



정수지 내 추적자 실험과 CFD(전산유체역학)의 상관관계 분석

Case study comparisons of computational fluid dynamics modeling versus tracer test to evaluate the hydraulic efficiency of clearwell

김태균¹ · 최영준¹ · 조영민^{2*}

Tae Kyun Kim¹ · Young June Choi¹ · Young Mahn Jo^{2*}

1 서울시상수도연구원, 2 부산시수질연구소

(2011년 6월 4일 접수 ; 2011년 9월 16일 수정 , 2011년 9월 20일 채택)

Abstract

Hydraulic efficiency was a vital component in evaluating the disinfection capability of clearwell. Current practice evaluates these system based on the tracer test only. In this paper, CFD(Computational Fluid Dynamics) was applied on the clearwell for alternating or supplementing the tracer test. The baffle factor derived from the CFD modeling closely matched the values obtained from full scale tracer testing. And, for suggesting proper numerical model in clearwell; the turbulence model, discretization scheme, convergence criteria were investigated through separate simulation runs. The model validation was conducted by comparing the simulated data with experimental data. In the turbulence model, the realizable $\kappa - \epsilon$ model and the standard $\kappa - \epsilon$ model were found to be more appropriate than RNG $\kappa - \epsilon$ model. The residuals of convergence criteria should be used as not 10^{-3} but 10^{-4} or 10^{-5} . In discretization scheme, the difference of simulated values in 1st, 2nd, 3rd upwind scheme was found to be insignificant. Moreover, the result of this study suggest that CFD modeling can be a reliable alternative to tracer testing for evaluating the hydraulic efficiency.

Key words : Tracer test, CFD, Clearwell, Hydraulic efficiency, Retention time, Baffle factor

주제어 : 추적자실험, 전산유체역학, 정수지, 수리학적 효율, 체류시간, 환산계수

1. 서론

정수지는 물속에 소독제를 투입시켜 바이러스, 세균 등을 일정한 시간동안 소독하는 공정이다. 소독능은 CT값으로 평가하는데, 이 때 C는 잔류소독제의 농도(mg/L)이고, T는 추적자의 10%가 유출되는 시간(t_{10} , min)을 의미한다. 1989년 이후 미국 환경청에서는 지표수처리규칙(SWTR, Surface Water Treatment Rule)을 제정하였는데 이에

따르면 정수처리공정에서 바이러스는 99.99%(4log), 지아디아 포낭은 99.9%(3log)의 불활성화비를 유지해야 한다고 되어있다. 우리나라 정수처리기준 등에 관한 규정에서도 인체에 영향을 미치는 바이러스, 지아디아 포낭과 같은 병원성 미생물을 제거하기 위해 불활성화비($CT_{계산값}/CT_{요구값}$) 1이상을 제시하고 있어, 이 기준에 만족할 수 있는 CT값을 항상 유지해야 한다(정수처리기준 등에 관한 규정, 2008).

* Corresponding author Tel:+82-2-3146-1812, Fax:+82-2-3146-1882, E-mail: ss531034@seoul.go.kr(Kim, T.K.)

소독능을 높이기 위해서는 소독제의 농도(C) 또는 체류 시간(t_{10})을 증가시켜야 하는데, 농도를 증가시킬 경우 소독제의 냄새 및 소독부산물의 생성이 촉진되기 때문에 체류 시간(t_{10})을 증가시키는 것이 바람직하다. Bishop(1993)은 체류시간(t_{10})을 증가시키기 위해 정수지 내 도류벽을 설치하여 장폭비를 증가시킨 결과 수리학적 효율인 환산계수(Baffle factor, t_{10}/T)가 0.6을 초과하지 않는다고 하였으며, Clark(1999)은 장폭비 4 ~ 100에 대해 실험한 결과 최적의 장폭비는 50(환산계수 0.8)으로 보고하고 있다.

정수처리기준 등에 관한 규정에 의하면(2008) 장폭비 환산계수 0.71이상(장폭비 50이상) 또는 도류벽 간격이 불균등한 경우 체류시간(t_{10}) 산출 시 추적자 실험을 통해서만 소독능을 인증 받을 수 있다. 추적자 실험은 침전지, 정수지, 배수지등 지내 수리학적 특성을 파악하기 위해 일반적으로 사용되고 있다.

그러나, 실규모 정수장에서는 유량변화에 따른 추적자의 최대 검출농도를 고려하지 않을 경우 수질기준을 ($<1.5\text{mg/L as F}$) 초과할 수 있으며, 송수량에 따라 정수지 내 수위가 변화되어 추적자 실험 시 체류시간이 달라져 정확도가 낮아질 수 있다. 또한, 정체지역 존재, 혼화불량, 부적절한 샘플링 위치 등으로 추적자의 회수율이 낮은 경우에는 실험의 신뢰도가 크게 떨어질 수 있다.

본 연구에서는 추적자 실험의 문제점을 보완 및 대체하는 방법으로 정수지 해석에 CFD(전산유체역학)를 도입하였으며, 이 CFD 해석기법은 현재 혼화공정, 침전공정, 정수지, 오존접촉조 등 정수처리공정 진단 및 개선에 활용되고 있다. Templeton(2006)은 캐나다 온타리오 주 실규모 3개의 정수지를 대상으로 추적자 실험과 CFD의 체류시간과 환산계수를 비교한 결과 1~17%내의 오차가 발생한다고 보고했으며, Louis soracco(2009)는 미국 Silver lake 위치한 정수지를 대상으로 추적자 실험과 CFD의 환산계수를 비교한 결과 8%내의 오차가 발생한다고 하였다. 또한, Li et al.(2006)은 CFD를 이용하여 오존접촉조 내 도류벽 구조를 최적화시켜 수리학적 효율인 환산계수를 기존보다 73% 증가시켰다.

캐나다 온타리오 주 환경청(2010)에서는 소독부산물을 최소화시키는 가이드라인을 제시하였는데, 소독능 평가 시 추적자 실험뿐만 아니라 CFD를 활용하여 수리학적 효율을 증가시켜야 된다고 보고하고 있으며, 미국 환경청에서는 UV 소독능 최적 가이드라인에서 UV 장치 내 미생물 거동을 CFD를 통해 해석해야 된다고 기술함으로써 미국을 비롯한 선진국에서 정수처리공정 진단 및 개선에 CFD 기법이 적극적으로 활용되고 있다.

본 연구의 목적은 실규모 정수지를 대상으로 추적자 실험

과 CFD의 상관관계를 분석하여 정수지 해석에 적합한 모델과 기준을 제시하는 것이다. 구체적인 연구절차는 다음과 같다. 연구방법에서는 암사아리수정수센터(2정수장) 정수지를 대상으로 추적자 실험방법에 대해 설명한 후 정수지에 적용된 CFD의 해석범위, 난류모델, 해석방법을 제시하였다. 연구결과 및 고찰에서는 추적자 실험과 CFD에 대하여 불소농도, 누적비율을 분석하여 상관관계를 평가하였으며, 수리학적 효율인 체류시간, 환산계수를 산출하여 소독능을 비교하였다.

또한, CFD 해석 값에 영향을 미칠 수 있는 난류모델, 차분법, 수렴기준에 따른 수리학적 효율을 추적자 실험과 비교 및 분석하여 정수지 해석에 적합한 모델과 기준을 제시하였다.

2. 연구방법

2.1. 추적자 실험(Tracer test)

암사아리수정수센터(2정수장) 정수지는 총2지로 구성되어 있고, 1지의 규격은 B24.75m×L69.5m×H5.0m로 되어 있으며, 정수지의 수위는 4.2m로 운영되고 있다. 또한, 실험당일 정수지의 용량(V)과 유량(Q)은 각각 $7,225\text{m}^3$, $3,840\text{m}^3/\text{h}$ 로 이론적 체류시간($T=V/Q$)은 113분이다. 정수지 내 도류벽은 5m간격으로 설치되어 있으며, 정수지의 장폭비는 69이다.

소독능 평가방법에는 장폭비에 따른 환산계수(Baffle factor)를 사용하는 방법과 추적자 실험을 통하여 실제 유효접촉시간(t_{10})을 산정하는 방법이 있다. 장폭비 50이상인 경우 또는 도류벽 간격이 불균등한 경우에는 추적자 실험으로만 소독능을 인증받을 수 있다. 암사아리수정수센터(2정수장) 정수지는 장폭비가 69로 추적자 실험을 통해 소독능을 평가해야 한다.

추적자 실험방법은 출구에서 추적자의 농도가 일정한 농도를 나타낼 때까지 일정한 비율로 추적자를 주입하는 Step input tracer test와 추적자를 순간적으로 주입한 후 출구에서 일정한 시간간격으로 샘플을 채취하여 농도를 측정하는 Pulse input tracer test가 있으며, 본 연구에서는 순간적 주입방식인 Pulse input tracer test를 사용하였다. 추적자는 처리과정에서 제거되거나 소모되지 않아야 하며, 시험하는 동안 물속에 있는 다른 물질과 반응을 하지 않는 비반응성 물질(Nonreactive materials) 즉 보존성 물질이어야 한다. 추적자 물질로는 염화나트륨(NaCl), 염화칼슘(CaCl_2), 불화나트륨(NaF), 불화규산(H_2SiF_6) 등을 이용할 수 있는데, 본 연구에서는 불화규산(H_2SiF_6 , 40%)를 사용하였으며 불소이온의 최고농도가 먹는물 수질기준인 1.5mg/L 을 초과하지 않도록 하였다.

2.2. 전산유체역학(CFD)

본 연구에서는 가장 널리 사용되는 CFD 소프트웨어 가운데 하나인 Ansys사의 Fluent 코드 6.3을 사용하였는데, 이 Fluent 코드는 질량방정식, 운동량방정식, 난류방정식 등의 미분방정식을 수치적으로 해석할 수 있는 도구이다. 미분방정식을 이산화시키는 방법(Discretization)으로 유한체적법(Finite volume method)을 이용하였다. 이 유한체적법은 미분방정식을 적분하고 나서 이산화하기 때문에 그 미소영역 내의 운동량의 유출입을 고려하도록 되어 있어서 질량 및 운동량 보존법칙을 완벽하게 만족시키는 이산화방정식을 얻을 수 있는 장점이 있다(Patankar, 1980).

2.2.1 해석범위 및 경계조건(Flow domain and boundary conditions)

Fig. 1은 암사아리수정수센터(2정수장) 정수지 도면이며, 정수지 해석범위를 B24.75m×L69.5m×H4.2m로 하였다. 유입 및 유출부의 직경은 1.5m이며, 정수지 내 도류벽이 5m간격으로 설치되어 있다.

정수지의 유입, 유출부에는 0.02m 간격으로 격자를 조밀하게 배열하였으며, 정수지 내부는 0.2m 간격으로 격자를 배열하여 정수지 해석에 총 184,361개의 삼각형 격자(Triangle mesh)를 적용하였다. 격자수 배열의 정확도를 검증하기 위해 체류시간, 환산계수에 대하여 CFD 해석 값(18만개)과 실험값을 비교한 결과 오차는 2.3%로 나타나 CFD의 신뢰성이 높은 것으로 나타났다. (3.1 추적자 실험과 CFD의 상관관계 분석 참조) 18만개의 격자수 보다 낮은 격자수(Coarse grid)인 12만개(117,013개)에 대하여 해석한 결과 실험값과의 오차는 13.9%로 나타났으며, 18만개 격자수 보다 높은 격자수(Finer grid)인 45만개(448,705개)에 대하여 해석한 결과와 실험값의 오차는 2.5%로 나타나 Computational cost effective를 고려할 경우 18만개의 격자수를 배열하는 것이 타당한 것으로 판단되었다.

실규모 정수센터에서는 송수량에 따라 유입량이 변하기 때문에 일정한 유량이 유입되는 날을 선정한 후 실험당일 평균유량을 초기조건으로 사용하였다. 착수정 외벽과 접촉

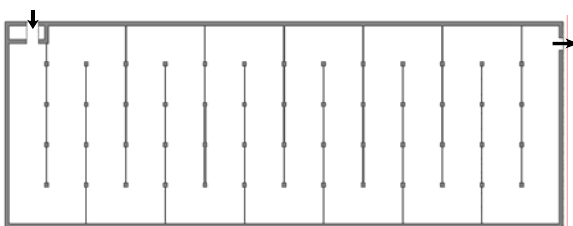


Fig. 1. Schematic diagram of clearwell

하고 있는 물의 유속은 상당히 낮기 때문에 No-Slip Condition을 적용하였으며, 자유표면(Water free surface)은 고정면(Fixed surface)으로 가정하였다(Launder and Spalding, 1974; Schiesser, 1991).

Adams and Rodi(1990)는 난류상태에 있는 벽면(Wall) 근처에서는 낮은 유속(Low velocity)으로 인하여 큰 점성층(Viscous layer) 즉 속도구배(Velocity gradient)가 큰 층(Layer)이 형성되기 때문에 격자수를 집중시켜 배열할 필요가 있으나 계산속도 향상을 위해서는 Launder and Spalding(1974)이 제안한 벽 법칙(Law of wall)을 도입해야 한다고 보고하고 있어, 본 연구에서도 무차원 함수인 벽 법칙을 정수지에 적용하여 해석하였다.

2.2.2 난류모델(Turbulence model)

정수지 내 흐름은 층류(Laminar flow)가 아닌 난류(Turbulent flow)이기 때문에 난류현상을 반영하여 해석할 필요가 있으며, 난류운동은 난류의 강도를 나타내는 속도스케일(Velocity scale)과 난류의 크기를 나타내는 길이스케일(Length scale)의 2가지 특성량으로 표현된다. 본 연구에서는 난류현상을 수치적으로 해석하기 위해 제 2 방정식 난류모형인 $\kappa - \epsilon$ 모델을 적용하여 난류현상을 해석하였다.

여기서 κ 는 난류운동에너지(Turbulent kinetic energy), ϵ 는 난류의 소산률(Turbulent dissipation rate)을 의미한다. 난류운동에너지와 난류의 소산률은 식 (1), (2)와 같이 표시 될 수 있다.

Rodi(1980)에 따르면 $\kappa - \epsilon$ 모델은 이론과 실험을 통해 만들어진 Semi-empirical 모델로 유체흐름 및 대기흐름 해석에 가장 많이 사용되고, 환경분야 해석에서도 타당한 결과를 제공해 준다고 하였다.

$$\kappa = \frac{1}{2}(\overline{u_1^2} + \overline{u_2^2}) \tag{1}$$

$$\epsilon = \frac{\kappa^{\frac{3}{2}}}{l} \tag{2}$$

여기서, $\overline{u_1^2}$: x축 평균유속, $\overline{u_2^2}$: y축 평균유속, l : 난류 유동의 길이

식 (1)과 식 (2)에 의하여 산출된 κ , ϵ 를 이용하여 식 (3)과 같은 난류점성계수(Turbulent eddy viscosity)를 산출할 수 있으며, 난류점성계수는 유체의 물성 값이 아닌 난류의 상태를 반영한 값이다(Launder & Spalding, 1974).

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

여기서, ρ : 유체의 밀도, C_μ 는 실험결과로 산출된 상수로 0.09 이다.

2.2.3 해석방법(Solver)

본 연구에서는 정수지를 2차원(2D Geometry)으로 디자인한 후 격자를 구성하였다. 실험당일 유입유량은 일정하기 때문에 정수지의 유동해석은 정상상태(Steady state)에서 해석하였으며, 시간별 추적자의 농도분포를 해석하기 위해 추적자의 거동은 비정상상태(Unsteady state)로 해석하였다. CFD 설정조건으로 질량방정식, 운동량방정식, 난류방정식 등을 각각 해석하는 Segregated solution algorithm을 사용하였으며, 질량방정식과 운동량방정식을 결합시켜 압력보정방정식을 만들 수 있는 SIMPLE (Semi-implicit method for pressure linked equation) 해법을 사용하였다(Patankar and Spalding, 1972).

완화계수에 따라 압력보정방정식(Pressure correction equation)의 해가 발산 또는 수렴하기 때문에 본 연구에서는 압력(Pressure), 밀도(Density)는 각각 0.3, 운동량(Momentum)은 0.45를 적용하여 수렴된 값을 얻을 수 있었으며, 유입 및 유출부의 질량유속(Mass flow rate)의 차이는 0.0001%로 질량방정식을 만족하는 것으로 나타났다. 수렴기준은 운동량방정식의 x축, y축의 속도, 난류방정식의 난류운동에너지(κ)와 난류소산율(ε)의 잔차(Residuals)가 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} 으로 분류하여 평가하였으며, 유출유속이 변화가 없을 때 수렴된다고 판단하였다. 차분법(Discretization)은 운동량(Momentum), 난류운동에너지(Turbulent kinetic energy), 난류의 소산률

(Turbulent dissipation rate)에 대하여 1차 상류차분, 2차 상류차분, 3차 상류차분도식으로 분류하여 평가하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1. 추적자 실험과 CFD의 상관관계 분석

3.1.1 추적자 실험과 CFD의 불소농도 및 누적비율 분석

실규모 정수센터에서는 송수량에 따라 유입량이 변하기 때문에 비교적 일정한 유량이 유입되는 날을 선정한 후 정상상태에서 유동을 해석하였으며, 추적자 실험과 비교하기 위하여 CFD 코드(Fluent) 내 추적자 모델(Species model)을 이용하여 비정상상태(Unsteady state)에서 시간에 따른 불소의 농도를 예측하였다.

Fig. 2 (a), (b)는 추적자 실험과 CFD에 대하여 시간 별 불소농도변화(Residence time distribution)와 누적비율(Cumulative residence time distribution)을 나타낸 그래프이며, 추적자 물질인 불소의 초기농도는 1.26 mg/L로 측정되었다.

추적자 실험과 CFD에 대하여 정수지 유출부에서 시간에 따른 불소농도를 해석한 결과, 유사하게 변화되는 것으로 나타났다. 즉, 추적자 투입 후 89분이 흐른 후 추적자 실험의 불소농도는 0.03 mg/L, CFD의 불소농도는 0.031 mg/L로 예측되었다. 99분이 흐른 후 추적자 실험의 최대농도는 0.05 mg/L, CFD의 최대농도는 0.048 mg/L 까지 증가되는 것으로 나타났다.

Fig. 3 (a)와 (b)는 불소농도와 누적비율에 대하여 추적자 실험과 CFD의 상관관계를 분석한 그래프이다. 상관성을 분석하기 위해 통계학의 회귀분석을 사용하였으며, 회귀분석 값의 적합여부는 결정계수(R^2)를 이용하였다. Fig. 3 (a), (b)에 나타났듯이, 불소농도와 누적비율에 대해 추적

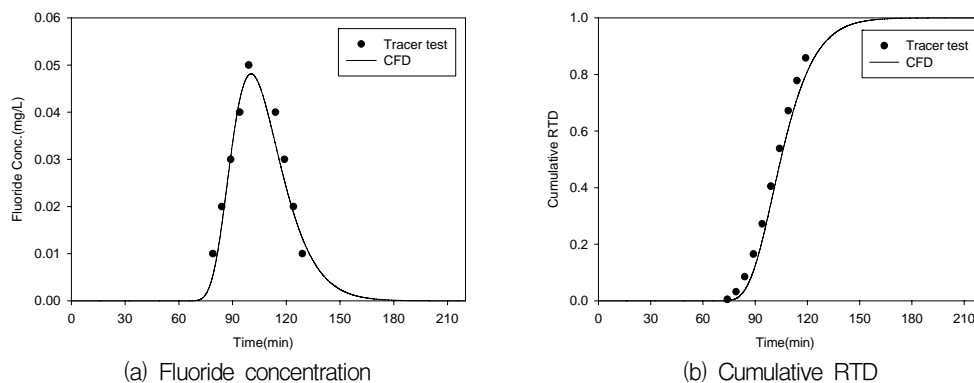


Fig. 2. Verification of CFD reliability

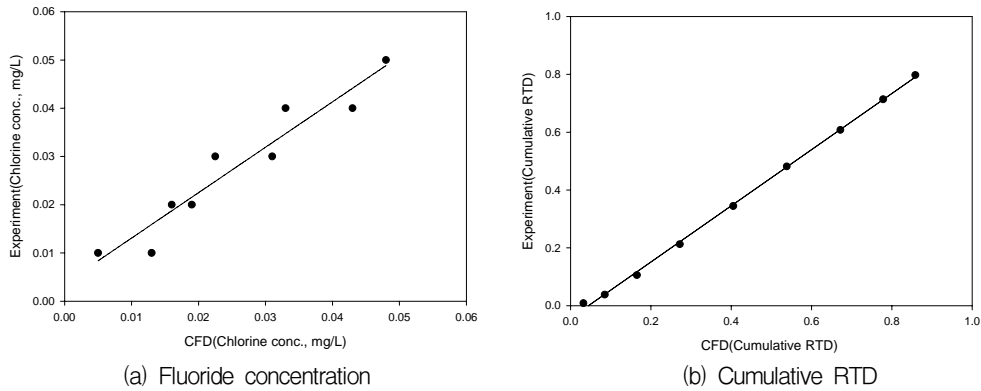


Fig. 3. Correlation analysis of tracer test and CFD

자 실험과 CFD의 상관성을 분석한 결과, 결정계수는 각각 0.921, 0.999로 나타나 CFD의 신뢰도가 높은 것으로 판단된다. 또한, 누적비율의 총제곱합(Total sum of squares)에 대한 잔차제곱합(Residual sum of squares)이 불소농도보다 낮기 때문에 누적비율의 결정계수가 더 높게 나타난 것으로 판단된다.

3.1.2 추적자 실험과 CFD의 체류시간, 환산계수, 소독능 분석

정수지 내 수리학적 효율은 환산계수($\beta = t_{10}/T$)로 평가될 수 있으며, 이상적인 플러그 흐름인 경우 β 는 1로 표현될 수 있다. 추적자 실험과 CFD의 체류시간(Retention time)과 환산계수(Baffle factor)를 Table 1에 나타내었다.

추적자의 누적비율이 0.1 즉 추적자의 10%가 빠져나올 때의 시간(t_{10})을 산출한 결과 추적자 실험과 CFD의 체류시간은 각각 86.8 min, 88.8 min으로 나타났으며, 체류시간을 이용하여 환산계수를 산출한 결과 추적자 실험의 환산계수

는 0.77, CFD의 환산계수는 0.79로 오차는 2.3%로 나타났다. 이 때 유입유량(Q)은 3,840 m³/h이고, 용량(V)은 7,225 m³로 이론적인 체류시간($T=V/Q$)은 113 min이다.

정수지 내 소독능은 불활성화비($CT_{\text{계산값}}/CT_{\text{이론값}}$)로 평가하였으며, $CT_{\text{계산값}}$ 은 유출부의 염소농도와 체류시간(t_{10})을 이용하여 산출하였으며, $CT_{\text{이론값}}$ 은 정수처리기준등에 관한 규정 내 자료를 이용하였으며, 해석결과를 Table 2에 나타내었다.

실험당일 암사아리수정수센터(2정수장) 정수지의 탁도는 0.05 NTU, 소독제의 농도는 0.59 mg/L, pH는 7.3, 수온은 22.7°C로 나타났다.

<Table 2>에 나타난 바와 같이 추적자 실험과 CFD의 소독능을 평가한 결과 바이러스 불활성화비는 각각 44.1, 45.3으로 나타났으며, 지아디아 포낭의 불활성화비는 각각 6.5, 6.6으로 나타났다. 바이러스와 지아디아 포낭의 불활성화비에 대하여 추적자 실험과 CFD의 오차를 평가한 결과 각각 2.7%, 2.3%로 나타나 실제 소독능과 모사된 소독능의 차이는 없다고 판단된다.

<Table 1> Comparison of hydraulic efficiency of tracer test and CFD

	Retention time(t_{10} , min)	Baffle factor(t_{10}/T)	Remarks
Tracer test	86.8	0.77	T=113 min
CFD*	88.8	0.79	

*CFD 해석조건 : 난류모델(Standard $k-\epsilon$), 차분법(1차 상류차분), 수렴기준(잔차 : 10^{-4})

<Table 2> Evaluation of disinfection performance of tracer test and CFD

	Baffle factor (t_{10}/T)	$CT_{\text{calc.}}$ (mg · min/L)	Virus Inactivation ratio	Giardia Inactivation ratio
Tracer test	0.77	52.0	44.1	6.5
CFD	0.79	53.4	45.3	6.6

3.2. CFD 코드 내 수치모델에 따른 수리학적 효율 평가

3.2.1 난류모델에 따른 수리학적 효율 평가

정수지 내 흐름은 난류(Turbulent flow)에 의해 지배되며, 난류의 비선형성 및 불규칙성에 의해 난류모델을 도입하여 해석할 필요가 있다. 유동해석 시 가장 널리 이용되고 있는 $\kappa-\epsilon$ 난류모델을 사용하여 정수지 내 유동을 해석하였으며, $\kappa-\epsilon$ 모델은 Standard $\kappa-\epsilon$ 모델, RNG $\kappa-\epsilon$ 모델, Realizable $\kappa-\epsilon$ 모델로 분류될 수 있다. 수리학적 효율에 대하여 난류모델에 따른 해석결과를 추적자 실험과 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 4 (a), (b)에 나타내었다.

Fig. 4 (a)에 나타난 바와 같이 난류모델 별로 체류시간을 평가한 결과, Standard $\kappa-\epsilon$ 과 Realizable $\kappa-\epsilon$ 모델의 체류시간은 각각 88.8분, 85.8분으로 나타나 추적자 실험 결과(86.8분)와의 오차는 각각 2.3%, 1.2%로 나타난 반면, RNG $\kappa-\epsilon$ 모델을 적용할 경우 체류시간은 80.6분으로 나타나 오차가 7.1%로 증가되는 것으로 밝혀졌다. 이 RNG $\kappa-\epsilon$ 모델은 Yakhot(1992)에 의해 개발된 난류모델로 강한 회전흐름(Rotating flow) 또는 소용돌이(Swirl)가 발생하는 부분에 적용하면 정확도를 높일 수 있지만, 일정한 흐름이 지속되는 정수지 흐름해석에는 적합하지 않은 것으로 나타났다. Fig. 4 (b)는 난류모델 별로 산출된 체류시간을 이용하여 환산계수를 분석한 결과이다. 추적자 실험의 환산계수는 0.77로 나타났으며, 난류모델의 환산계수는 0.71 ~ 0.79로 예측되었다. 즉, Standard $\kappa-\epsilon$ 모델은 0.79, RNG $\kappa-\epsilon$ 모델은 0.71, Realizable $\kappa-\epsilon$ 모델은 0.76으로 나타나 정수지 해석에 적합한 난류모델은 Realizable $\kappa-\epsilon$ 또는 Standard $\kappa-\epsilon$ 난류모델을 적용해야 된다고 판단된다.

3.2.2 차분법에 따른 수리학적 효율 평가

차분법은 연속방정식, 운동량 방정식, 난류방정식 등과 같은 편미분방정식을 수치적으로 해석하는 방법으로, 차분법에 따라 CFD 해석값이 달라질 수 있기 때문에 정수지 해석에 적합한 차분법을 선택할 필요가 있다. 본 연구에서는 차분법 중에 하나인 상류차분도식을 사용하였으며, 이 상류차분도식은 경계에서의 대류량을 중심차분(Central difference)처럼 경계면 좌우격자점의 평균값을 취하지 않고 유동흐름의 상류측 값을 사용하는 도식으로 수치계산에 있어 대류항에 생기는 문제점을 보완한 차분방법 중 하나이다. 차분법에 따른 수리학적 효율을 1차 상류차분(1st upwind difference scheme), 2차 상류차분(2nd upwind difference scheme), 3차 상류차분(3rd upwind difference scheme)으로 분류하여 평가하였다.

Fig. 5 (a), (b)는 차분법에 따른 수리학적 효율을 추적자 실험과 비교한 결과이다. Fig. 5 (a)에 나타난 바와 같이 차분법 별로 체류시간을 평가한 결과 1차, 2차, 3차 상류차분은 각각 88.8분, 89.2분, 89분으로 나타났으며, 추적자 실험결과(86.8분)와의 오차는 2.3%, 2.8%, 2.5%로 큰 차이가 없었다. 산출된 체류시간을 이용하여 환산계수를 분석한 결과에서도 1차, 2차, 3차 상류차분의 환산계수는 0.786, 0.789, 0.788로 차분법에 따른 환산계수 차이는 크지 않았으며(Fig. 5. (b)), 추적자 실험과의 오차도 3%이내로 나타났다. 차분법에 따라 CFD 해석 값이 크게 변하는 유체의 흐름에서는 수치해의 오차를 줄이기 위해 2차 또는 3차의 고정확도 상류차분법을 사용하지만, 정수지 해석 시에는 1차 상류차분만 적용해도 높은 정확도를 제공해 줄 수 있다고 판단된다.

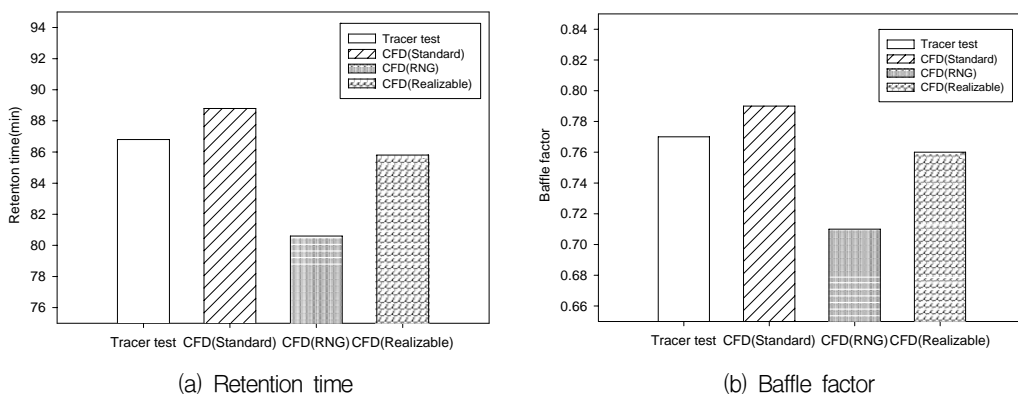


Fig. 4. Evaluation of hydraulic efficiency with turbulence model

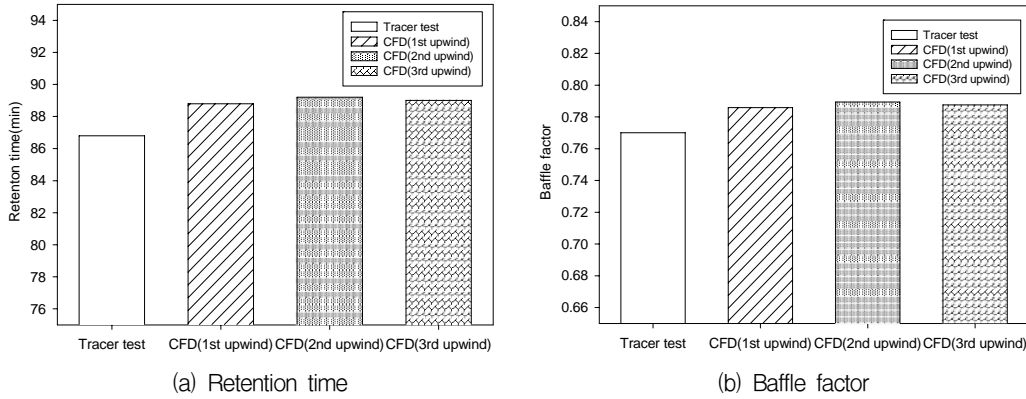


Fig. 5. Evaluation of hydraulic efficiency with discretization method

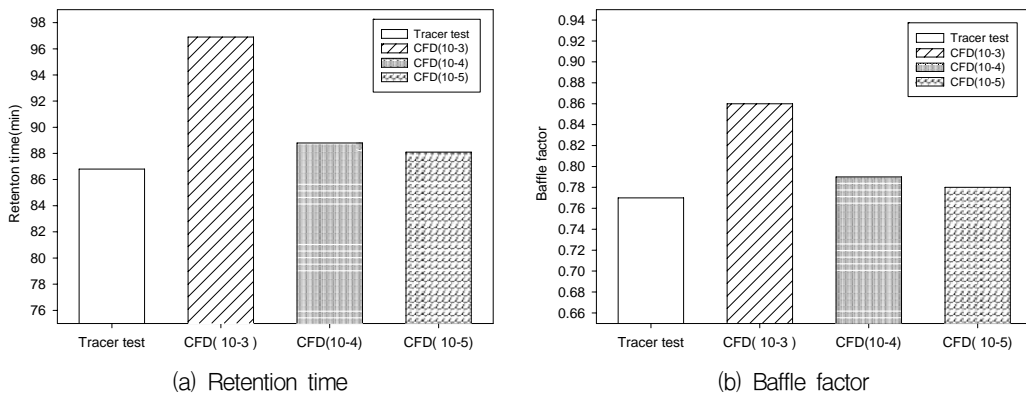


Fig. 6. Evaluation of hydraulic efficiency with convergence criteria

3.2.3 수렴기준에 따른 수리학적 효율평가

CFD 코드 내 수렴기준에 따라 해석 값이 달라지기 때문에 정수지 해석에 적합한 수렴기준을 제시할 필요가 있다. 본 연구에서는 수렴기준을 판별하는 인자로 잔차(Residuals)를 이용하였으며, 이 잔차는 수렴기준을 판별하는 수치해석의 무차원 값이다. 운동량방정식의 x축, y축의 속도, 난류방정식의 난류운동에너지(κ)와 난류소산율(ϵ)의 잔차(Residuals)를 각각 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} 적용에 따른 수리학적 효율을 평가하였다.

Fig. 6 (a), (b)는 수렴기준에 따른 수리학적 효율을 추적자 실험과 비교한 결과이다. Fig. 6 (a)에 나타난 바와 같이 수렴기준에 따라 체류시간을 평가한 결과 잔차가 10^{-4} , 10^{-5} 인 경우 추적자 실험결과와의 오차는 각각 2.3%, 1.5%로 나타난 반면에 잔차 10^{-3} 을 적용할 경우 체류시간이 96.9분으로 추적자 실험결과와의 오차는 11.2%로 증가되는 것으로 나타났다. Fig. 6 (b)는 산출된

체류시간을 이용하여 환산계수를 분석한 결과이다. 추적자 실험의 환산계수는 0.77로 나타난 반면, 잔차 10^{-3} 을 적용할 경우 0.96, 10^{-4} 인 경우 0.79, 10^{-5} 인 경우 0.78로 수렴기준 별로 환산계수는 0.78 ~ 0.96으로 나타났다. 수렴기준으로 잔차 10^{-3} 을 적용할 경우 오차가 11.2% 증가되기 때문에 정수지 해석에 적합한 수렴기준으로 잔차 10^{-4} 또는 10^{-5} 을 적용할 필요가 있다고 판단된다. 또한, 수렴기준인 잔차를 10^{-6} , 10^{-7} 이상으로 증가시켜 해석할 수 있으나 Computational cost effective를 고려할 경우 잔차를 10^{-4} 또는 10^{-5} 을 적용하는 것이 바람직하다.

4. 결론

본 연구에서는 실규모 정수센터의 정수지를 대상으로 추적자 실험과 CFD의 상관관계를 분석하였으며, 정수지 해석에 적합한 난류모델과 차분법, 수렴기준을 제시하였다.

1. 불소농도를 이용하여 추적자 실험과 CFD의 체류시간을 분석한 결과 추적자 실험의 체류시간은 86.8분, CFD의 체류시간은 88.8분으로 나타났으며, 체류시간을 이용하여 환산계수를 평가한 결과에서도 추적자 실험은 0.77, CFD는 0.79로 나타나 추적자 실험과 CFD의 상관성이 높은 것으로 분석되었다.

2. 추적자 실험과 CFD의 소독능을 평가한 결과에서도 바이러스 불활성화비는 각각 44.1, 45.3으로 나타났으며, 지아디아 포낭의 불활성화비는 각각 6.5, 6.6으로 나타나 모사된 소독능과 실제 소독능 사이에는 차이가 없는 것으로 나타났다.

3. CFD 코드 내 난류모델, 차분법, 수렴기준에 따른 수리학적 효율을 추적자 실험과 비교한 결과 난류모델과 수렴기준이 CFD 해석 값에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 즉, Realizable $\kappa - \epsilon$, Standard $\kappa - \epsilon$ 난류모델을 적용할 경우 추적자 실험과의 오차는 2.3%, 1.2%로 차이가 없는 반면에, RNG $\kappa - \epsilon$ 난류모델을 적용할 경우 오차는 7.1%로 증가되어, 정수지 해석 시 Realizable $\kappa - \epsilon$, Standard $\kappa - \epsilon$ 모델을 적용할 필요가 있다.

4. 차분법에서는 1차, 2차 상류차분과 고차 차분법인 3차 상류차분을 사용하여 추적자 실험과 비교한 결과 오차는 각각 2.3%, 2.8%, 2.5%로 나타나 정수지 해석 시 차분법에 따른 해석 값 차이는 낮은 것으로 나타났다.

5. 수렴기준인 잔차에 따른 CFD 해석 값과 추적자 실험을 비교한 결과 잔차 10^{-4} , 10^{-5} 을 적용할 경우, 오차는 각각 2.3%, 1.5%으로 나타난 반면, 잔차 10^{-3} 을 적용할 경우 오차는 11.2%로 증가되어 정수지 해석 시 잔차를 10^{-4} 또는 10^{-5} 을 적용하는 것이 바람직하다.

6. 2010년 캐나다 온타리오 주 환경청에서는 소독부산물 최소화화를 위한 가이드라인을 제시하였는데, 이 가이드라인에는 “추적자 실험 또는 CFD” 를 이용하여 소독능의 최적화(Optimization of disinfection)를 수행해야 된다고 보고하고 있고, 본 연구결과에서도 추적자 실험을 CFD 진단으로 대체가 가능한 것으로 판단되어, 추적자 실험으로만 되어 있는 정수처리규정을 “추적자 실험 또는 CFD” 로 개정할 필요가 있다고 사료된다.

참고문헌

USEPA(1989) Drinking water; National primary drinking water regulations; Filtration, Disinfection; Turbidity, Giardia lamblia, Viruses, Legionella, and Heterotrophic bacteria; Final rule, 54(124)
환경부(2008) 정수처리기준등에 관한 규정(환경부 고시 제

2008-60호)

Bishop, M. et al.(1993) Improving the disinfection detention time of a water plant clearwell, J. AWWA, 85(3), 68~75
Clark, M.M. et al.(1999) Improving clearwell design for CT Compliance, AWWARF
Lousi Soracco(2009) Silver lake WTP clearwell Part 2 – the tracer study, NEWWA spring joint regional conference and exhibition
Templeton, M.R., Hofmann, R. and Andrews, R.C.(2006) Case study comparisons of computational fluid dynamics modeling versus tracer testing for determining clearwell residence times in drinking water treatment, J. Environ. Eng. Sci., 5, 529~536
Li, J. et al.(2006) Application of computational fluid dynamics(CFD) to ozone contactor optimization, Water Science & Technology : Water Supply, 6(4), 9~16
Canada Ontario EPA(2010) Strategies for minimizing the disinfection by products trihalomethanes and haloacetic acids, Ministry of Environment, Ontario, Canada
US EPA(2006) Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 Enhanced SWTR
Patankar, S.V.(1980) Numerical heat transfer and fluid flow, Taylor & Francis
Schuesser, W.E.(1991) The numerical method of lines : Integration of partial differential equations, Academic press Inc.
Lauder, B.E. and Spalding, D.B.(1974) The numerical computation of turbulent flows, Computer methods in applied mechanics and engineering, 3(2), 269~289
Adams, E.W., Rodi, W.(1990) Modeling flow and mixing in sedimentation tanks, J. Hydraul. Eng. 116(7), 895 ~ 913
Rodi, W.(1980) Turbulence models and their application in hydraulics ; A state of the art review, IAHR, Delft, The Netherlands
Patankar, S.V. and Spalding, D.B.(1972) A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows, Int. J. Heat Mass Transfer, 15, 147~163
Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B. & Speziale, C.G.(1992) Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique, Physics of Fluids, 4(7), 1510~1520