에 이러한 열처리에 의한 기공구조의 변화가 적게 나타나므로 재생탄의 수처리 능력은 신탄과 유사하게 나타난다. 이러한 사실은 표 8)의 재생탄에 의한 처리수질을 통해서 확인할 수 있다.

이 결과에 의하면 DOC 제거율의 경우 N사 활성탄과 국내 활성탄의 재생 전후 DOC 제거율 변화는 다음과 같다.

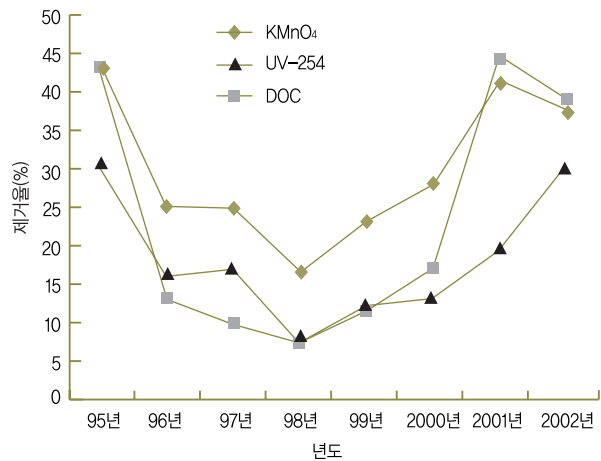


그림 9) 연도별 BAC 처리효율

분석 항목	구분	원수	사여과수	N사	석탄계	야자계	야자계
				재생탄	신탄	재생탄	신탄
KMnO ₄ (mg/l)	10.0	3.0 (64.7%)	1.5 (50.0%)	1.5 (50.0%)	1.5 (50.0%)	1.5 (50.0%)	1.7 (43.3%)
UV-254 (cm ⁻¹)							
DOC (mg/l)	0.0602	0.0216 (50.8%)	0.0126 (41.7%)	0.130 (39.8%)	0.0123 (43.0%)	0.0137 (36.6%)	
	3.75	2.24 (28.6%)	1.60 (28.6%)	1.60 (28.6%)	1.60 (28.6%)	1.69 (24.6%)	

2002년도 연평균 자료임.

사여과수제거율은 원수대비이고 입탄수제거율은 사여과수 대비임.

표 8) 재생탄에 의한 처리수질

① N사 활성탄

- 신탄 DOC 제거율 : 약 40%
- 5년 사용 후 DOC 제거율 : 약 10%
- 재생 후 DOC 제거율 : 약 30%

② 국내 활성탄

- 신탄 DOC 제거율 : 약 28.6%
- 5년 후 사용 후 DOC 제거율 : 약 10%
- 재생 후 DOC 제거율 : 24.6 %

N사 재생 후 DOC 제거율은 약 30%로서 재생 전 DOC 제거율 10%에 비하면 거의 신탄과 유사한 수준으로 활성탄의 흡착력이 회복되었음을 알 수 있다. 야자계 활성탄의 재생 후 DOC 제거율도 24.7%로 신탄의 효율과 거의 유사하게 나타난 이유는 야자계 신탄의 경우 초기 제거율이 다른 석탄에 비해 낮기 때문이다. 석탄계 및 야자계 모두 재생전의 DOD 제거율 10%에 비해 별다른 흡착력 향상을 나타내지 못하고 있음을 볼 수 있는데, 이는 활성탄 적정 재생기간을 훨씬 지난 경우에는 활성탄 흡착능의 회복이 잘 되지 않아 제거율이 저하되기 때문이다. 즉 N사 활성탄과 국내 활성탄의 수처리 능력을 비교해 보면 신탄 및 1차 재생한 재생탄의 경우 모두 약간의 차이를 나타냄을 알 수 있었다.

7. 활성탄 재생

대용량의 활성탄을 사용하는 GAC 또는 BAC 시스템을 채택하고 있는 정수장에서 활성탄의 재생은 유지관리비와 관련된 중요한 문제 중의 하나이다. H 정수장의 BAC공정에서 사용되었던 국내 활성탄과 N사 활성탄 그리고 C사 활성탄의 재생 결과에 근거하여 재생 손실율, 재생탄의 수처리 능력, 재생탄

의 수명, 재생가능횟수를 비교하고자 한다.

본 활성탄 재생은 설치된 재생설비에서 실시되었으며, 재생로의 사양 및 재생조건은 다음과 같다.

- 재생 설비 사양
 - 재생로 타입 : 다단상로(6단)
 - 재생방법 : 열처리 재생 (Thermal Regeneration)
 - 재생능력 : 6ton/day×2 set
- 재생 조건
 - 활성탄의 사용기간 : 약 5년
 - 재생 전 활성탄의 요오드가 : 400~500 mg/g
 - 재생 후 활성탄의 요오드가 : 820~870 mg/g

(1) 재생시 손실율

일반적으로 N사 활성탄의 재생시 손실율은 열처리 재생에 의한 손실분 6%, 재생과정 또는 운송과정에서의 마찰에 의한 손실분 4% 등을 포함하여 10%를 기준으로 한다. 하지만 이러한 재생탄 손실율은 활성탄의 사용기간, 재생에 의한 요오드가 증가율 등 다양한 변수에 의해 다소 가변적이다.

2001년도 재생 처리된 활성탄의 경우 사용기간이 5년 정도로서 적정 유효기간을 상당히 초과한 상태이며, 따라서 과도한 유기물의 흡착과 경도의 약화 등을 감안할 때 일반적인 경우에서보다 재생에 의한 손실율이 다소 높게 나타난다. 각 사 활성탄의 재생 결과는 아래의 표 9)와 같다.

구 분	탄 종	N사	국내활성탄	C사
	ROW 0.8 SUPRA			F400
사용기간		5년	5년	5년
재생전 요오드가		약 400	약 500	약 400
재생후 요오드가		820	870	600
재생 손실율(%)		19	21	40
경도(%)		95~96	94 이하	95
회분(%)		13	8~10	15

표 9) 재생결과

외형상 N사 활성탄의 재생 손실율은 19%, 국내 활성탄은 21%, C사 활성탄은 40%이다. 하지만 주목해야만 할 것은 N사 활성탄의 재생에 의한 요오드가 상승은 420인 반면, 국내 활성탄의 경우에는 350 정도에 불과하다는 점이다. 즉 N사 활성탄과 동일한 조건에서 국내활성탄의 재생이 실시되었다면 국내 활성탄의 손실율은 보다 높게 나타날 것이다.

실제로 활성탄의 재생 과정에서 국내 활성탄의 요오드가 상승률을 낮게 설정한 것은 국내 활성탄의 과도한 재생손실에 기인한다. 이러한 재생 결과에 근거할 때 N사 활성탄과 국내 활성탄의 재생 손실률 차이는 최소 5%, 최대 10% 정도로 판단된다. C사 제품의 경우 40%에 이르는 과도한 재생 손실로 인해 재생을 중단하였다.

(2) 재생주기

활성탄 재생 주기는 특정 항목 제거율(DOC 등) 또는 활성탄 흡착능력(요오드가 등) 조사 결과를 분석하여 결정하며, 수질 및 운영에 따라 재생주기는 달라질 수 있다. 따라서, 연속적인 실험을 통해 살충제 등과 같은 특정 항목에 대한 제거효율을 지속적으로 조사하여 완전히 파괴점에 도달하기 전에 재생시점을 결정하는 것이 활성탄 수명을 연장시킬 수 있고, 수질적 위험성을 최대도로 줄일 수 있다. 또한 활성탄 흡착능(요오드가)에 의한 재생 주기는 요오드가가 500~650mg/g 정도로 감소되었을 때 재생하는 것이 가장 적합한 것으로 알려져 있다. 연도별 BAC 제거효율은 그림 9)에서 '98년도 3월 이후부터 평균 제거효율이 10% 정도로 감소되었다.

(단위 : mg/g)

구분	신탄('95년도)*	실험치('98. 10)	Δip
활성탄 종류			
S사 (야자계)	1196	710	486
N사 (석탄계)	1055	580	475
C사 (석탄계)	1025	620	405

한국화학연구소 측정 자료

표 10) 입상활성탄 흡착능(요오드가) 실험결과

그리고 이 시기에 실시한 요오드가 실험 결과를 위의 표 10)에 나타내었으며, '95년도 신탄의 경우 요오드가가 1,050~1,200mg/g 이었으나 약 3년 동안 사용한 '98년 10월에는 600~700mg/g 정도로 크게 감소되었음을 볼 수 있다. 활성탄(GAC) 수명은 원수수질이나 운영방법에 따라 차이가 날 수 있고, 특히 활성탄종이나 재생횟수 등에 따라 많은 차이가 있으므로 재생주기 결정은 특정 수질항목을 선정하여 지속적인 제거효율분석과 활성탄 흡착능을 조사하여 적정 주기를 결정하는 것이 가장 바람직하다고 본다.

실제 현장에서 사용하고 있는 재생탄 및 신탄을 충전 초기부터 분기별로 요오드가, 충전밀도, MB탈색력, 회분 및 DOC 제거율을 조사하여 재생주기 및 재생조건에 중요한 자료를 확보

하였다. 아래의 그림 10)은 야자계 1차 재생탄으로 2001년도에 재생한 후 충전하여 처리수량에 따른 요오드가 및 DOC 제거율을 조사한 자료이다. 재생 후 초기 요오드가가 약 800mg/g 이었으나 약 1년 동안에 급격히 감소하여 600mg/g 정도로 감소하였고, 그 이후부터는 감소폭이 줄어들었다. DOC제거율도 흡착능이 감소함에 따라 초기 약 50%에서 1년 6개월 만에 약 15%대로 크게 감소하였다가 일정한 제거율을 나타내었다. 낙동강 원수를 취수하고 있는 H 정수장의 경우 BAC운영에서 활성탄 재생주기는 수질 및 활성탄 흡착능의 실험결과를 종합해 볼 때 약 2~3년 주기로 재생을 실시하는 것이 가장 효율적일 것으로 고려된다.

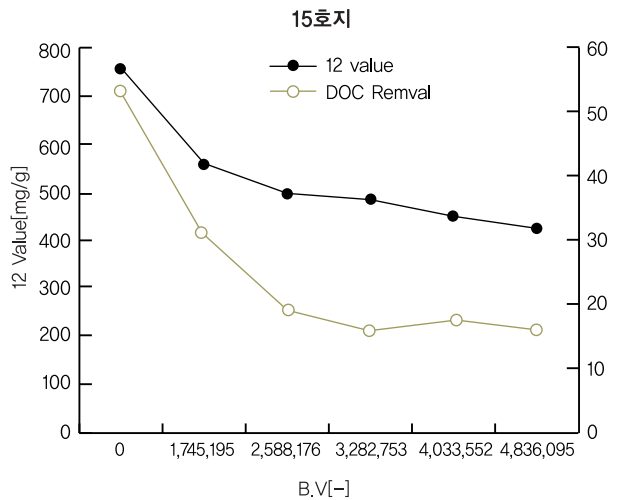


그림 10) 처리수량에 따른 요오드가 및 DOC제거율 변화

맺음말

끝으로 BAC여과공정의 운영은 주어진 설비 여건 및 원수수질 등에 따라 조금씩 달라질 수 있으므로 지속적인 실험 및 경험을 토대로 적정한 운전조건을 설정하여야 할 것이다. BAC공정에서 활성탄 재생주기 및 역세척 주기 결정은 처리수질과 운영비에 직접적인 관계가 있기 때문에 신중히 검토되어야 한다. 또한 응집·침전, 여과공정인 전처리단계도 BAC공정의 효율적 운영에 많은 영향을 미치므로 최선의 관리가 필요하다.

우리나라는 고도정수처리의 도입시기가 얼마 되지 않기에 전문 인력이 부족한 실정이고, 대부분의 기술을 외국에 의존하고 있는 실정이므로 인력양성 및 기술향상을 위해 많은 투자가 있어야 한다. 오존 및 입상활성탄여과 설비의 국산화 및 고도산화처리(AOP)기술 적용, 오존용해장치와 같은 최신 기술도입 등으로 정수처리기술 발전을 위해 꾸준히 노력해야 할 것이다. ☺