

격벽식 분말활성탄 접촉조의 흐름해석을 위한  
전산유체역학 프로그램의 적용  
Application of CFD Program for Analyzing the Hydrodynamic  
Characteristics of Baffled PAC Contactor

안 창 진\* / 안 상 진\*\*  
Ahn, Chang Jin / Ahn, Sang Jin

Abstract

For the efficient design of baffled powdered activated carbon(PAC) contactor, which has been widely used in water treatment plant(WTP) against the algae-related odor problems, a CFD(computational fluid dynamics) program was applied. In order to verify the performance of FLOW-3D program, the previously reported results of tracer tests from a pilot-scale PAC contactor(working volume of 288 liters) were compared to those from FLOW-3D. The results of FLOW-3D simulation were very similar to those from tracer tests conducted with the pilot-scale PAC contactor. On the other hand, the hydrodynamic characteristics of baffled contactor in the P-WTP were simulated by using FLOW-3D. Simulation results on the distribution of PAC particles showed that there are some stagnant parts in the back side of baffles in which PAC particles are not present. These stagnant parts might decrease the adsorption capacity of PAC particles. When the baffles were changed to maze-type intra-basin baffling, PAC particles were evenly distributed and the amount of stagnant parts reduced. In conclusion, it is anticipated that FLOW-3D simulation could be a viable tool for analyzing the hydrodynamic characteristics of structures used in drinking water treatment plant.

*Keywords* : baffled PAC contactor, hydrodynamic characteristics, CFD(computational fluid dynamics), Simulation

요 지

본 연구에서는 상수원수 내 조류 이취미(taste and odor)에 대응하기 위한 수단으로 도입되고 있는 격벽식 분말활성탄(PAC) 접촉조의 효과적인 설계를 위해 전산유체역학 프로그램인 FLOW-3D를 도입하였다. 일차적으로 FLOW-3D의 성능을 검증하기 위하여 용량 288 리터의 PAC 접촉조를 대상으로 수행된 추적자실험 결과와

\* 한국수자원공사 수도건설처 처장  
Director, Dept. of Water Supply Construction Management, KOWACO, Taejeon 306-711, Korea  
(E-mail : cjahn@kowaco.or.kr)

\*\* 충북대학교 토목공학부 교수  
Professor, Dept. of Civil Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk 361-763, Korea

FLOW-3D의 모의결과를 비교하였다. 또한, 이미 설계된 P정수장 PAC 접촉조에 적용하여 흐름특성을 예측하였다. 다양한 격벽 조건에서 모의된 FLOW-3D 결과는 실제 추적자실험 결과와 아주 유사하였다. 한편, 수리학적 체류시간이 20분인 P정수장의 접촉조에 투입된 PAC 입자가 시간에 따라 어떻게 분포하는지를 FLOW-3D로 모의수행한 바에 의하면, 기존의 PAC 접촉조에서는 모든 격벽의 후면에 정체구역이 발생하였고, 이 정체구역에는 PAC 입자가 거의 존재하지 않았다. 이와 같은 격벽 후면부의 정체영역은 PAC 입자가 체류하는 시간을 감소시켜 흡착효율을 저하시킬 수 있다. 반면에, PAC 접촉조의 흐름특성을 개선하고자 격벽의 형상을 미로형(maze-type)으로 변경한 경우, PAC 입자가 접촉조 내에 상대적으로 균일하게 분포하였으며 정체영역도 크게 감소하였다. 결론적으로 FLOW-3D 모의는 정수장에서 사용되는 수리구조물의 흐름특성 해석에 유용한 수단으로 사용될 것으로 기대된다.

**핵심용어 :** 격벽식 분말활성탄 접촉조, 흐름특성, 전산유체역학 프로그램, 모의수행

## 1. 서 론

격벽식 접촉조(baffled contactor)는 수리학적 에너지를 이용하여 물과 수처리제를 혼합하는 목적으로 오래 전부터 정수시스템에서 사용되어 왔다. 대표적인 예가 수평 또는 상하 유류식 응집지(flocculator)인데, 이 응집지는 개발도상국가 뿐만 아니라 미국과 일본 같은 선진국에서도 널리 적용되고 있다(Kawamura, 1991). 최근에는 정수장에서 소독능력을 향상시키기 위한 방안으로 정수지(clear well) 내부구조를 격벽으로 보강하여 정수지 내 유체흐름을 압출형흐름(plug flow)으로 유지하는 것이 제안되고 있는데, 이 또한 격벽식 접촉조의 적용 예라고 할 수 있다(U.S. EPA, 1998).

일반적으로 기계적인 교반이 유량, 수온, 그리고 원수의 수질에 따라 교반강도를 쉽게 조절할 수 있다는 장점을 갖는 반면에, 수력을 이용한 교반은 시설비와 유지비 측면에서 경제적인 장점이 있다. 또한, 정수장 부지면적에 제한을 받지 않는다면 단회로가 상대적으로 작은 압출형흐름으로 접촉조를 설계할 수 있다. 다만, 수력을 이용한 반응조의 경우, 원수의 수질변화에 쉽게 대처하지 못하고, 수력에 의한 교반강도가 유량의 함수이기 때문에 교반강도를 임의로 조절하기가 어렵고, 다소의 수두손실이 생기고, 그리고 청소가 쉽지 않은 단점이 있다. 그러나, 넓은 범위의 운전조건에서도 충분한 기능을 발휘할 수 있도록 설계한다면 상기한 단점을 어느 정도 극복할 수 있다(Schulz와 Okun, 1984).

격벽식 접촉조의 경우, 격벽에 의해 물의 흐름방향이 바뀌는 과정에서 물과 수처리제가 교반된다. 물의 흐름방향이 수평적인 경우, 청소와 배수가 용이하고 격벽의 가감을 통한 수두손실의 조절이 용이하나, 요구되는 부지면적이 수직식보다 크다. 수직식 접촉조의 경우, 적정

수심은 3m 정도이며 바닥에 침전물이 쌓이는 것을 방지하기 위하여 바닥과 접하는 격벽의 하부에 작은 구멍(weep hole)을 설치하는데, 일반적으로 구멍의 크기는 통수면적의 5% 정도가 적당하다. 격벽식 응집지의 설계 예는 Kawamura(1991)의 교재에 상세히 설명되어 있으며, Schulz와 Okun(1984)의 교재에도 수록되어 있다. 최근에, McConnachie와 Liu(2000)도 격벽식 응집지의 설계에 관한 연구결과를 발표하였으며, 국내에서도 격벽식 응집지의 설계방법에 근거하여 분말활성탄(PAC, powdered activated carbon) 접촉조가 설계된 바 있다(배병욱과 안창진, 1998).

그러나, 상기한 해석에서는 1차원 수리계산이나 모형 실험에 의해 유도된 경험식이 격벽식 접촉조의 흐름특성 평가에 사용되었다. 이러한 방법들은 깊이 방향의 유동이 없이 평면방향의 유동만이 고려된 것이다. 하지만, 실제 PAC 접촉조의 경우 수로의 깊이는 동일하게 설계되지만 유입부의 구조가 대부분 관(pipe)으로 이루어져 있으므로 깊이 방향의 유동이 매우 다르게 나타난다. 특히, 격벽이 수평형이 아닌 수직형으로 설치된 경우에는 해석 자체가 불가능하다. 따라서, 정확한 PAC 입자의 운동을 모의하기 위해서는 3차원 유동해석 기능이 필요하다. 또한, PAC 접촉조에서 물의 흐름은 정상상태로 가정할 수 있지만, PAC 입자의 분포를 예측하기 위해서는 시간의 경과에 따라 입자의 확산과 이동을 해석할 수 있는 비정상상태의 해석기능이 반드시 필요하다.

반면에 최근에 상용화된 전산유체역학(CFD, computational fluid dynamics) 프로그램은 구조물 내 유동현상에 대한 3차원 모의가 가능하며, 따라서 최적 유동조건을 고려한 구조물 설계를 통해 처리효율을 향상시킬 수 있는 것으로 알려져 있다. CFD 프로그램을 이

용한 정수처리구조물의 설계는 단위공정별로 일부 활용되었으며, 실제 연구분야는 장방형 수평류침전지 등의 유동해석에 관한 내용들이 대부분이다. 그러나, 컴퓨터의 발달과 상용화된 CFD 프로그램이 발표되면서 이 분야에 많은 관심을 갖게 되었으며, 미국에서는 이미 유동해석과 1차 화학반응을 포함한 해석이 이루어지고 있다. 또한, 미국의 United Water와 프랑스의 Lyonnaise des Eaux에서 공동으로 전체 정수처리공정의 수리 및 화학반응을 모의할 수 있는 CFD 프로그램 Virtual Water Plant™을 최초로 개발하였다. 국내에서는 상용화된 CFD 프로그램을 이용하여 3차원 유동해석을 통한 정수처리구조물의 설계는 시작단계로 최근에 FLOW-3D, CFX 및 FLUENT 등의 범용 CFD 프로그램을 이용하고 있는 정도이다(노성진, 2001; 박노석과 박희경, 2001).

본 연구에서는 상용화된 CFD 프로그램인 FLOW-3D를 이용하여 PAC 접촉조의 흐름특성을 조사하였다. PAC 접촉조의 경우 개수로이므로 개수로에서의 물의 흐름은 수위변동에 의한 압력차에 영향을 받게 되고, 흐름의 방향이 변화할 경우에도 압력변화와 수위변화는 상호영향을 주게 된다. 따라서, 개수로의 3차원 수리해석에서는 자유표면의 변화가 정확히 기술될 수 있어야 한다. FLOW-3D는 현재까지 발표된 많은 자유표면 기술방법 중 가장 정확하고 사실성을 확보한 기법으로 인정되고 있다. 또한, 3차원 격자분할(meshing)이 용이할 뿐만 아니라, PAC 입자의 분포상태 예측에 필요한 체류시간 해석을 위해 비정상상태 해석기능을 갖춘 프로그램으로 알려져 있다(Hirt와 Nichols, 1981). FLOW-3D의 성능을 검증하기 위하여, 용량 288 리터의 pilot-scale 격벽식 분말활성탄 접촉조를 대상으로 수행된 흐름특성 실험결과와 프로그램 모의 결과를 비교하였다. 아울러, PAC 접촉조의 유동해석을 통하여 구조물 형식이 수처리 효율에 미치는 영향을 비교·분석하였으며, 이에 근거하여 최적 구조물을 설계하는 방안에 대하여 고찰하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 전산유체역학 프로그램

본 연구에서 사용된 전산유체역학 프로그램 FLOW-3D는 미국 Flow Science, Inc에서 개발된 것으로서, Los-Alamos 국립연구소의 수치유체역학 연구실에서 개발된 MAC(marker and cell) 및 SOLA VOF

(volume of fluid) 방식에 기초하고 있다. 1980년에 설립된 Flow Science, Inc가 이 프로그램을 발전시켰으며, 1985년부터 FLOW-3D로 명명하였다. 그 후 층류, 난류, 확산, 열전달, 밀도류, 질량입자 등 다수의 기능이 포함되어 현재의 상용 프로그램이 되었으며, 동수력학 뿐만 아니라 주조나 잉크젯 등 일반 산업공정 해석에도 널리 사용되고 있다. 이 프로그램의 구성은 연산기(solver)와 전·후처리기(pre and post processor)로 구성되어 있고, 연산기는 Fortran, 전·후처리기는 C언어를 주로 사용하며, 거의 모든 컴퓨터 기종에서 사용이 가능하다.

FLOW-3D는 기본적으로 비정상 유동상태를 해석하며, 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 생성항으로 사용하여 해석하고 있다. 또한 유체의 난류 유동에는 기본 대수모형으로부터 two( $k-\epsilon$ ) equation, RNG (renormalized group) 이론, 그리고 LES(large eddy simulation) 등의 난류 방정식을 선택할 수 있으며, 자유표면 해석을 위해 VOF 방정식이 사용되고 있다. 직각 형상의 격자계에서는 일반 형상을 정의해 줄 수 있도록 FAVOR(fractional area and volume ratios) 방법이 각 방정식에 적용되고 있다(Sicilian 등, 1987).

여기서 two( $k-\epsilon$ ) equation은 운동에너지( $k$ )와 소산율( $\epsilon$ )을 사용하고 있으며, 이 방법은 방정식에 포함된 무차원 계수를 변형함으로써 일반적 문제에 널리 응용할 수 있다. RNG 이론은 난류 에너지와 소산율의 시간평균 방정식의 도출에 통계학적 방법을 응용함으로써 다른 scale에 있는 난류 유동의 경험계수 설정에 적게 의존하게 된다. 즉,  $k-\epsilon$  방정식에서의 경험적으로 유도된 계수들이 RNG 모델에서는 명백하게 도출된다. 그리고, LES 방법은 기상예보 분야에서 발달되었는데, 이는 아주 작은 eddy 구조를 단순화하여 계산영역 안에서 실제 해석함으로써 난류유동을 모의하게 된다. LES 방법은 근본적으로 시간에 따른 3차원, 비정상운동이며, 계산에 매우 많은 노력과 CPU 시간을 요구하게 된다.

자유표면 해석을 위한 VOF 방정식은 두 유체의 계면을 표현하는 방법이며, 현재까지 자유표면의 수치해석에서 가장 정확한 기법으로 평가받고 있다. 특히, jets, splashing 및 wave breaking과 같은 복잡한

자유표면 운동의 기술은 움직이는 격자를 사용하는 Lagrangian 방법보다 고정 Eulerian 격자를 사용하는 VOF 방법을 이용하여 보다 간단히 수행할 수 있다. 또한, FAVOR 방법은 직각형 격자 안에 들어있는 일반 형상을 기술하는 방법으로, 각 직각형 격자의 각 면들이 전체 또는 일부가 유체가 출입할 수 없는 물체에 의해 막혀 있을 수 있다고 정의하는 것이다. 이 방법은 일반 FDM 사용시 가장 큰 문제의 하나인 계단형 격자의 해석결과정확도 저하를 해결하였으며, 일반적인 BFC(body fitted coordinate)를 사용하는 격자에 비하여 짧은 시간에 정확한 형상을 표현할 수 있다.

## 2.2 Pilot-scale PAC 접촉조의 추적자실험과 FLOW-3D 모의수행 방법

FLOW-3D의 성능을 검증하기 위하여 용량 288 리터의 Pilot-scale PAC 접촉조를 대상으로 수행된 추적자실험 결과를 이용하였다(배병욱과 안창진, 2001). 그림 1에 실험에 사용된 PAC 접촉조의 제원과 부대장치치를 나타내었으며, 접촉조의 길이, 폭, 그리고 높이는 각각 1.6, 0.65, 그리고 0.4 m이다. 격벽을 설치하지 않았을 경우에 수로의 길이는 3.2 m이며, 수로단면의 수심과 폭은 각각 0.3 m이고, 유출부에는 삼각웨어를 설치하여 유출수를 배제하였다. 다양한 크기의 격벽을 대상으로 실험할 수 있도록 접촉조 측벽에 홈을 내어 4 mm 두께의 격벽을 고정할 수 있도록 하였다. 수직식의 경우에는 접촉조 밑바닥에서 격벽 하단까지의 간격(slit)을 90 mm(수심의 30%)로 하였고, 수평식은 접촉조 측벽에서 격벽까지의 간격을 30 및 90 mm로 하여 각각 실험하였다.

PAC 접촉조의 흐름특성을 조사하기 위하여 up-step injection법을 이용하여 추적자실험을 수행하였다. 추적자(tracer)로는 4 mg/l의 페놀용액을 사용하였으며, 접촉조에서 물의 체류시간은 20 분으로 고정하였다. 유입수 및 유출수에서 시료를 채취하여 Standard Methods의 5530 D방법으로 페놀을 측정하였으며(APHA, 1998), 경과시간  $t$ 와 이론적 체류시간  $T$ 를 갖는 무차원 시간( $\theta=t/T$ )에 대한 유입수 농도와 유출수 농도비( $C/C_0$ )를 나타내었다. 시료채취 간격과 실험시간을 각각 수리학적 체류시간의 0.1 배 및 2 배 정도로 선정하였다. 격벽의 수가 흐름특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 격벽 수를 25개와 13개로 달리하면서 실험을 수행하였다.

추적자실험과 동일한 Pilot-scale PAC 접촉조에 대하여 FLOW-3D로 흐름특성을 모의하였다. PAC 접촉조의 형상은 3차원 CAD를 이용하여 작성하였고, FLOW-3D에서 이것을 해석 영역 내로 읽어들이어 형상을 표현하였다. 해석에 사용된 격자는 그림 1의 접촉조를 길이방향(X) 73개, 폭방향(Y) 26개, 높이방향(Z) 27개로 분할하였으며, 총 32,266개의 격자가 사용되었다. 해석을 위한 경계조건은 유입부는 관을 통하여 단위시간당 일정량의 물이 유입되므로 관의 유속이 일정하다고 할 수 있어 유속을 경계조건으로 설정하였으며, 유출부는 추적자 실험과 동일하게 유출부 직전에 0.27 m 높이의 웨어를 설치하고 수위를 0.3m로 고정한 상태에서 해석을 실시하였다.

추적자실험에 사용된 페놀이 물과 화학반응 없이 유동에 따라 PAC 접촉조 안에서 움직인다면, scalar 방정식을 이용하여 시간에 따른 농도의 분포를 해석할 수

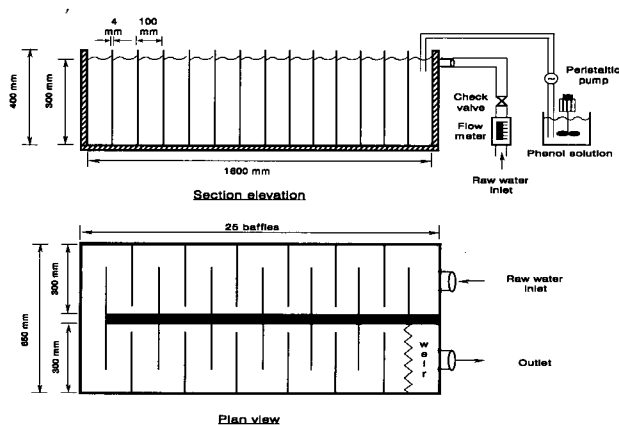


그림 1. Pilot-scale PAC 접촉조의 제원과 부대장치

있으므로 PAC 접촉조에서 페놀의 분포와 농도를 계산할 수 있다. 연속방정식, 에너지방정식 및 난류에너지, 소산방정식 등은 모두 vector 방정식을 취한다. 여기서 scalar는 이 방정식을 만족시켜주는 물리적 변수이므로 시간과 공간에 대한 scalar 양의 운동은 vector 방정식의 확산 또는 생성항의 증감에 따라 특정 시간의 분포를 나타낼 수 있다. FLOW-3D는 이와 같은 해석 기능을 포함하고 있다.

### 2.3 현장 PAC 접촉조의 흐름특성 평가

FLOW-3D가 pilot-scale PAC 접촉조의 흐름특성을 효과적으로 모의할 수 있음을 확인한 후, 실제 설계된 P정수장의 PAC 접촉조를 대상으로 흐름특성을 조사하고, 이에 근거하여 최적 구조물을 설계하는 방안에 대하여 고찰하였다. 이를 위하여 PAC 접촉조에 지름이 0.025 mm이고 밀도가 0.00105~0.0012 g/mm<sup>3</sup>인 PAC 입자 10,000 개를 투입하고, 시간에 따른 PAC 입자분포를 모의하였다. 해석에 사용된 격벽의 형상은 P정수장의 실시설계 보고서에 기초하였다(그림 2 참고).

P정수장의 설계유량은 65,000 m<sup>3</sup>/day이고, PAC 접촉조는 정수장 전체의 부지이용도와 유지관리상의 이점을 고려하여 좌우대칭형으로 배치되어 있다. 접촉조는 전형적인 수평형(좌우우류식)이고, 수심과 폭은 3 m, 평균 체류시간은 20분이다. 이 경우 수류에 의한 교반강도, 즉 속도경사(velocity gradient, G)는 식 (1)에 의해 다음과 같이 계산된다.

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

여기서, G = 속도경사(s<sup>-1</sup>), Q = 유량(0.75 m<sup>3</sup>/s), ρ = 물의 밀도(999.1 kg/m<sup>3</sup> at 15 °C), g = 중력가속도(9.81 m/s<sup>2</sup>), hL = 수두손실(m), μ = 점성계수(0.001145 kg/m·s at 15 °C), V = 접촉조의 용적(900m<sup>3</sup>), 그리고 t = 체류시간(1200 s)이다.

우선, 접촉조의 수심이 3 m이고 격벽 끝단과 접촉조 측벽 간의 간격이 1 m이므로, 만곡부를 통한 유속은 약 0.125 m/s로 계산된다. 접촉조 1지에는 총 20개의 만곡부가 있으므로, 만곡부에 의한 수두손실은 경험상 수 k를 도입하여 식 (2)와 같이 표시할 수 있다.

$$h_{LU} = k (v^2/2g) \quad (2)$$

일반적으로 k 값은 2.5에서 4.0 사이로 결정되나, 향후 필요에 의해 격벽을 추가할 경우에는 값을 작은 값으로 사용하는 것이 바람직하다. 따라서, k 값을 2.5로 하면, 개개 만곡부를 통한 수두손실은 0.002 m로 계산되고, 총 20개의 만곡부를 통한 총 수두손실은 0.4 m로 계산된다. 따라서, 총 수두손실 0.4 m에 의해 유발되는 교반강도는 식 (1)에 의해 약 53 s<sup>-1</sup>이다. 교반강도를 조절할 수 있는 Jar Test 실험에 의하면, 교반강도 53 s<sup>-1</sup>이 갖는 에너지는 수로에서 PAC 입자의 침전을 방지하기에 충분한 정도이다.

P정수장의 PAC 접촉조를 대상으로 PAC 입자의 유동양상과 체류시간을 파악하기 위해서는 우선 접촉조내 물의 유동상태를 정상상태로 만들어야 한다. FLOW-3D는 유체의 흐름해석과 동시에 유체 내에서 입자의 운동을 계산하는 기능을 갖고 있으므로, 2.2절에서와 같이 접촉조 내에 물을 1,000초 간 유입시켜 유동

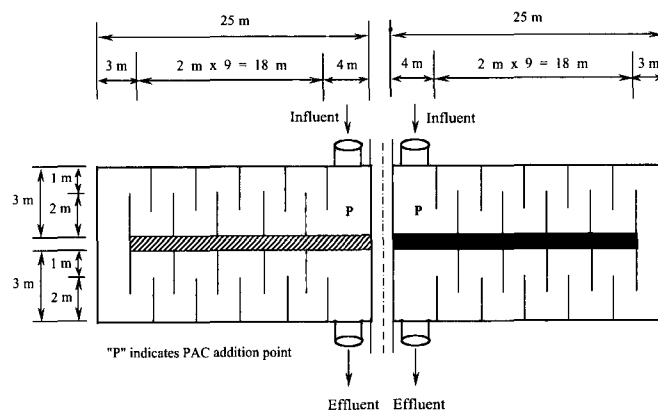


그림 2. P정수장 PAC 접촉조의 격벽 형상 및 제원

상태를 정상상태로 만든 후 실제 정수장에서 PAC 입자가 물과 완전 혼합되어 유입된다는 가정 하에 접촉조의 입구전면에 활성탄 10,000개를 균일하게 동시 투입하는 것으로 하였다. 활성탄은 구형으로 가정하였으며, 지름은 0.025 mm이고 밀도가 0.00105, 0.00110, 0.00115, 0.0012 g/mm<sup>3</sup>인 입자를 각각 2,500개씩 투입하였고, 유출부에서 배출되는 입자의 숫자를 측정하여 활성탄의 체류시간을 파악하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 Pilot-scale PAC 접촉조의 흐름특성

그림 3은 PAC 접촉조의 흐름특성을 조사할 목적으로 수행한 폐놀 추적자실험 결과를 FLOW-3D의 모의결과와 비교한 그림이다. 실험에 사용된 접촉조는 수직형(상하유류식)으로서, 통수수심(접촉조 바닥에서 격벽 하단까지의 간격)은 90 mm이었다. 격벽을 각각 13개 및 25개 설치한 조건에서 폐놀 추적자실험을 실시하였으며, 동일한 격벽 조건에서 FLOW-3D로부터 얻은 결과와 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 FLOW-3D 모의결과는 실제 추적자실험 결과와 매우 유사한 경향을 보였다. 한편, 격벽 수를 13개에서 25개로 증가할수록 흐름은 압출형 흐름(plug flow)에 더 가까운 경향을 보였다. PAC 접촉조의 경우 압출형 흐름특성이 많을수록 PAC 입자가 접촉조 내에 체류하는 시간이 길어지기 때문에, 즉 이론적 체류시간에 가까워지기 때문에 흡착효율 측면에서 더 유리하다.

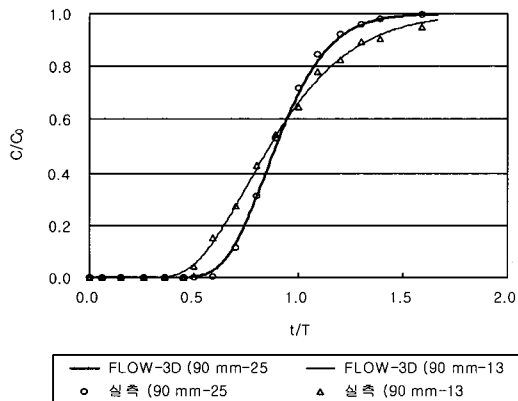
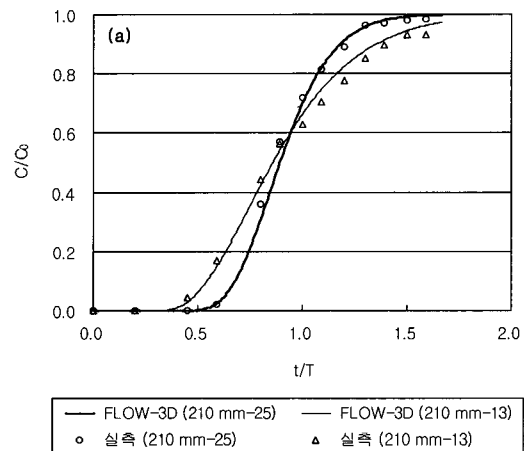
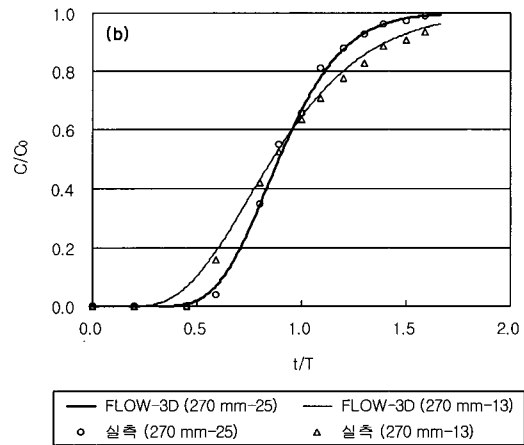


그림 3. 수직형 격벽식 접촉조의 추적자실험 결과와 FLOW-3D의 모의결과 (격벽 제원 = 300 mm(W) × 210 mm(H))

그림 4는 수평형 접촉조의 추적자실험 결과를 FLOW-3D로 모의한 결과와 비교한 그림이다. 격벽 끝단과 접촉조 측벽 간의 간격을 30 mm 및 90 mm로 달리하였고, 격벽의 개수도 13개 및 25개로 달리하여 각각의 경우에 대해 실험과 모의를 수행하였다. 그림 4(a)와 4(b)는 각각 격벽 끝단과 접촉조 측벽 간의 간격이 90 mm 및 30 mm일 때의 결과이다. 예상한 바와 같이 격벽의 수가 많을수록, 그리고 통수단면적이 적을수록 압출형 흐름에 가까운 결과를 나타내었으며, FLOW-3D 모의결과는 실제 추적자실험 결과와 매우 유사하였다.



(a) 격벽 제원(210 mm(W) × 350 mm(H)),



(b) 격벽 제원(270 mm(W) × 350 mm(H))

그림 4. 수평형 격벽식 접촉조의 추적자실험 결과와 FLOW-3D의 모의결과

표 1. 격벽식 접촉조의 추적자실험 결과해석

흐름형식	격벽 제원	압출형 분율 p(%)	완전혼합 분율 1-p(%)	사영역 분율 m(%)
수직식	210 mm(H) <sup>1)</sup> - 25 개	83	17	-2
	210 mm(H) <sup>1)</sup> - 13 개	74	26	6
수평식	270 mm(W) <sup>2)</sup> - 25 개	83	17	-5
	270 mm(W) <sup>2)</sup> - 13 개	64	36	-8
	210 mm(W) <sup>2)</sup> - 25 개	77	23	3
	210 mm(W) <sup>2)</sup> - 13 개	65	35	-6

<sup>1)</sup> 격벽의 폭은 수로의 폭(300 mm)과 동일

<sup>2)</sup> 격벽의 높이는 350 mm로 동일

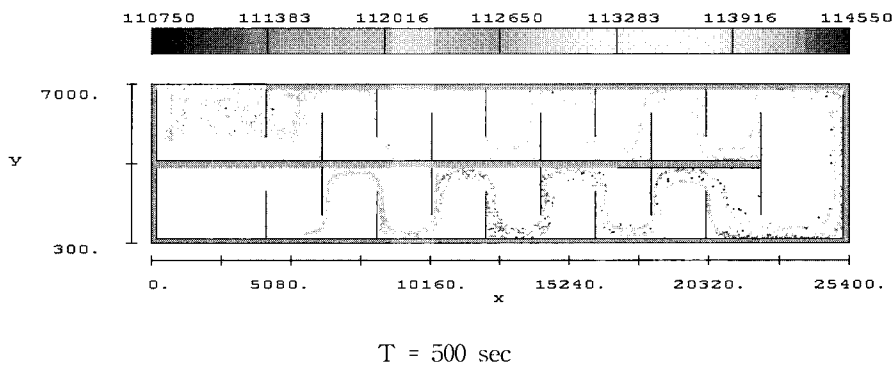


그림 5. 500초 후 P정수장 PAC 접촉조 내 PAC 입자분포 (수리학적 체류시간 20분)

표 1은 PAC 접촉조 내 흐름영역을 압출형 흐름 분율(p), 완전혼합 흐름 분율(1-p), 그리고 사영역 분율(m)로 구분하기 위하여 추적자실험 결과를 Rebhun과 Argaman(1965)이 제시한 도식해법으로 해석한 결과이다. 동일한 통수단면 조건에서 수직형 접촉조의 p값이 수평형보다 크다는 사실을 확인할 수 있다. 이는 수직형 격벽식 접촉조의 접촉효율이 상대적으로 우수함을 의미하나, 시공 및 유지관리 측면에서는 수평형 접촉조가 더 바람직한 것으로 판단된다(배병욱과 안창진, 2001).

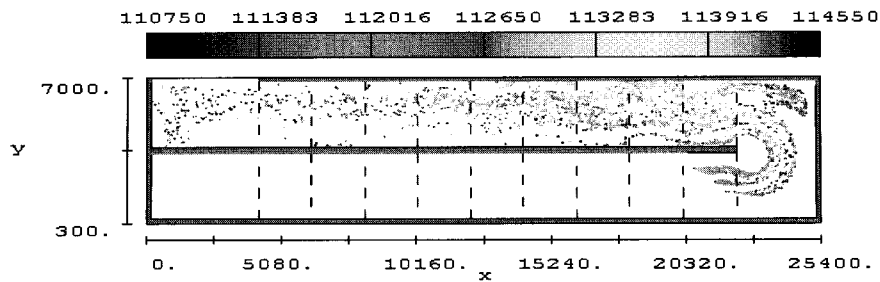
### 3.2 현장 PAC 접촉조의 흐름특성

P정수장 PAC 접촉조를 대상으로 투입된 PAC 입자가 어떻게 분포하는지를 FLOW-3D로 모의하였다. 그림 5는 수리학적 체류시간 20분으로 운전되는 PAC 접촉조에 10,000개의 PAC 입자를 투입한 후, 500초 후의 분포상태를 나타낸 것이다. PAC 입자 가운데 일부는 이미 접촉조 유출부에 거의 다 도달하였으며, 모

든 격벽의 후면에는 PAC 입자가 거의 존재하지 않음을 확인할 수 있다. 이는 격벽 후면부에 심한 정체영역이 존재하고, 접촉조 내 흐름이 주로 격벽 전면을 통해 미끄러지듯이 이루어짐을 의미한다. 따라서, 격벽과 격벽 사이의 간격을 충분히 좁게 할 경우 접촉조 내 흐름은 이론적으로 압출형 흐름과 가까워 지고, PAC 입자는 이론적인 체류시간과 유사한 시간동안 물과 반응하게 될 것이다.

그림 6은 상기한 PAC 접촉조의 흐름특성을 개선하고자 격벽의 형상을 미로형(maze-type)으로 변경한 후 FLOW-3D로 500초 후의 PAC 입자분포를 모의한 결과이다. 그림 5의 격벽과 동일한 간격으로 미로형 격벽을 설치한 경우, PAC 입자는 접촉조 내에 상대적으로 균일하게 분포하였으며, 그림 5의 격벽 후면부에 존재하던 정체영역도 크게 감소하였다.

앞에서 고찰한 바와 같이 격벽의 형상에 따라 PAC 입자분포가 상당히 차이가 나는 것으로 나타났다. 그림 7은 P정수장에 도입된 PAC 접촉조(일반형)와 이를 개



T = 500 sec

그림 6. 격벽의 형상을 변경하였을 때 500초 후 P정수장 PAC 접촉조의 PAC 입자분포 (수리학적 체류시간 20분)

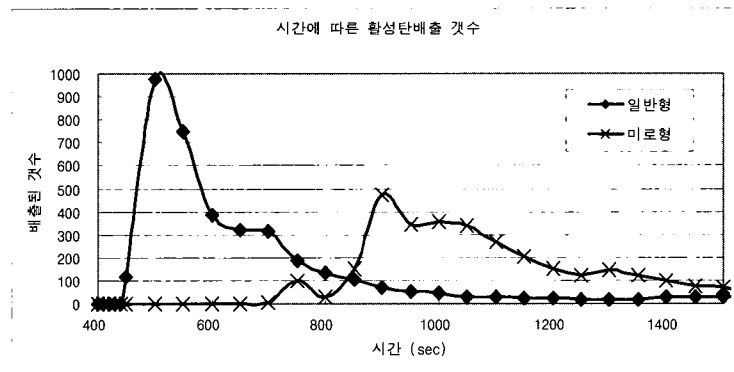


그림 7. P정수장 PAC 접촉조의 PAC 입자 체류시간 특성분석(일반형 및 미로형)

선한 경우(미로형)에 대하여 접촉조 내 PAC 입자 전체의 체류시간을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 일반형의 경우 대부분의 PAC 입자가 이론적 체류시간 20분 보다 훨씬 빠른 10여분 이내에 접촉조 밖으로 유출되는 반면, 미로형의 경우 이론적 체류시간과 상당히 근접하여 유출됨을 알 수 있다. 따라서, 미로형 격벽의 경우 PAC와 물의 접촉시간을 길게 유지할 수 있어 흡착능력 제고에 유리할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 조류에 의한 이취미에 대응하기 위한 수단으로 도입되고 있는 격벽식 분말활성탄(PAC) 접촉조의 효과적인 설계를 위해 전산유체역학 프로그램인 FLOW-3D를 도입하였으며, FLOW-3D의 성능을 검증하기 위하여 pilot-scale PAC 접촉조를 대상으로 추적자실험을 수행한 후, 실제 정수장의 PAC 접촉조의 유동해석을 통하여 구조물 형식이 수처리 효율에 미치

는 영향을 비교·분석하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 8 리터의 PAC 접촉조를 대상으로 다양한 격벽 조건에서 모의된 FLOW-3D 결과는 실제 추적자실험 결과와 아주 유사하였다. 따라서, 충분한 검증이 전제되는 경우, 전산유체역학 프로그램은 추적자를 이용한 수리모형실험을 보완할 수 있는 수단이 될 것으로 기대된다.
- (2) PAC 접촉조에서 격벽은 흐름의 특성에 변화를 가져와 결과적으로 수처리 효율에 많은 영향을 미친다. 동일한 통수단면 조건에서는 수직형 접촉조가 수평형 접촉조보다 압출형 흐름에 가깝다는 것을 알 수 있고, 같은 형의 접촉조에서는 격벽 수가 많을수록, 그리고 통수단면적이 적을수록 압출형 흐름에 가까운 것으로 나타났다.
- (3) 수리학적 체류시간이 20분인 실제 정수장의 PAC 접촉조를 대상으로, 투입된 PAC 입자가



시간에 따라 어떻게 분포하는지를 FLOW 3D 로 모의하였다. 기존의 일반적으로 설계되어지고 있는 PAC 접촉조에서는 모든 격벽의 후면에 정체구역이 발생하였고, 이곳에는 PAC 입자가 거의 존재하지 않음을 확인하였다. 이와 같은 격벽 후면부의 정체영역은 PAC 입자가 체류하는 시간을 감소시켜 흡착효율을 저하시킬 수 있다.

- (4) PAC 접촉조의 흐름특성을 개선하고자 격벽의 형상을 미로형(maze-type)으로 변경하였을 때 PAC 입자가 접촉조 내에 상대적으로 균일하게 분포하였으며 정체영역도 크게 감소하였다. 이는 PAC 입자가 수중에 체류하는 시간의 증대는 물론 오염물질과 접촉할 수 있는 기회를 많이 주게되어 수처리 효율을 증대시킬 수 있는 것으로 나타났다.

#### 참 고 문 헌

노성진 (2001). CFD를 이용한 장방형 침전지내 흐름의 수치모의. 석사학위논문, 서울대학교, pp. 4~16.

박노석, 박희경 (2001). "전산유체모사와 입자영상유속계를 이용한 급속혼화에서의 난류영향 연구." 대한환경공학회, 제23권, 제11호, pp. 1875-1887.

배병욱, 안창진 (1998). "상수원수 내 이취미 제거를 위한 분말활성탄 접촉조의 설계." 대한환경공학 회논문집, 제20권, 제8호, pp. 1161-1170.

배병욱, 안창진 (2001). "격벽식 분말활성탄 접촉조의 흐름특성." 대한토목학회지, 제21권, 제4-B호, pp. 469-474.

APHA (1998). *Standard methods for the ex-*

*amination of water and wastewater.* 20th ed. Hirt, C. W. and Nichols, B. D. (1981). "Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, pp. 201~225.

Kawamura, S. (1991). *Integrated design of water treatment facilities.* John Wiley & Sons, Inc., pp. 115~126.

McConnachie, G.L. and Liu, J. (2000). "Design of baffled hydraulic channels for turbulence-induced flocculation". *Water Research*, Vol. 34, No. 6, pp. 1886~1896.

Rebhun, M. and Argaman, Y. (1965). "Evaluation of hydraulic efficiency of sedimentation basins". *Sanitary Engineering*, ASCE, Vol. 91, pp. 37~45.

Schulz, C.R. and Okun, D.A. (1984). *Surface water treatment for communities in developing countries.* John Wiley & Sons, Inc., pp. 105~125.

Sicilian, J.M, Hirt, C.W., and Harper, R.P.(1987). *FLOW-3D : Computational Modeling Power for Sicientists and Engineers.* Flow Science Report, (FSI-87-00-1)

U.S. EPA (1998). *Optimizing water treatment plant performance using the composite correction program.* EPA/625/6-91/027.

(논문번호:02-08/접수:2002.01.29/심사완료:2002.04.02)