

3차원 수치해석에 의한 격벽식 정수처리구조물의 효율향상 연구 (분말활성탄 접촉조를 중심으로)

○안창진*, 안상진**

1. 서 론

상수도에서 정수처리는 일반적으로 화학적, 생물학적 처리 등으로 인식되어 수리적인 설계는 간과되어 왔으며, 각 정수처리공정의 구조물 설계가 단순 용량계산 및 수리계산(1차원) 만으로 실시되고 있어 정수처리구조물의 유동현상 분석을 통한 최적의 설계는 불가하였다. 그러나 실제 정수처리 과정에서는 수질변환 메커니즘에 의해 수리역학적인 유동현상이 직·간접적으로 작용하는 것을 알 수 있다. 최근에는 CFD(Computational Fluid Dynamics)프로그램을 이용하여 정수처리구조물 내에서 유동현상에 대한 3차원 Simulation이 가능하게 되어, 정수처리공정별 최적 유동조건을 고려한 구조물을 설계함으로써 처리효율을 향상시킬 수 있게 되었다. CFD프로그램을 이용한 3차원 유동해석의 가장 큰 장점은 Pilot plant 실험 또는 모형실험을 실시하기 전에 수치해석을 통하여 사전 검토가 가능하며, 해석결과를 증명할 수 있는 방법이 있다면 별도의 모형실험이 불필요하므로 이는 구조물의 설계시간 단축과 비용을 크게 절감할 수 있다.

정수처리공정에서 분말활성탄 접촉조는 지표수를 수원으로 사용하고 있는 정수장에서 문제가 되고 있는 조류에 의한 이취미물질 등을 제거하기 위하여 최근 많이 도입되고 있는 구조물이다. 분말활성탄 접촉조는 원수중의 오염물질의 흡착효율을 극대화하기 위하여 혼화지 전단에 공간적으로 분리된 별도의 구조물로 설치된다. 분말활성탄 흡착반응에서 교반강도와 체류시간은 분말활성탄의 흡착능에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 일반적으로 충분한 교반강도를 유지하기 위하여 기계적인 교반장치를 사용하나, 수리학적 에너지를 이용할 수 있는 경우에는 이러한 교반방식도 고려할 수 있다. 기계적인 교반방식이 갖는 장점은 유량, 수온, 그리고 원수의 수질에 따라 교반강도를 쉽게 조절할 수 있다는 점이라면, 수리학적 에너지를 이용한 교반방식은 시설비와 유지비가 작아져 경제적인 이점이 있다.

따라서 본 연구에서는 상용화된 CFD프로그램인 FLOW-3D를 이용하여 격벽식 정수처리구조물의 일종인 분말활성탄 접촉조에 대한 유동해석을 통하여 구조물 형식별로 수처리에 미치는 효과를 비교·분석하여 최적 정수처리구조물을 설계하는 방안에 대하여 연구하였다.

2. 해석모델 및 경계조건

2.1 모델 정수장

본 연구에서는 국내 P정수장의 분말활성탄 접촉조를 대상으로 같은 반응조내에 격벽(Baffle)을

* 한국수자원공사 수도관리처 부장, ** 충북대학교 토목공학과 교수

바꾼 경우와 분말활성탄의 투입 방법을 바꾼 경우에 대하여 분말활성탄의 혼합정도와 체류시간을 알아 보았다. P정수장의 분말활성탄 접촉조는 분말활성탄 흡착실험에 따라 결정된 최적 접촉시간과 설계정수처리량에 의해 시설용량을 결정하고, 수리학적 에너지를 이용한 반응조의 설계에 오랫동안 적용되고 있는 Camp & Stein의 교반강도(G, 속도경사) 산정식과 Richter의 식에 의하여 격벽의 수를 결정하여 설계된 사례이다.

Camp & Stein에 의하면 수리학적 에너지에 의한 교반일 경우 교반강도(G)는 식2.1과 같이, 그리고 기계교반인 경우 식2.2와 같이 정의하였다.

$$G = (Q \rho g h_L / \mu V)^{1/2} = (\rho g h_L / \mu t)^{1/2} \text{ ----- 식 2.1}$$

$$G = (P / \mu V)^{1/2} \text{----- 식 2.2}$$

여기서, G = 속도경사(s⁻¹), Q = 유량(m³/s), ρ = 물의 밀도(999.1 kg/m³ at 15 °C),
 g = 중력가속도(9.81 m/s²), h_L = 수두손실(m), μ = 동점성계수(0.001145 kg/m·s at 15 °C),
 V = 접촉조의 용적(m³), t = 체류시간(sec)

Richter에 의하면 요구되는 교반강도를 달성하는데 필요한 격벽의 수는 수평식과 수직식의 경우 각각 다음 식2.3과 2.4로 결정된다.

$$n = \{[(2 \mu t)/\rho(1.44 + f)][(H L G)/Q]^2\}^{1/3} \text{ ----- 식 2.3}$$

$$n = \{[(2 \mu t)/\rho(1.44 + f)][(W L G)/Q]^2\}^{1/3} \text{ ----- 식 2.4}$$

여기서, n = 접촉조내 격벽의 수, H = 조의 수심(m), L = 조의 길이(m),
 f = 격벽의 마찰계수, W = 조의 폭(m)

P정수장의 분말활성탄 접촉조의 제원은 다음과 같다.

- o 설계정수처리량 : 62,000m³/일 × 1.05 = 65,100m³/일, o 체류시간 : 20분
- o 접촉조 용량 : 900m³(W25m × L6m × H3m × 2지), o 격벽수 : 20개/지

2.2 해석모형

본 연구에 사용된 CFD프로그램인 FLOW-3D는 미국 New Mexico주 Los Alamos에 있는 Flow Science, Inc에서 개발한 상용 범용 CFD code이며, Los Alamos National Laboratory의 수치유체역학 branch에서 F. Harlow, B. Nichols 및 T. Hirt 등에 의해 개발된 MAC(Marker and Cell) 방법과 SOLA-VOF (Volume of Fluid)방식을 기초로 하고 있다. 그 후 Dr. Hirt가 1980년에 Flow Science사를 설립하여 계속 code를 발전시켰으며, 1985년부터 FLOW-3D로 명명하였다. 그 후 난류, shallow water, scalar, 응고 등 다수의 model이 포함되어 현재의 상용 프로그램이 되었으며, 수리학 뿐만아니라 casting, inkjet 등 일반 산업공정 해석에도 널리 사용되고 있다.

FLOW-3D의 해석방법은 기본적으로 비정상 유동 상태이며, 연속방정식, 3차원 Navier-Stokes 방정식 및 에너지 방정식을 유체 및 열유동 해석에, 그리고 유체로부터 또는 유체로의 열전달에 의한 고체내의 온도는 열전도에 의한 에너지 교환을 에너지 방정식 source term으로 사용하여 해석하고 있다. 또한 유체의 난류 유동에는 기본 대수 모형으로부터 RNG 모형까지의 난류 방정식을 선택할 수 있으며, 자유표면 해석을 위해 VOF 방정식이 사용되고 있다. 직각 형상의 격자계

에서는 일반 형상을 정의해 줄 수 있도록 FAVOR방법이 각 방정식에 적용되고 있으며, 비압축성 및 압축성의 계산시 해석 속도를 증진시키기 위해 별도의 보조 방정식 등을 사용하고 있다.

2.3 경계조건

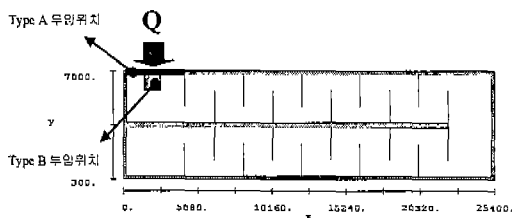
분말활성탄은 목재(톱밥, 야자)나 석탄(갈탄, 역청탄)으로 제조되며, 흡착특성은 공극의 구조와 크기 분포, 그리고 피흡착제의 크기에 의해 달라진다. 분말활성탄은 정수장에서 대체로 물과 섞은 후 슬러리(slurry) 형태로 만들어 주입한다. Simulation을 하기 위하여 분말활성탄은 mass particle을 이용하여 모사하였고, 사용된 particle의 물성은 다음과 같다.

o 개수 : 10000개, o 지름 : 0.025mm

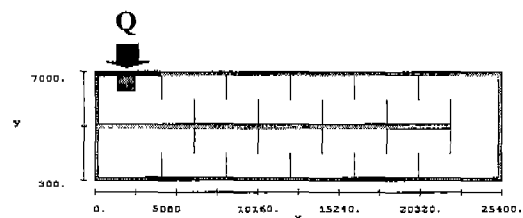
o 수중밀도 : $0.00105 \text{ g/mm}^3 \sim 0.0012 \text{ g/mm}^3$ (물의 밀도 0.001 g/mm^3)

P정수장의 분말활성탄 접촉조에서 같은 반응조내의 격벽(Baffle)을 4가지 형상으로 바꾼 경우와 각 형상별로 분말활성탄의 투입 방법을 바꾼 2가지 경우 등 총 8가지 경우에 대하여 해석을 실시하였다. 해석을 실시한 분말활성탄 접촉조의 4가지 형상은 그림 1과 같다.

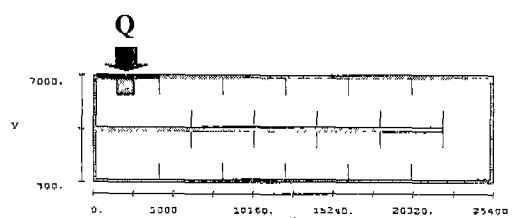
같은 접촉조내의 격벽의 크기에 따른 분말활성탄의 운동을 관찰하기 위하여 그림 1에 보여지는 바와 같은 격벽의 크기는 변화시키되 설치간격은 동일하게 한 세 가지 경우(Case 1~Case 3)와 단락류(Short circuiting)에 의한 영향을 줄이기 위하여 격벽의 크기를 작은 것으로 여러개를 설치하는 경우(Case 4)에 대하여 해석을 실시하였다. 또한, 분말활성탄의 투입 방법에 따라 분말활성탄의 운동 양상이 다르게 나타나므로 각 경우에 대하여 분말활성탄의 투입 방식을 2가지로 구분하여 해석을 실시하였다. Type A 방법은 접촉조 외부에서 분말활성탄이 유입수와 고르게 혼합되어 들어오는 경우를 가정한 것이고, Type B 방법은 특정부위에서 분말활성탄이 일시에 투입되는 경우를 가정하여 비교하였다.



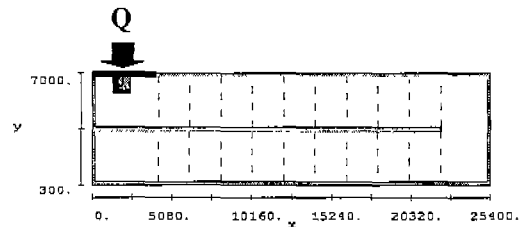
(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3



(d) Case 4

그림 1 해석에 사용된 분말활성탄 접촉조의 격벽형상

3. 결과 및 고찰

3.1 격벽의 형상별 유속분포 고찰

격벽의 형상에 따른 유속의 분포 상태를 비교한 것을 그림 2에 나타내었다. 분말활성탄 접촉조의 역할은 분말활성탄과 물이 골고루 혼합되고 접촉조내에서 균일한 체류시간을 가지도록 설계되어야 한다. 그러나 실질적인 설계에서는 물의 접촉조내 체류시간은 접촉조의 구조와는 상관없이 접촉조의 크기(부피)와 설계정수처리량(유량)에만 의존하게 된다. 격벽을 만드는 이유는 부지의 제약에 따라 원하는 형상으로 접촉조를 건설할 수 없는 문제를 해소하고, 격벽에 의해 흐름에 난류를 발생시켜 분말활성탄과 물을 골고루 혼합시키기 위함이다.

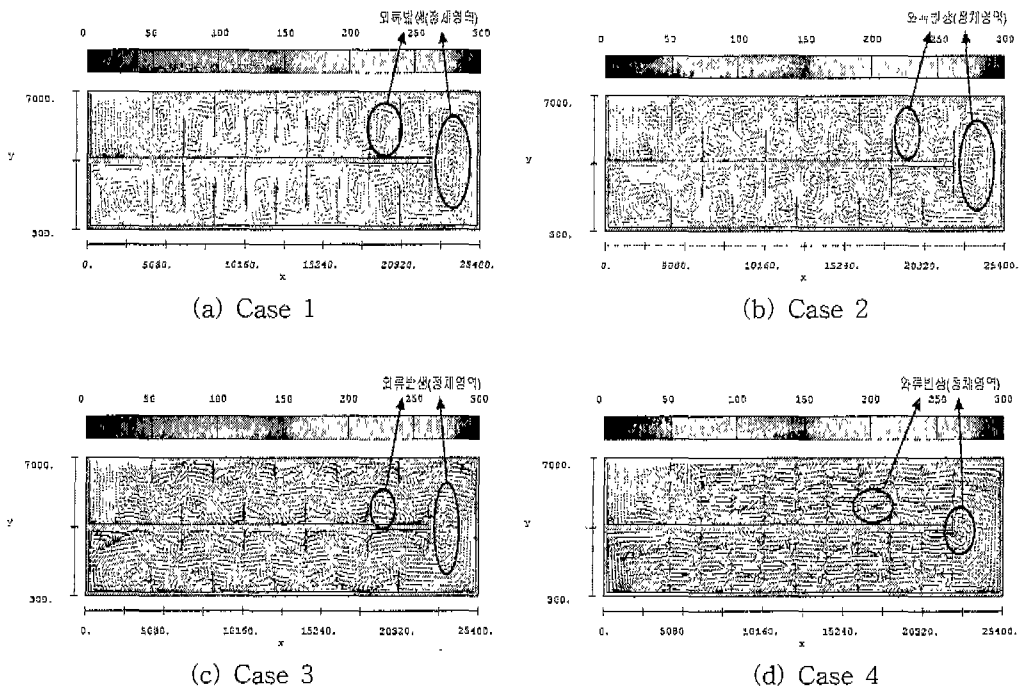
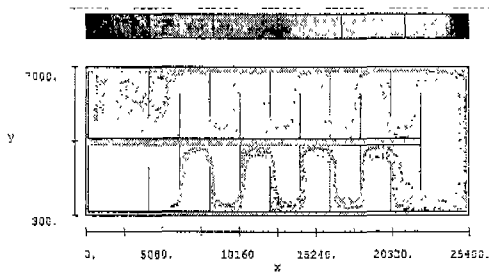


그림 2 각 격벽의 형상별 분말활성탄 접촉조에서의 유속분포

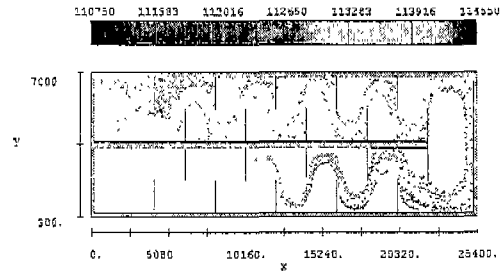
그림 2에서와 같이 Case 1 ~ Case 3의 경우 세가지 모두 격벽 후면에서 심한 와류가 발생하나 그 영역은 격벽의 크기가 작을수록 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 격벽의 크기가 커지면 통과유속이 빨라지므로 와류영역이 확대되기 때문인 것으로 판단된다. Case 4의 경우는 크기가 작은 격벽을 여러개 설치하여 격벽 후면의 와류영역을 최소화하므로써 물을 균일하게 혼합시키고자 한 경우이다. Case 4의 경우에는 결과에 보여지는 바와 같이 와류영역은 줄어드는 대신 유속분포는 대체로 고른 것을 알 수 있다.

3.2 격벽의 형상별 분말활성탄의 분포상태 고찰

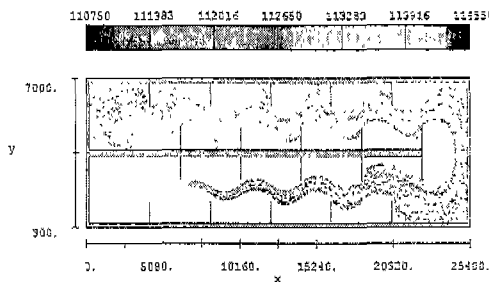
격벽의 형상에 따른 분말활성탄의 분포 상태를 비교한 것을 그림 2에 나타내었다. 이 그림은 분말활성탄을 미리 유입수와 골고루 혼합후 투입한 Type A의 경우로, 분말활성탄을 투입후 8.3분(500초)후의 분포상태를 나타낸 것이다. 이는 접촉조의 설계 체류시간이 20분인 점과 비교할 수 있다.



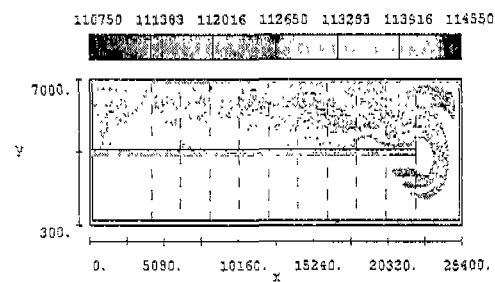
(a) Case 1-Type A



(b) Case 2-Type A



(c) Case 3-Type A



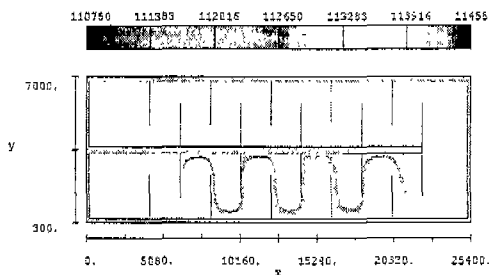
(d) Case 4-Type A

그림 3 각 격벽의 형상별 접촉조에서의 분말활성탄분포(Type A)

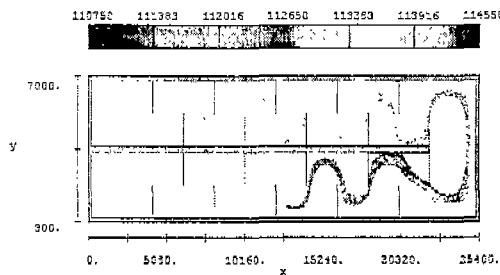
유속분포에서 고찰한 바와 같이 Case 1의 경우는 통과유속이 빨라져 분말활성탄도 신속히 유출됨을 알 수 있고, 분말활성탄의 분포상태도 양호하지 못함을 알 수 있다. 또한 와류영역에서는 주로 물만 존재하고 분말활성탄은 빠른 유속에 의해 접촉조 밖으로 곧바로 유출된다는 점이다. Case 2와 Case 3을 비교하여 볼 때 특이한 사항은 격벽의 크기가 너무 적어지면 오히려 분말활성탄의 유출이 빨라진다는 것이다. Case 4의 경우는 유속분포와 마찬가지로 다른 경우보다 분말활성탄이 상대적으로 균일하게 분포하는 것을 알 수 있으며, 와류영역의 감소로 분말활성탄의 체류 시간 차이도 감소한 것을 알 수 있다.

3. 3 분말활성탄의 투입방법에 따른 고찰

그림 4는 분말활성탄을 접촉조 유입부의 특정부위에서 일시에 투입한 Type 2의 경우에 각 격벽의 형상별 분말활성탄의 분포상태를 나타낸 것이다.



(a) Case 1-Type B



(b) Case 2-Type B

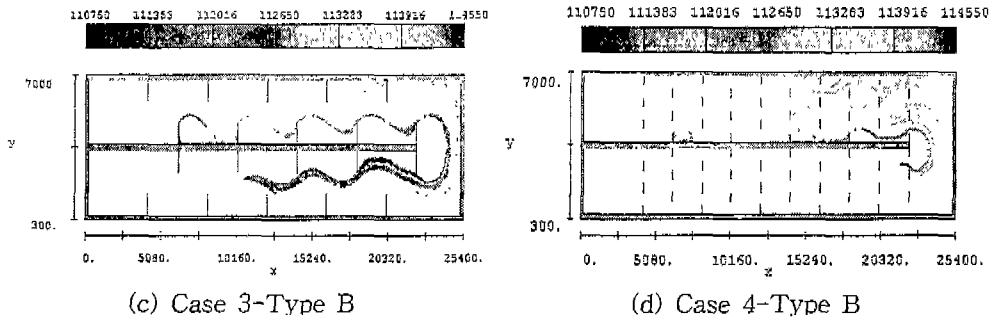
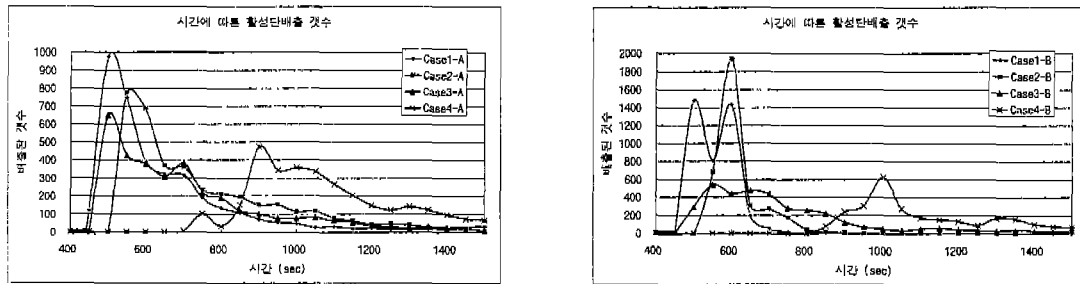


그림 4 각 격벽의 형상별 접촉조에서의 분말활성탄분포(Type B)

그림에서와 같이 Case 1 ~ Case 3의 경우의 분말활성탄은 미처 물에 분포되기도 전에 유속에 의해 신속히 유출됨을 알 수 있다. 분말활성탄의 역할이 물에 끌고루 분포되어 물 속의 오염물질을 흡착하여야 하는 기능으로 볼 때 매우 열악한 조건이라 하겠다. 경우별로 본다면 그나마 Case 4의 경우가 다소 양호함을 알 수 있다.

3. 4 분말활성탄의 체류시간의 고찰

앞 절에서 고찰한 바와 같이 격벽의 형상에 따라 분말활성탄의 체류시간이 상당히 차이가 나는 것으로 나타났다. 또한, 분말활성탄의 투입 방법에 따라서도 분말활성탄의 체류시간이 변한다는 것을 알았다. 그림 5는 각 경우별로 분말활성탄 전체의 접촉조내 체류시간을 상세히 알아보기 위한 것이다. 그림에서와 같이 Case 1 ~ Case 3의 경우 대부분의 분말활성탄이 10여분 이내에 접촉조 밖으로 유출됨을 알 수 있다. 반면 Case 4의 경우는 이론적 체류시간과 많이 근접하여 양호한 상태를 나타내고 있다. Type B의 경우도 Type A와 비슷한 양상을 나타내고 있다. 이에 대하여는 향후 추적자실험(Tracer test)에 의해 밝혀질 것이다.



(a) Case A

(b) Case B

그림 5 각 경우의 분말활성탄 체류시간 비교

4. 결론

본 연구는 국내 P정수장의 분말활성탄 접촉조를 대상으로 같은 반응조내에서 격벽(Baffle)을 형상을 바꾼 경우와 분말활성탄의 투입 방법을 바꾼 경우에 대하여 상용화된 CFD프로그램인

FLOW-3D를 이용하여 분말활성탄의 혼합정도와 체류시간을 알아 보았다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 지금까지 격벽식 정수처리구조물의 설계에 오랫동안 적용되고 있는 Camp & Stein의 교반강도(G) 산정식과 Richter의 격벽수 결정식에 의하여 설계할 경우에는 반응조내의 유동현상을 충분히 파악할 수 없으므로 정수처리구조물의 최적 설계를 위해 3차원 수치해석에 의한 설계가 요구된다.

2. 같은 접촉조내의 격벽의 크기와 형상에 따른 분말활성탄의 운동을 관찰하기 위하여 4가지 경우에 대하여 모의한 결과 격벽 후면에서 발생하는 와류는 격벽의 크기가 작을수록 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 격벽의 크기가 커지면 접촉조내의 통과유속이 빨라지므로 와류영역이 확대되기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 크기가 작은 격벽을 여러개 설치하여 격벽 후면의 와류영역을 최소화한 경우가 와류영역은 줄어드는 대신 유속분포는 대체로 고르게 하여 분말활성탄의 혼합효과와 접촉조내 체류시간의 유지가 가장 양호한 것으로 나타났다.

3. 분말활성탄의 투입방법에 따라 분말활성탄의 운동 양상이 크게 다르게 나타나며, 접촉조 외부에서 분말활성탄을 유입수와 고르게 혼합한 경우가 분말활성탄을 접촉조 유입부의 특정부위에 일시 투입한 경우에 비해 분말활성탄을 물속에 고르게 분포시켜 오염물질 흡착에 유리한 것으로 나타났다.

5. 참고문헌

1. Harlow, F. H., and Welch, J. E., "Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid With Free Surface", *Phys.Fluids*, vol. 8, pp.2182-2189, 1965
2. Hirt, C. W., and Sicilian, J. M., "A Porosity Technique for the Definition Obstacles in Rectangular Cell Meshes", the 4th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Sep 24-27, 1985
3. Hudson, H.E. Jr., "Water Clarification Process, Practical Design, and Evaluation", Van Nostrand Reinhold, New York, (1981).
4. Kawamura S., "Integrated design of water treatment facilities", John Wiley & Sons, Inc., (1991).
5. Miltner, R. J., et al, "Treatment of Seasonal Pesticides in Surface Waters", AWWA, vol. 81, no. 1, pp 43, 1989.
6. Sicilian, J. M., Hirt, C. W., and Harper, R. P., "FLOW-3D : Computational Modeling Power for Scientists and Engineers", Flow Science Report, 1987 (FSI-87-00-1)
7. 배병욱, 안창진, "상수원수내 이취미 제거를 위한 분말활성탄 접촉조의 설계", 대한환경공학회지, vol. 20, 1998.
8. 환경부, 한국수자원공사, "수처리제의 최적 투입위치 및 방법선정에 관한 연구(I)", 선도기술 개발사업 2단계 1차년도 보고서, 1996.