

— 기술정보 —

전산유체역학 기법의 정수처리공정 적용 가능성

— Technical Report —

Potentials of Computational Fluid Dynamics Technique for Optimization of Water Treatment Process

박노석¹ · 박희경^{2,*} · 안효원¹

Park, No-Suk¹ · Park, Hee-Kyung^{2,*} · Ahn, Hyo-Won¹

1 한국수자원공사 수자원연구원 국제상하수도연구소

2 한국과학기술원 건설 및 환경공학과

1. 서 언

최근 전 세계적으로 급속하게 확장되고 있는 물 산업은 소비자의 높아지는 요구수준을 만족시키기 위해 정수처리공정의 설계, 운전 및 진단에 보다 진보되고 정교한 기술발전을 필요로 하고 있다. 이러한 요구와 병행하여 특히 각 단위 공정을 물리·화학적으로 깊이 이해하여 원천적인 문제점 발견 및 해결방안을 공정에 재적용 하려는 연구는 그 중요성이 증가되고 있다. 같은 맥락으로 근래 많은 연구자들은 단위 공정 내 수리거동과 이에 의거한 수처리 효율과의 관계 규명에 귀추를 주목하고 있다.

한편, 최근 수치해석과 컴퓨터 기술의 발달은 각 단위 공정내의 수리거동을 보다 상세하게 연구할 수 있도록 하였으며, 급기야 1990년대 말부터 전산유체역학(CFD; Computational Fluid Dynamics)기술을 정수처리 공정에 접목시키려는 연구 시도들이 생겨나게 되었다.

원래 CFD 소프트웨어들은 항공 우주 또는 자동차 설계 분야에서 활발히 개발되어, 항공이 및 자동차

주변 공기 흐름을 해석하는데 활용되어왔다(Scott and Richardson, 1997). 이후 이러한 소프트웨어들은 기계 및 화학 단위 공정(예: 혼화기 및 반응기) 설계자들이 그 용도를 확장시켜 적용가능 범위를 넓혀 놓았으며, 더욱이, 몇몇 연구자들은 상용 CFD프로그램을 이용하여, 토목, 환경 및 수처리 분야에서도 연구성과를 발표하였다(Collins, 1991; Cox 등, 1998; Stovin and Saul, 1998; Brouckaert와 Buckley, 1999; Wang과 Falconer, 1999). 이에 본 고에서는 전산유체역학의 정의 및 소개 그리고 적용 사례를 통해 이 기술의 정수처리공정 적용 가능성에 대해 역설하려한다.

2. 전산유체역학과 정수처리 공정

2.1. 전산유체역학의 정의

전산유체역학은 간략하게 “유체거동, 열 전달 및 화학 반응과 관련된 현상을 포함한 시스템을 컴퓨터 시뮬레이션과 수치해석을 통해 해석하는 기술”로 정의할 수 있다(Versteeg와 Malalasekera, 1995). 전산유체역학을 통한 모사는 먼저 해석 대상을 작은 체적의 “메쉬(mesh)” 또는 “그리드(grid)”로 분할한 다음,

*Corresponding author Tel: +82-42-869-3620, Fax: +82-42-876-3610 Email: hkpark@kaist.ac.kr (Park, H.K.)

Table 1. 범용적(General-Purpose) 전산유체역학 코드의 특징 (Scott과 Richardson, 1887)

구분	세부항목			
흐름형태	· Steady or transient · Viscous or inviscid · Laminar and turbulent · Compressible or incompressible · Subsonic, ultrasonic or supersonic	· Multi-phase(continuous or disperse) · Chemical reaction · Combustion · Swirling · non-Newtonian(inelastic)		
열전달	· Convections	· Radiation	· Conduction	
재질	· Fluid(liquid or gas)	· Solid(homogeneous or porous)		
좌표계	· Cartesian	· Body-fitted	· Cylindrical	· Moving and /or rotating

유한체적법(FVM; Finite Volume Method)를 이용하여, 특정 초기 조건 및 경계 조건을 만족하는 유체 거동 방정식(연속, 모멘텀과 에너지 방정식 등)의 해를 컴퓨터를 이용, 반복적으로 구하는 작업이다(AEA Technology, 1997).

근래에 여러 분야에 적용성이 다양화된 상용화 전산유체 코드가 개발·이용되고 있다. 즉, 이러한 코드들은 광범위하게 열 또는 물질 전달을 다루는 유체 관련 공학 및 과학 분야에 해를 제시하기 위해 개발되었으므로, 범용적 코드(general-purpose code)로 불리기도 한다. 상기 Table 1은 이러한 범용코드의 일반적인 특징을 정리한 것이다. 물론 어떤 코드들은 개발자 고유의 해석 방법을 고수하는 경우도 있는데, 이는 특수한 해석 목적에 부합하기 위해서이며, 일반적으로 대부분의 코드에서는 방법과 알고리즘에 있어서 사용자가 약간의 수정을 가하여 문제에 맞는 해를 구할 수 있다.

2.2. 정수처리공정에서 전산유체역학의 필요성

일반적으로 모든 자연 현상은 미분방정식으로 모델링 될 수 있는 것으로 인식되어지고 있다. 실제로 공학 또는 과학분야에 상당히 많은 현상 및 공정이 미분방정식 형태로 모델링 되어져 왔으며, 진행하고 있다. 그러나 유체 흐름이 실제 이루어지는 계의 형상과 복잡성으로 인해 단지 몇 개의 방정식만으로 전체 흐름을 설명하기에는 무리가 있다(Anderson, 1995).

기존 정수처리 공정에서 사용되는 흐름의 개념은 크게 두 개로 대분 되는데, 하나는 plug-flow 타입이고

다른 하나는 complete-mix 타입이다(Fogler, 1992). Plug-flow 타입의 반응조에서는, 유체 입자가 조내를 통과하거나 떠날 때, 들어가는 순서대로 이루어지며, 입자들은 이론적 체류시간과 동일한 시간동안 조내 잔류하는 것으로 고려되어 진다. 대부분 이러한 반응조는 장폭비가 큰 긴 형태의 반응조 흐름으로 평가받으며, 흐름방향의 확산은 없는 것으로 간주한다. 이에 반해 complete-mix 타입 반응조는, 유체 입자가 조내 유입되자마자 급속한 확산이 일어나 완전혼합이 이루어지는 개념이다. 유체 입자들은 조내 입자수가 많아짐에 따라 조를 떠나게 된다. 완벽한 plug-flow 타입과 complete-mix 타입의 흐름이 아닌, 두 개의 흐름 특성이 어느 정도 내재된 복합 흐름에 대한 연구 또한 꾸준히 진행되어져 왔지만, 실제 정수처리 공정에서 그러한 흐름을 설계에 반영하거나 운전자의 경험만을 토대로 공정 운전을 수행하기는 많은 어려움이 있다.

따라서, 상기 제한사항을 해결하기 위해, 연구자들은 기존 연속, 모멘텀 및 에너지 방정식을 기초로 한 더 복잡한 미분방정식을 개발하고, 또 그 해를 구하려는 노력을 하고 있는데, 이러한 방정식들은 단순한 해석적 방법(analytical method)으로 해를 구하기에는 무리가 있다. 모두 잘 알고있는 Navier-Stokes 방정식의 경우에도 비선형(non-linear)인 관계로 직접적인 해를 구하지는 못한다. 따라서, 대부분의 연구자들은 이러한 방정식의 해를 구하기 위해 수치해석 방법(numerical method)을 사용하고 있다(Anderson, 1995; Scott과 Richardson, 1997). 이러한 수치해석 방법의 하나로 전산유체역학은 이산화 대수항으로 상기 방정

Table 2. 전산유체역학 기법의 정수처리공정 적용 사례 정리

구분	흐름 조건	상(phase)	입자 궤적	sub routine과 차원
침사지	난류	1상(Lagrangian particle model)	Yes	3차원
급속혼화지	난류(Reynolds stress model)	1상	No	체력항 (body force) 3차원
침전지	층류 및 난류 (k-ε 모델)	1상	No	밀도-온도 방정식 3차원
용존공기부상조	층류(공기) 난류(액체)	2상(공기와 액체)	No	가스 확산 방정식 2-3차원
정수지	난류 (k-ε 모델) 비정상류	1상	No	원전항 2-3차원

식을 구성하고 있는 각 적분항과 편미분항을 대체하여, 시간과 공간상의 격자 위치에서 흐름장내 해를 순차적으로 구한다. 또한 수치해석 기법과 컴퓨터 환경의 발전으로 인해 전산유체역학 프로그램은 흐름특성에 영향을 주는 복잡성을 모델링하는데 있어 더욱 자세한 정보를 제공 할 수 있게 되었다(Chow, 1996). 이에 정수처리를 연구하는 이들은 더욱 복잡한 형상이나 다상에서의 발생하는 흐름 문제를 연구대상으로 삼을 수 있게 되었다. 그 예로 몇몇 연구자들은 기계공학자들의 도움으로 막여과와 같은 작은 영역의 흐름을 연구한 사례가 있다. 또한 최근 전산유체역학 기법은 각 공정내 입자의 물성, 체류시간 분포 및 입자의 궤적을 모사·예측할 수 있게 함으로써, 설계 또는 공정의 scale-up에 있어 그 중요성이 한층 제고되고 있다(AEA Technology, 1997). 실제 scale-up에 있어서 흐름의 변화는 실공정상의 효율에 큰 영향을 미치므로 정확한 예측 없이 수행할 경우 많은 문제점이 발생한다. 이렇듯, 전산유체역학을 유용하게 사용할 경우, 많은 자본과 노력이 소요되어야 하는 규모의 실험 없이도, 어느 정도 공정의 정확한 흐름해석을 수행할 수 있기에 설계 및 리모델링(remodelling)에 있어서 오류를 상당히 감소시킬 수 있다. 더욱이 전산유체역학을 이용하여 적은 비용과 노력으로 흐름 특성에 대한 정보를 얻을 수 있다는 것은 운전에도 있어서도 효율을 제고시킬 수 있음을 의미한다.

3. 정수처리공정에 적용 사례

상기 언급한 바와 같이, 전산유체 역학은 한 단위 공정내 흐름 및 반응을 예측하는데 유용한 기법이다. 새로운 정수처리시설을 건설하고, 실험실 규모의 연구를 실제 공정에 적용하기위한 scale-up, 그리고 기존 공정의 문제점 발견 및 해결책 제시에 있어서, 복잡한 처리공정내 수리거동에 대한 정보를 줄 수 있는 것이다. 그러나 이러한 전산유체역학 기법의 적용에 있어서도 실처리공정의 복잡성을 완벽하게 반영하기에 무리가 있어서 수치해석 모사에 있어서 몇 가지의 가정 사항을 필요로 한다. 한 예로 용존공기부상법(Dissolved Air Floatation) 해석의 경우, 계산량이 1상의 경우에 비해 기하급수적으로 증가하게 된다. 이러한 경우, 3차원 형상내의 거동을 모사할 때, 만족스러운 수렴 해를 구하기까지는 슈퍼컴퓨터를 이용해서도 며칠이 소요된다. 따라서 만약 DAF조내 옆 벽면으로부터의 상승효과를 무시할 수 있다면(Fawcett, 1997), 간단한 2차원 모델로 수리해석을 수행할 수 있게 되는 것이다. 또한 흐름 영역내 농도가 흐름 특성에 중요한 영향을 미치지 않을 경우나, 농도의 변화가 관심사가 아닐 경우, 몇몇 전산유체역학 전문가들의 경우 조내 입자의 농도를 무시하기도 한다(Ta와 Brignal, 1997).

다음 Table 2는 국내 정수처리 공정을 대상으로 전

산유체역학 기법이 적용 연구 사례를 정리한 것이다. **Table 2**에서 나열된 공정 해석은 상용 프로그램 CFX를 사용하였으며, 이 프로그램은 영국 AEA Technology에서 개발하였다.

3. 1. 사례 1: 침사지의 설계

침사지는 원수내 모래나 고형물보다 조금 무거운 입자를 제거하는 전처리 공정이다. 그런데 침사지의 설계에 있어서는 지내 수리 및 입자 거동이 가장 중요한 인자이므로, 본 고에서 소개하려는 침사지 설계 사례에서는 많은 자본이 소요되는 규모의 실험 없이 전산유체역학 기법만을 이용하여 침사지의 최적 구조

를 결정하였다.

기존 결정되어진 설계 유량과 침사지의 부피에 대해, 유입부와 유출부의 면적, 그리고 그것들의 위치가 수리 거동 관점에서 본다면 침전 효율에 영향을 미치는 주요 인자가 된다. 다음 **Fig. 1**과 **2**는 유입부와 유출부의 위치 및 면적을 변화시키는 경우 지(L140m × W60m × D10m)내 속도장의 변화와 침전 효율을 모사한 결과이다. 또한 본 연구에서는 입자 거동 추적 기법이 사용되었는데, 유입부에 올리브스톤(Olivestone)이 유입되는 경우 어떤 경로를 통해서 유출되는지를 모사하였다. 올리브스톤은 밀도가 1,500kg/m³, bed shear stress는 0.03-0.04N/m², 그리고

평균 입경은 $150\mu\text{m}$ 정도인 입자이다.

본 연구 사례에서는 모사 결과로부터 침전효율을 정량화 하기위해서, Stovin과 Saul이 제안한 bed shear stress 개념을 사용하였다(Stovin과 Saul, 1998). 상기 모사결과에서도 나타나듯이, 유입부와 유출부의 위치 및 단면적의 작은 변화에도 수리 거동 및 침전효율이 상이하게 나타남을 알 수 있다.

상기 모사결과에 나타나듯이, 유출부와 유입부가 중앙에 위치하는 경우 단면적이 클수록 타 경우에 비해 침전 효율이 좋은 것으로 나타났으며, 이러한 변수들이 지내 수리 거동 과 궁극적인 침전 효율과 관련하여 중요한 영향 인자임을 알 수 있다. 또한

3.2. 사례 II: 수리학적 상사성의 혼화공정 적용

일반적으로 대부분의 정수장에서는 jar-test를 통하여 실제 혼화조의 물리·화학적 혼화조건을 결정하여 왔다(Hudson Jr. 과 Wagner, 1981; Oldsue, 1993, Cheng과 Atkinson, 1997). 그러나 실험실 규모의 jar-

test와 실규모의 혼화공정사이에 기하학적 및 동역학적 상사성이 결여되어있는 관계로 응집제의 과다 투여 및 scaling 변수로서 G값의 부적절성이 문제가 되고 있다(Park과 Park, 2002). 따라서 본 연구 사례에서는 실규모 혼화공정과 기하학적 및 동역학적 상사성이 고려된 새로운 jar-test 장치와 방법을 개발하기 위해 전산유체 기법이 적용된 것을 소개하려 한다. 본 연구에서 동역학적 상사성을 고려하기 위해서는 회전류에 적용되는 1,000 이상의 레이놀드 수(Reynolds number)와 프라우드 수(Froude number)가 사용되었다.

본 연구에서 사용된 임펠러 모델링에서는 축(shaft)와 임펠러에 작용되는 토크(torque)를 계산하여 임펠러 회전 나타내는 모멘텀 원천(momentum source)을 나타내었다. 축에 작용하는 토크는 임펠러에 작용하는 반작용력(F)과 작용 거리(r)의 곱을 임펠러에 의해 유동되는 체적(V_s)으로 적분한 값으로 모델링하였다.

$$T = \int_{V_s} rFdV \quad \text{식(1)}$$

여기서, T 는 임펠러 토크를 의미하며, 원주방향과 축방향으로 가해지는 힘은 등분포로 가정하였다. 또한 그 힘은 단지 지름 방향의 거리에 비례하여 증가하며, 다음 식(2)와 같이 나타내었다.

$$F = Kr \quad \text{식(2)}$$

여기서 K 는 체력을 거리로 나눈 값이다.

이에, 전산유체역학을 이용한 모사 결과에서 나타나는 듯이(Fig. 4참조), jar-test와 실규모 혼화시간에 동역학적 상사성이 수립되어 비슷한 양상의 난류장이 생성되었다.

Fig. 4에서 나타나듯이, 기하학적 상사성이 수립된 새로운 jar 기구와 full-scale의 혼화조에서 생성되는 난류장의 분포를 볼 때, 레이놀드 수와 프라우드 수를 이용한 동역학적 상사성 수립은 만족스러운 것으로 확인되었다. 또한 아무런 상사성이 내재되어 있지 않은 full-scale 혼화조와 기존 jar의 모사 결과 비교에서는 각각 상이한 난류 분포를 보이고 있다. 즉, 본 연구 사례에서는 무차원 변수나 전산유체역학 기법을 이용한 기하학적 및 동역학적 상사성의 수립은 혼화조와 jar에 잘 적용되며, 기존 jar 사용의 적절성 평가 또는 혼화조형상의 최적 설계 및 운전 방법 제시등으로 확장 가능성이 내재된 것이라 판단된다.

3.3. 사례 III: 침전지내 밀도류의 해석

침전지내 발생되는 밀도류나 이로 인한 침전 효율의 저하 요인들은 이미 몇몇 연구자들에 의해 확인된 사실이다. 본 연구 사례에서는 그 중 지내 유입수와 지내수 또는 깊이별 온도차에 의해 발생하는 밀도류의 생성을 모사하고 ADV(Acoustic Doppler Velocimetry) 기법을 이용하여 모사결과 검증을 통하여 밀도류를 해석하였다.

기본적으로, 침전지 흐름 모사에서 전산유체역학 기법을 통해 얻을 수 있는 정보(해)는 압력, 밀도, 그리고 3차원 방향의 유속이다. 그러나 본 연구 사례에서는 온도에 의해 발생하는 밀도류 효과를 고려하기 위하여온도와 밀도사이의 관계식을 만들어 다른 방정

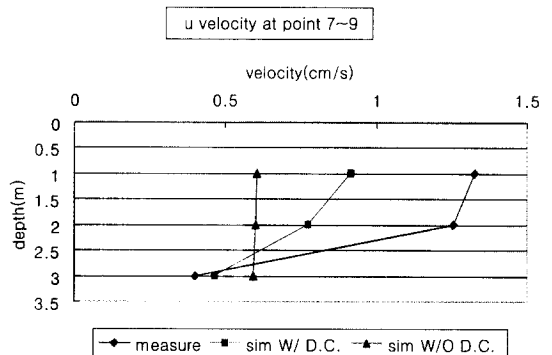


Fig. 6. 모사 및 실험결과와의 비교.

식(연속, 모멘텀 및 에너지)에 연계시켜야 했다. 이에 다음 식 (3)과 같이, 기존 데이터를 토대로 상관식을 만들어 조합하였다.

$$\rho = -0.00367T^2 + 1.8968T + 750.88$$

$$R^2 = 0.9992$$

상기 Fig. 5에서 보이듯이, 밀도류가 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우의 속도장은 서로 상이한 것으로 나타나고 있다. 즉, 이와 같은 결과는 침전지의 설계 및 운전상에 있어서 밀도류의 고려는 반드시 필요한 것이며, 전산유체의 활용도를 한 번 더 입증한 연구라 할 수 있다.

3.4. 사례 IV: 용존공기부상조 해석

용존공기부상조의 경우, 공기로 포화된 물을 감압함으로써 발생되는 미세 공기방울(10-100 μ m)이 접촉조에서 플럭(floc)에 부착되어 부상조 표면으로 상승시켜 고액을 분리하는 공정이다. 여러 연구자들은 이미 부착과 부상공정에서는 조내 수리거동이 궁극적인 고액분리 효율에 중요한 영향을 미침을 언급하였다(Fawcett, 1997; Ta와 Brignal, 1997). 이러한 수리거동을 모사하기위해서 실제 2상(phase) 전산유체역학 모사기법이 적당한 관계로 여기 한 연구 사례를 소개하려 한다. Fig. 7과 8에 나타나듯이, 모사 결과는 다양한 반송비에 따라 용존공기부상조내 공기 분포 체적비(air volume fraction)의 경향을 나타내고 있다. 모사

결과에서는, 상이한 반송비에 의해 발생하는 흐름과 속도장은 부상조내 공기 분포 체적 비에 큰 영향을 미치고 있다. 특히, 반송비가 17%이하인 경우, 기포의 분포가 부상조내에서 그다지 효율적이지 못하여, 고액 분리가 잘되지 않을 것으로 나타났다.

3.5. 사례 V: 정수지 해석

일반적으로 정수지에서 염소로 이루어지는 소독공정의 경우 효율은 CT(C: 농도, T: 접촉 시간)값으로 평가되어지므로, 지내 접촉시간의 제어는 공정 전체의 효율을 결정하는 중요한 인자이다. 그 일환으로 1990년대 말부터 정수지의 기하학적 형상을 이용, 접촉 시간을 증가시키려는 연구가 몇몇 연구자들에 의해 진행되어져 왔다(Wang과 Falconer, 1998; AWWARF, 1999). 본 연구 사례에서는 상기와 같은 목적으로, 정수지 내 수리 거동의 중요함을 인식하고, 물질 비 전달 식(mass fraction transport equation)을 전산유체역학 기법으로 해를 구함으로써 정수지내 염소의 체류시간을 모사하였다. 또한 모사 결과의 검증에 위해 국내 한 대상 정수장을 선정하여 tracer test를 수행하였다. 검증 이후, 정수지내 장착되어있는 배플(baffle)의 재설계를 통해 체류시간과 같은 수리학적 효율의 제고를 도모하였다. 그 결과 Fig. 9와 10에 나타나듯이, 유량, 배플 및 turning vane과 같은 설계 및 운전인자들이 지내 속도 분포와 궁극적인 소독 효율에 큰 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 본 연구 사례에서 도출된 결과로서는 간단한 내부 배플의

장착이 체류시간을 15%정도 증가시키며, 적당한 turning vane의 장착 또한 체류시간을 증가시키는 것으로 나타났다. 또한 검증을 위해 AWWARF(1999)에서 보고된 연구 결과와의 비교에서 오차 5%이하의 일치성을 보였다.

4. 결론

4.1. 장래 전산유체역학 기법의 정수처리 적용
 앞서 언급된 다섯 개의 연구 사례를 통해, 본 고에서는 다시 한번 정수처리공정에서의 전산유체 기법의 유용성과 이러한 기법이 이용되든 혹은 이용되지 않

Table 3. 본 고에서 제시된 전산유체역학 기법의 사례

구분	모사 결과	제한점	적용성 및 고려사항
침사지	<ul style="list-style-type: none"> · 유출과 유입부의 형상에 의한 흐름 균일성 확인 · 입자 궤적 모사에 의한 침전 효율 예측 	<ul style="list-style-type: none"> · 입자 크기 분포 고려 · 실제 혹은 pilot수준의 실험을 통한 검증 	<ul style="list-style-type: none"> · 실험 없이 침사지 설계 가능 · 입자 궤적 정량화 · 통계 접목을 통한 침전효율 예측
급속혼화	<ul style="list-style-type: none"> · CFD를 통한 여러 형상의 혼합조내 난류장 분석 · Scale변화 시 상사성 수립 	<ul style="list-style-type: none"> · 입자 모델 수립 	<ul style="list-style-type: none"> · 기존 jar-test의 적정성 평가 · 최적 혼합조 설계 및 운전 방안 제시
침전지	<ul style="list-style-type: none"> · 지내 밀도류 생성에 의한 영향 예측 · ADV로 모사 결과 검증 	<ul style="list-style-type: none"> · 상부의 풍영향, 트라프 등의 효과 고려 · 개선점 제안 	<ul style="list-style-type: none"> · 침전지 설계시 밀도류 대책 기준 마련 · 입자 궤적 및 통계 기법을 이용한 효율 예측
용존공기 부상법	<ul style="list-style-type: none"> · CFD를 이용한 2상 모델로 실험 결과를 정성적으로 규명함 	<ul style="list-style-type: none"> · 기포의 부서짐과 뭉침 현상 고려 · 정확한 검증방안 모색 	<ul style="list-style-type: none"> · 다양한 검증 방법 개발 중
정수지	<ul style="list-style-type: none"> · 시간에 따른 염소의 변화 흐름 양상을 모사 · 배플, turning vane, 지의 형상에 따른 흐름 모사 	<ul style="list-style-type: none"> · 정확한 염소의 확산 모델 도입 	<ul style="list-style-type: none"> · 정수지 설계 및 운전예 강화된 기준 마련

은 새로운 및 기존 정수장의 효율 향상의 제고에 상당히 기여할 수 있음을 입증하였다. 그러나 본 고에서 제시한 연구사례의 경우에서도 나타나듯이, 전산유체역학 기법이 정수처리 공정에 보다 적극적으로 적용되기 위해서 해결되어야 할 몇 가지 제한 사항이 남아있다. 또한 수치해석 모델이 가지고 있는 본질적이고 기술적인 문제점 역시 속세로 남아있다. 한 예로 non-Newtonian의 경우 Navier-Stokes식 내 점성 가정을 위반하므로 난류흐름 가정만으로는 정확한 그해를 구할 수 없다. 또한, 불충분한 경계 조건의 수립이나 빈약한 유체의 물리·화학적 특성 규명 등은 모사 결과와 실측 결과사이의 차이를 유지시키는 원인이 된다. 따라서 정수처리 공정 해석에 적용되는 전산유체역학 모델들의 단순화 작업 및 가정은 세심한 주의를 기울여야 하는 중요한 작업이다. 본 고에서 제시한 다섯 개의 모사에서도 비열, 온도 전도도 및 체적 확장계수 등이 온도에 종적임에도 불구하고 상수로 가정되었다. 그러나 실제 침전지내 밀도류를 해석하는 연구 사례를 제외하고는 상기 나열한 인자들이 심각하게 전체 흐름장에 영향을 주는 것은 아니었다. 다음 Table 3 앞서 언급한 연구사례의 결과, 장래 적용 가능성 및 제한사항에 대해 정리하였다.

한편, 더 맞는 모델 결과와 전산유체역학 기법의 확장을 위해서는 다음과 같은 문제들의 선행 해결이 요구되어진다.

- ① 검증 방법들의 발전(ADV, PIV, tracer test 등)
- ② 유동 방정식에 대한 정확한 알고리즘(2상 기포 거동, 밀도가 높은 입자 거동, non-Newtonian 흐름)
- ③ 유체와 입자의 정확한 물성치 규명
- ④ 컴퓨터 기술 및 수치해석 기법의 발전

마지막으로 본 고에서 다룬 전산유체역학 기법은 장래 정수 및 하·폐수처리 공정의 설계 및 운전에 있어서 상당히 유용하게 적용될 기술이며, 본 고에서는 다루지 않았지만 모래 여과, 막 여과, 2차 침전지, 활성슬러지 포기조 및 UV, 오존 반응조에서도 그 적용성이 확대되리라 사료된다.

참고문헌

AEA Technology (1997) CFX Application manual, Oxfordshire,

United Kingdom.

- Anderson Jr., J.D. (1995) Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications, McGraw-Hill.
- AWWA(1998) Water Treatment Plant Design and Operation, McGraw-Hill, New York.
- Brouckaert, C.J. and Buckley, C.A. (1999) The Use of Computational Fluid Dynamics for Improving the Design and Operation of Water and Wastewater Plants, *Water Science and Technology*, **40**(4-5), 81-89.
- Cheng, C.Y., Atkinson, J. F. and Bursik, M.I. (1997) Direct Measurement of Turbulence Structures in Mixing Jar using PIV. *Journal of Engineering, ASCE*, **123**(2), 115-125.
- Chow, W.K. (1996) Application of Computational Fluid Dynamics in Building Services Engineering, *Building and Environment*, **31**(5), 425-436.
- Clark, M.M. (1985) Critique of Camp and Stein's RMS Velocity Gradient. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, **111**(6), 741-754
- Collins, M.W. and Ciofalo, M. (1991) Computational Fluid Dynamics and Its Applications to Transport Processes, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **52**(1), 5-47.
- Cox, J.D., Padley, M.B. and Hannon J., Use of Computational Fluid Dynamics to Model Reservoir Mixing and Destratification, *Water Science and Technology*, **37**(2), 227-234
- Crozes G.F., Hagstorm J.P., Clark M. M., Ducoste, J. and Burns, C.(1999) Improving Clearwell Design for CT Compliance, AWWA Research Foundation and AWWA report.
- Fawcett, N.S.J. (1997), The Hydraulics of Flotation Tanks: Computational Modeling Proceedings of Dissolved Air Flotation, 51-72
- Foler H. S. (1992) Elements of Chemical Reaction Engineering, Prentice Hall.
- Hudson Jr., H.E. and Wagner, E.G. (1981) Conduct and Uses of Jar-tests, *Journal of AWWA*, **73**(4), 218-223.
- Kawamura, S. (1991) Integrated Design of Water Treatment Facilities, *John Wiley & Sons, INC.*
- Oldsue, J.Y. (1993) Geometric Relationships for Scale-up of Diverse Mixing Processes, A Publication of North America Mixing Forum. Chemical and Biochemical Application, 158-163.
- Park, N.S., and Park, H. (2000) The Effects of Rapid Mixer Geometry on Hydraulic Turbulence, The 5th International Symposium on Water Supply Technology, Kobe, Japan, 443-459.
- Park, N.S., Park, H. and Kim, J.S. (2003) Examining the Effect of Hydraulic Turbulence in Rapid Mixer on Turbidity Removal with CFD Simulation and PIV Analysis, *Journal of*

- Water Supply Research and Technology*, AQUA, 52(2), 95-108.
- Scott, G.M. and Richardson, P. (1997) The Application of Computational Fluid Dynamics in the Food Industry, *Trend in Food Science & Technology*, 8(4), 119-124.
- Stovin V.R. and Saul, A.J. (1998) A Computational Fluid Dynamics (CFD) Particle Tracking Approach to Efficiency Prediction, *Water Science and Technology*, 37(1), 285-293.
- Ta, C.T. and Brignal, W.J. (1997) Application of Single Phase Computational Fluid Dynamics Techniques to Dissolved Air Flotation Tank Studies, Proceedings of Dissolved Air Flotation, 472-488.
- Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. (1995) An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, Prentice Hall.
- Wang, H. and Falconer, R.A. (1998) Simulating Disinfection Processes in Chlorine Contact Tanks using Various Turbulence Model and High-Order Accurate Difference Schemes, *Water Research*, 32(5), 1529-1543.
- Xia B. and Sun D.W. (2002) Applications of Computational Fluid Dynamics (CFD) in the Food Industry: a Review, *Computers and Electronics in Agriculture*, 34, 5-24.