

수중 과염소산염(Perchlorate) 제거를 위한 맞춤형 분말활성탄 제조

김상구[†] · 송미정 · 최근주 · 유평중 · 김신철* · 이용두**

부산수질연구소 · *신광화학공업(주) · **제주대학교 해양과학부 토목환경공학전공

(2007년 10월 26일 접수, 2008년 6월 2일 채택)

Manufacturing Tailored Powder Activated Carbon for Removing Perchlorate in Water

SangGoo Kim[†] · MiJeong Song · KeunJoo Choi · PyungJong Ryu · ShinChul Kim* · YongDoo Lee**

Busan Water Quality Institute · *Shin Kwang Chem. Co., LTD

**Department of Civil and Environment Engineering, College of Ocean Sciences, Cheju National University

ABSTRACT : The aims of this research were to manufacture tailored powder activated carbon having a higher perchlorate removal efficiency and to compare perchlorate removal efficiency with different carbon materials for applying to the drinking water treatment plant. Activated carbon pre-loaded with cetyltrimethylammonium chloride(CTAC) has been researched to be an effective adsorbent for removing perchlorate in the water. 10,000 mg/L tailored powder activated carbon were manufactured by mixing 5.0 g of powder activated carbon(PAC) into 500 mL of 5,000 mg/L CTAC solution. The tailored powder activated carbon had 10 times higher perchlorate removal efficiency than virgin powder activated carbon. The residual perchlorate gradually decreased with the first 15 minute contact time with the tailored powder activated carbon, however, the longer contact time did not affect perchlorate removal. Tailored powder activated carbon by manufactured with 1,083 mg/g iodine value carbon had almost 4 times higher perchlarate removal efficiency than the 944 mg/g iodine value carbon. Dosage of 5 mg/L tailored powder activated carbon, which can adaptable dosage at the treatment plant, could decrease the perchlorate concentration from 50 µg/L to 15 µg/L.

Key Words : Perchlorate, Tailored Powder Activated Carbon, Cetyltrimethylammoniumchloride(CTAC)

요약 : 이 연구는 과염소산염 제거를 위하여 정수처리장에서 적용 가능한 맞춤형분말활성탄 제조와 활성탄 종류에 따른 제거효율은 비교하기 위하여 수행하였다. Cetyltrimethylammoniumchloride(CTAC)를 이용하여 활성탄에 흡착 전처리하면 과염소산염을 효과적으로 제거 할 수 있었다. 10,000 mg/L 맞춤형분말활성탄은 농도 5,000 mg/L CTAC 용액 500 mL에 5 g의 분말활성탄을 혼합하여 제조하였다. 맞춤형분말활성탄을 이용하면 일반 분말활성탄에 비해 10 이상 높은 과염소산염 제거가 가능하였다. 맞춤형 분말활성탄을 이용하여 과염소산염 제거 시 초기 접촉시간 15분은 접촉시간에 따라 잔류 과염소산염의 농도가 줄어들었으나 15분 이후에는 잔류농도의 변화가 거의 없었다. 맞춤형분말활성탄 조제 시 활성탄의 요오드가에 따라서 과염소산염 제거능이 달랐는데 요오드가 1,083 mg/g 활성탄은 요오드가 944 mg/g 활성탄에 비해 4배 이상 높은 과염소산염 제거능을 보였다. 일반적으로 정수장에서 주입 가능한 분말활성탄 농도인 5 mg/L 범위의 맞춤형분말활성탄 주입농도에서 50 µg/L의 과염소산염 농도를 15 µg/L까지 저감 가능하였다.

주제어 : 과염소산염, 맞춤형분말활성탄, Cetyltrimethylammoniumchloride(CTAC)

1. 서론

과염소산염(ClO₄)은 자체의 강한 산화력을 가진 물체로 고체 연료의 추진체로 많이 이용되고 있는데, 과염소산염은 1997년도 미국 네바다주 헨들슨 지역에 있는 화학공장에서 유출되어 레이크 미드와 콜로라도강을 오염시켜 아리조나, 남부네바다, 캘리포니아, 소수지역 및 멕시코의 약 1,500~2,000만 명의 식수오염을 일으키는 사고가 있었으며, 낙동강의 경우에도 구미공단의 한 전자제품 회사에서 세정제로 사용한 과염소산염이 하수 처리되지 못한 채 방류되어 수원을 오염시키는 사고도 있었다.

과염소산염이 인체에 미치는 영향으로는 갑상선에서 요오드흡수를 방해하는 것으로 알려져 있고 과다 복용 시에는 빈혈과 치명적 뇌손상을 발생 시킨다고 한다.¹⁾ 미국 캘리포니아 주에서는 보건 건강을 위해 목표치를 음용수에서 6 µg/L 이하로 권장하고 있다.²⁾ 상수 원수 중에 과염소산염이 존재할 때 정수처리장에서 과염소산염을 제거하기 위해서는 정수장에 도입 가능한 처리공정의 선정이 중요하다. 미국 EPA에서는 과염소산염에 대하여 다양한 처리방법을 제시하고 있는데,²⁾ 이 중에 급속여과공정을 채택하는 정수처리과정에 도입 가능한 방법으로는 이온교환과 활성탄을 이용하는 방법이 있다. Xu 등은 4가의 암모니움 세제를 활성탄에 흡착시키면 활성탄의 표면이 양이온 세제를 흡착할 수 있는 소수성 체인을 형성한다는 내용을 발표하였고³⁾ Wachinski와 Clifford는 양이온 세정제가

[†] Corresponding author

E-mail: sgkim0822@hanmail.net

Tel: 055-323-4718

Fax: 055-323-4719

고체표면에 부착되면 4가 양전하의 세정제는 이온교환제의 역할을 하여 과염소산염을 제거할 수 있다고 하였다.^{4,5)} 이 4가의 암모니움기는 강염기성 음이온 수지역할을 하여 수중의 과염소산염이 제거된다고 하였다.

Cannon은 입상활성탄에 4가의 알킬아민인 Cetyltrimethylammonium chloride 및 암모니아를 흡착시킨 맞춤형입상활성탄을 이용하여 과염소산염 제거능을 연장하는 연구를 하였다.^{6~10)} 이 방법은 4가의 알킬아민을 흡착시킨 입상활성탄을 이용하여 수중에 있는 과염소산염을 이온적으로 결합시켜 제거한다. 4가의 알킬아민을 흡착시킨 맞춤형입상활성탄은 장시간에 걸쳐 수중의 과염소산염 제거가 가능한 방법이지만 맞춤형입상활성탄을 정수처리 과정에 도입할 때 입상활성탄에 흡착시킨 4가의 알킬아민이 누출되어 맞춤형입상활성탄 공정 이후에 이들 물질을 흡착 제거해야 하는 또 다른 활성탄 흡착공정이 요구되는 문제점이 있다. 본 연구의 목적은 현재 급속여과방법으로 정수 처리하는 정수장의 원수에 과염소산염이 유입 될 때 기존의 정수처리 방법인 분말활성탄에 Cetyltrimethylammonium chloride을 흡착시킨 맞춤형활성탄을 이용하여 과염소산염 제거뿐만 아니라 맞춤형활성탄 이후 공정에서 4가의 알킬아민 누출을 최소화 시킬 수 있는 방안을 제시함으로써 기존의 급속여과 방법인 정수처리 공정에서도 적용이 가능토록 하기 위해 수행하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 맞춤형 분말활성탄 제조

요오드 흡착능에 따른 과염소산염의 제거효율을 평가하기 위하여 요오드가 944 mg/g과 1,083 mg/g인 두가지 종류의 분말활성탄을 이용하였으며 맞춤형활성탄을 제조하기 위해 사용된 4가의 알킬아민은 일본 Wako pure chemical사의 Cetyltrimethylammonium chloride(CTAC)을 이용하였다.

맞춤형활성탄의 제조순서는 Fig. 1과 같은 순서로 500 mL 비이커에 2.5 g의 CTAC를 주입하여 5,000 mg/L CTAC 용액을 제조 한 후 분말활성탄 5.0 g을 주입하여 10,000 mg/L 활성탄 용액이 되도록 하였다. CTAC가 분말활성탄에 흡착되는 시간에 따라 변화되는 과염소산염 제거효율을 비교하기 위하여 CTAC 용액에 분말활성탄을 혼합 후 시간 경과에 따라서 제거효율을 평가하였다. 맞춤형분말활성탄 주입농도에 따른 제거 실험 전에 분말활성탄을 CTAC 용액에서 분리를 하였다. 분리방법은 10,000 mg/L의 맞춤형분말활성탄 25 mL를 0.2 μm 멤브레인 필터로 CTAC용액을 여과하고 0.2 μm 멤브레인 필터에 여과된 분말활성탄은 가압수로 여지에서 탈리시켜 25 mL로 다시 조제하여 10,000 mg/L로 만들었다.

2.2. 실험방법

과염소산염 표준용액은 Aldrich사 NaClO₄ 분말을 증류수에 희석하여 100 mg/L로 제조하였고 표준용액은 실험시마

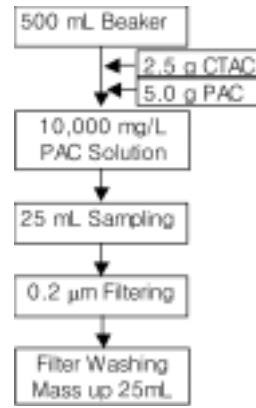


Fig. 1. Procedure of manufacturing the tailored PAC.

다 시료수의 농도가 50 μg/L가 되도록 pH 7.3~7.8, DOC 1.1~1.3 mg/L 정도인 수돗물에 희석하여 제조하였다.

50 ± 5 μg/L인 시료수를 실험실 온도에서 수개의 1 L 비이커에 취해 CTAC처리한 맞춤형분말활성탄을 여러 단계의 농도차이를 두어 주입한 후 약 60 rpm 교반 시키면서 맞춤형분말활성탄 주입농도에 따른 과염소산염 제거특성 및 동일농도의 맞춤형분말활성탄 주입시 맞춤형활성탄 제조시 CTAC 용액에 분말활성탄과의 접촉시간에 따른 과염소산염 제거효율을 비교하였다. CTAC 용액에 혼합되어있는 분말활성탄과 CTAC용액에서 분리된 맞춤형활성탄의 과염소산염 제거효율도 비교하였다.

2.3. 과염소산염 분석방법

과염소산염 분석은 ion chromatograph(DX-320, Dionex, U.S.A.)를 사용하여 Ion Pak AS 16 컬럼과 AG 16 guard 컬럼을 사용하여 US EPA method 314에 근거하여 분석하였다. 과염소산염 표준용액은 Aldrich사의 sodium perchlorate 98%를 사용하여 100 mg/L의 농도로 조제한 표준용액을 희석하여 1~50 μg/L로 조제한 시료를 이용하여 검량선을 작성하였다. Eluent는 50 mM KOH를 사용하였으며 유량은 1.2 mL/min으로 하였다. 본 분석조건에서 과염소산염 검출한계는 1 μg/L이었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. CTAC용액의 영향

Fig. 2는 과염소산염 초기 농도가 53 μg/L인 시료수에 요오드가 944 mg/g인 분말활성탄을 증류수에 희석한 용액을 농도별로 주입한 것(PAC:■)과 5,000 mg/L CTAC용액에 분말활성탄을 주입하여 10,000 mg/L로 조제한 맞춤형분말활성탄 용액을 바로 과염소산염 시료수에 농도별로 주입한 경우(CTAC(Inc.):○)와 맞춤형분말활성탄 용액에서 맞춤형분말활성탄을 0.2 μm여지에 여과하여 CTAC용액과 분리하여 분리된 맞춤형분말활성탄을 농도별로 주입했을 때(CTAC(Sp):●)의 결과를 나타냈다. CTAC로 처리하지 않은 분말활성탄을 바로 주입 했을 때는 분말활성탄 농도를

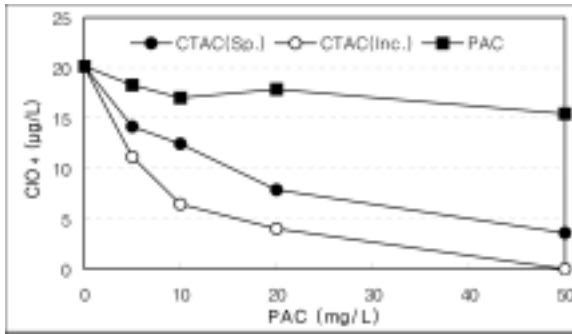


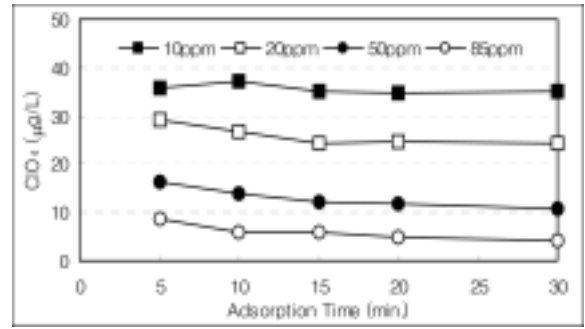
Fig. 2. Effect of removing perchlorate with tailored and virgin PAC dosage.

CTAC(Sp.) : separated tailored PAC from CTAC solution, CTAC(Inc.): tailored PAC in the CTAC solution, PAC : PAC in the distilled water

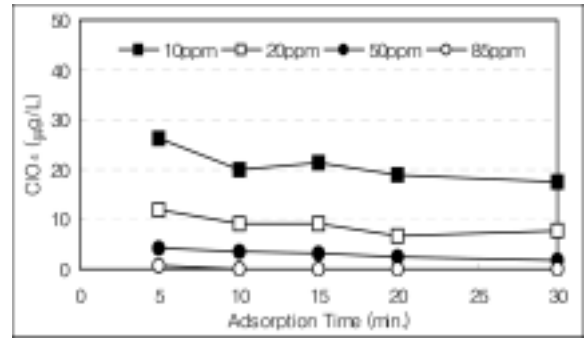
85 mg/L까지 증가 주입하여도 잔류 과염소산염이 41.6 µg/L로 20% 정도 밖에 제거효율을 나타내지 못했으나 CTAC와 함께 맞춤형활성탄을 주입했을 때는 약 10 mg/L 주입에서 17.4 µg/L 정도 잔류되어 66% 정도의 효율을 나타내었으며 50 mg/L주입률에서는 1.9 µg/L로 97% 이상의 제거효율을 보였다. 그러나 CTAC 용액과 분리한 맞춤형활성탄을 이용하여 처리한 경우 CTAC와 함께 주입한 경우에 비해 과염소산염 제거효율이 낮았으나 순수하게 분말활성탄을 이용한 경우보다는 높은 제거효율을 보였다. 분말활성탄을 CTAC에서 분리하여 주입했을 때가 CTAC와 함께 주입했을 때보다 처리효율이 낮은 이유는 맞춤형활성탄을 CTAC용액에서 여과 분리시 분말활성탄에 흡착되어 있던 일부 CTAC가 탈착되거나 압력수를 이용하여 필터에서 탈리시킬 때 CTAC가 활성탄에서 빠져나와 활성탄에 흡착된 단위 CTAC의 양이 줄어들었기 때문으로 보인다. CTAC와 분말활성탄을 동시에 주입하면 CTAC도 동시에 분말활성탄 주입농도에 비례하여 주입되어 처리수가 CTAC에 오염되는 결과를 낳게 된다. Canon은 입상활성탄을 CTAC를 이용하여 제조한 맞춤형활성탄으로 과염소산염을 이용하여 처리했을 때 활성탄공정 이후에 누출되는 CTAC를 처리하기 위한 또 다른 흡착 공정이 필요하다고 하였다.^{6,7)} 그러나 CTAC로 제조한 맞춤형활성탄을 CTAC용액에서 고액 분리하여 과염소산염 처리를 하면 처리 후 CTAC에 의한 재오염을 방지하는데 도움이 된다. 맞춤형활성탄에서 CTAC가 일부 유출되어도 입상활성탄 시설이 가동되고 있는 정수장에서는 일부 유출되는 CTAC가 있어도 입상활성탄에서 완전히 제거 가능할 것으로 판단되므로 최종정수에서는 문제가 없을 것으로 생각된다.

3.2. 흡착 시간별 과염소산염 제거

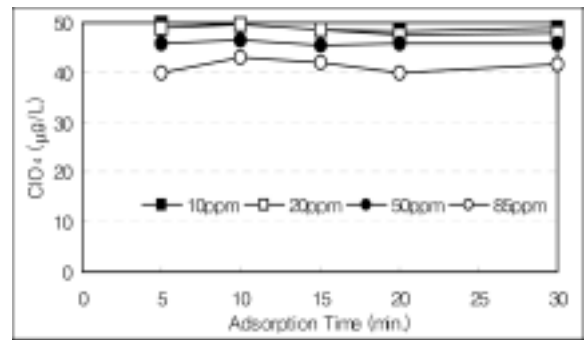
과염소산염이 맞춤형 활성탄에 흡착 처리되는데 소요되는 필요한 시간에 대한 평가 및 기존의 정수처리 공정에 대한 적용 가능성을 평가하기 위하여 과염소산염 초기농도 50 µg/L인 시료수에 맞춤형활성탄을 CTAC용액과 분리해 주입한 실험과 혼합해 주입한 실험을 수행하였다.



(a) CTAC(Sp.)



(b) CTAC(Inc.)



(c) PAC

Fig. 3. Residual perchlorate concentration with the contact time and tailored and virgin PAC dosage.

CTAC(Sp.) : separated tailored PAC from CTAC solution, CTAC(Inc.): tailored PAC in the CTAC solution, PAC : PAC in the distilled water

Fig. 3은 요오드가 944 mg/g인 맞춤형활성탄을 시료수에 주입 후 접촉시간 경과에 따른 잔류농도를 나타낸 것과, 맞춤형활성탄을 CTAC용액에서 분리해 주입한 실험과 혼합해 주입했을 때 잔류 과염소산염 농도를 나타낸 것으로 접촉시간이 15분까지는 완만한 농도의 저감현상을 보이거나 15분 이상의 접촉시간에서는 농도변화가 거의 없는 것으로 나타나 10분에서 15분 사이에서 대부분의 흡착이 완료되는 결과를 보였다.

Fig. 3(c)의 경우 CTAC 처리하지 않은 분말활성탄을 이용했을 때도 분말활성탄과의 접촉시간 5분 이후의 과염소산염 농도가 일정하게 나와 10분 이상의 접촉시간이 필요하지 않음을 알 수 있었다.

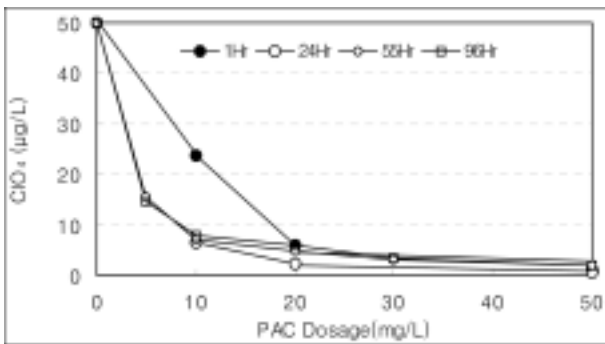
이의 결과를 이용하면 원수 중에 과염소산염이 있을 때 이를 처리하기 위하여 맞춤형활성탄을 응집이전에서 투

입하여 약 20분 정도의 접촉시간을 유지시킨 후 응집 침전 공정에서 수중의 과염소산염을 함유한 맞춤형말활성탄을 제거 하는 방식으로 정수처리에 적용한다면 수중의 과염소산염 제거 가능한 전처리 공정으로 구성될 수 있을 것으로 판단된다.

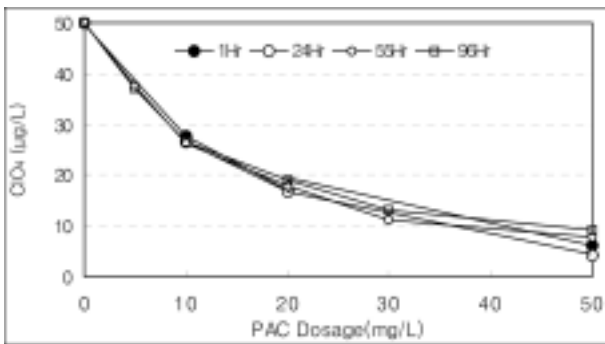
3.3. 요오드가에 따른 맞춤형말활성탄 성능 비교

과염소산염 제거를 위한 맞춤형말활성탄 제조시 CTAC가 분말활성탄에 많이 흡착될수록 단위 분말활성탄 당 과염소산염 제거효율이 높아진다. 맞춤형말활성탄의 효율적인 제조를 위해 활성탄 요오드가가 다른 두종류의 분말활성탄을 이용하여 요오드가 차이에 따라서 제조된 맞춤형말활성탄이 가지는 과염소산염의 제거효율을 비교하였으며, 또한 맞춤형말활성탄 제조시 CTAC용액에 분말활성탄의 적정 침착시간을 평가하기 위하여 침착시간별 맞춤형말활성탄의 과염소산염 제거효율을 평가하였다. Fig. 4는 요오드가가 1,083 mg/g인 분말활성탄과 944 mg/g인 분말활성탄을 5,000 mg/L CTAC용액에 10,000 mg/L로 각각 조제한 후 분말활성탄과 CTAC의 접촉시간을 1시간, 24시간, 55시간 및 96시간 한 두 종류의 맞춤형말활성탄을 이용하여 주입 농도별 과염소산염 제거를 나타낸 것이다.

Fig. 4의 (a)는 요오드가가 1,083 mg/g인 분말활성탄에 CTAC를 접촉시켜 제조한 맞춤형말활성탄의 과염소산염 제거를 나타냈고, (b)는 944 mg/g인 분말활성탄에 CTAC를 접



(a) Iodine value(1,083 mg/g)



(b) Iodine value(944 mg/g)

Fig. 4. The comparison of perchlorate removal with a different iodine value tailored activated carbon and the contact time.

촉시킨 맞춤형말활성탄의 과염소산염 제거를 나타냈다. 요오드가가 944 mg/g인 맞춤형말활성탄 30 mg/L 주입시 잔류 과염소산염 농도가 12~14 µg/L 유지되는데 비해 요오드가가 1,083 mg/g인 맞춤형말활성탄은 5 mg/L의 주입에서도 동일한 과염소산염 제거능을 발휘하였는데 이는 요오드가가 높은 분말활성탄 일수록 활성탄 공극내로 CTAC 흡착량이 많아져 수중의 과염소산염 제거량이 커지는 것으로 판단되어진다. 맞춤형말활성탄 제조시 분말활성탄의 CTAC용액에 적정 침착시간은 활성탄의 요오드가에 따라 차이가 있는 것으로 나타났다. Fig. 4에서 요오드가가 1,083 mg/g인 활성탄을 CTAC용액에 1시간 침착시켰을 때 맞춤형말활성탄 주입률 10 mg/L에서 잔류 과염소산염 농도가 24 µg/L 이고 24시간 이상 침착시켰을 때는 잔류농도가 9 µg/L 이하로 15 µg/L 이상 처리능의 향상을 나타내 요오드가가 큰 분말활성탄은 CTAC용액에 1시간 침착시킨 것보다 20시간 이상 침착시켰을 때 과염소산염의 처리효율이 높았으며 24시간 이상의 침착시간은 더 이상 과염소산 제거효율에 영향을 미치지 못했다. 이에 반해 요오드가가 낮은 활성탄은 1시간 침착시킨 맞춤형말활성탄과 24시간 이상 침착시킨 분말활성탄의 과염소산염 제거효율이 거의 일정하게 나타나 요오드가가 낮은 활성탄은 상대적으로 침착시간이 짧음을 알 수 있었다. 이는 요오드가가 높을수록 활성탄에 흡착되는 CTAC의 양이 많아 맞춤형말활성탄 제조시 상대적으로 CTAC를 흡착 과과하는데 많은 시간이 소요되나 요오드가가 낮은 활성탄은 흡착 과과에 도달되는 시간이 짧기 때문에 추정되므로 요오드가가 큰 활성탄을 맞춤형말활성탄으로 조제시 요오드가가 낮은 활성탄에 비해 긴 접촉시간을 주는 것이 필요하다. 따라서 맞춤형말활성탄 조제시 24시간 정도의 침착 시간이면 충분한 맞춤형말활성탄 조제가 가능할 것으로 예상된다.

Fig. 5는 요오드가가 1,083 mg/g인 분말활성탄과 944 mg/g인 분말활성탄을 CTAC용액에 24시간 침착시켜 제조한 맞춤형말활성탄의 주입률에 따른 잔류 과염소산염 농도비를 나타낸 것으로 맞춤형말활성탄 주입률이 10 mg/L 이상에서는 상대적인 잔류율이 0.24~0.28사이를 유지하였다. 이는 요오드가가 1,083 mg/g인 활성탄으로 조제한 맞춤형말활성탄이 944 mg/g인 활성탄에 비해 4배 이상의 높은 처리효

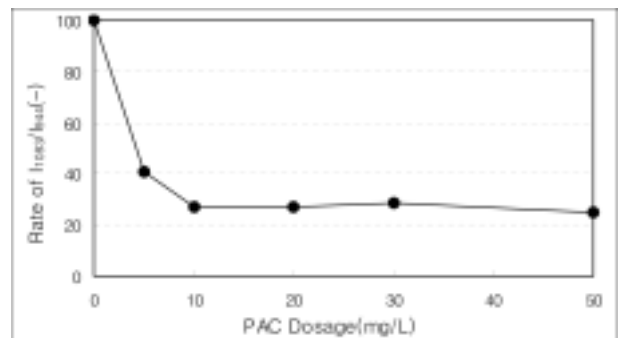


Fig. 5. Residual rate of the two different iodine value tailored powder activated carbons.

율을 보이는 것으로 과염소산염 제거를 위한 맞춤형활성탄 제조시 요오드가가 높은 분말활성탄을 이용하는 것이 유리한 방법으로 판단된다.

4. 결론

수중의 과염소산염 제거를 위한 맞춤형분말활성탄 제조시 처리효율을 높이기 위한 활성탄 재질비교, CTAC와 활성탄과의 필요한 접촉시간 및 과염소산염 제거를 위한 공정상에서 소요되는 시간을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) CTAC를 처리한 맞춤형분말활성탄을 이용하여 정수 처리하면 분말활성탄에 비하여 10배 이상 높은 과염소산염 제거효율을 보였다.

2) 맞춤형분말활성탄 주입 후 접촉시간별 과염소산염 농도를 비교하면 접촉시간 15분까지는 접촉시간 증가에 따라서 농도의 저감현상이 있었으나 15분에서 30분 사이에서는 평형농도에 도달해 정수처리 공정에 적용시 응집 20분 정도의 접촉시간을 가지는 접촉공간이 필요하였다.

3) 맞춤형활성탄 제조시 요오드가가 1,083 mg/g인 활성탄이 요오드가가 944 mg/g인 활성탄에 비해 4배 이상 높은 과염소산염 제거능을 가져 요오드가가 높은 활성탄을 이용하면 과염소산염 처리효율이 높은 맞춤형활성탄을 제조하는데 유리하였다.

4) 요오드가가 1,083 mg/g인 맞춤형활성탄을 정수장에서 주입 가능한 주입율인 5 mg/L 주입시 과염소산염 농도가 50 µg/L인 시료수가 15 µg/L까지 낮아져 약 70% 제거효율을 보였고 10 mg/L 주입시는 7 µg/L까지 낮아져 86% 제거효율을 보였다.

참고문헌

- Li, F. X., Squartsoff, L., Lamm, S. H., "Prevalence of thyroid diseases in Nevada counties with respect to perchlorate in drinking water," *J. Occup. Environ. Med.*, **43**(7), 630~634(2001).
- EPA 542-R-05-015, Response(5102G), www.epa.gov/tio/tsp, Perchlorate Treatment Technology Update FEDERAL FACILITIES FORUM ISSUE PAPER(2005).
- Xu, S. L., Wang, C., Zeng, Q. D., Wu, P., Wang, Z. G., Yan, H. K., Bai, C. L., "Self-assembly of cationic surfactants on a graphite surface studied by STM," *Langmuir*, **18**, 657~660(2002).
- Wachinski, A. M., Etzel, J. E., Environmental Ion Exchange. Lewis Publishers, New York(1997).
- Clifford, D. A., Tripp, A. R., Roberts, D. J., "Nitrate and perchlorate chemistry and treatment," *AWWA Inorganic Contaminants Workshop*, Reno, NV.(2004).
- Graham, James R., Cannon, Fred S., Parette, Robert, Headrick, Douglas, and Yamamoto, Gary, "Commercial demonstration of the use of tailored carbon for the removal of perchlorate ions from potable water," *Presented at National Groundwater Association Conference on MTBE and Perchlorate*, Costa Mesa, California. June 3~4(2004).
- Robert Parette, Fred S. Cannon, Katherine Weeks, "Removing low ppb level perchlorate, RDX, and HMX from groundwater with cetyltrimethylammonium chloride(CTAC) pre-loaded activated carbon," *Water Res.*, **39**, 4683~4692(2005).
- Weifang Chen, Fred S. Cannon, Jose R. Rangel-Mendez, "Ammonia-tailoring of GAC to enhance perchlorate removal. I: Characterization of NH₃ thermally tailored GACs," *Carbon*, **43**, 573~580(2005).
- Weifang Chen, Fred S. Cannon, Jose R. Rangel-Mendez, "Ammonia-tailoring of GAC to enhance perchlorate removal. II: Perchlorate adsorption," *Carbon*, **43**, 581~590(2005).
- Robert Parette, Fred S. Cannon, "The removal of perchlorate from groundwater by activated carbon tailored with cationic surfactants," *Water Res.*, **39**, 4020~4028(2005).