

水體 熱流動 數值解析 프로그램 개발 및 응용 :
湖沼, 일차침전조

Development and Application of a Computer Program for the
Analysis of Heat Transfer and Fluid Flow of Water Body :
Lake and Primary Clarifier

박 병 수* · 김 경 미** · 송 우 영*** · 장 동 순**** · 권 오 현*****
Park, Byung Soo · Kim, Kyung Mi · Song, Woo Young · Jang, Dong Soon · Kwon, Oh Hun

Abstract

A computer program is developed in order to investigate the fluid flow and heat transfer of a water body in a 2-D vertical rectangular coordinate. The specific purpose of this study is to obtain a physical insight of several fluid flow problems which occur in a lake and the water and wastewater treatment facility like a primary clarifier. The performance of computer program developed is successfully evaluated by the comparison of other two experimental and computational data in open literature : the first comparison is made against the numerical data associated with the cooling water discharge and the other is numerical and experimental works for the primary clarifier of Sarina City at Ontario. Further, the computer program is applied to investigate the feature of lake flow, say lake turnover, and 2-D vertical channel flow in terms of temperature, wind velocity and flow rate, etc. The computational results appear to be physically acceptable and consistent. The computer program developed in this study shows the possibility of the viable tool to figure out the flow characteristics of water reservoir.

요 지

열 유동 현상을 규명하기 위한 연구로서 2차원 연직 좌표계의 수체 유동 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 이러한 연구의 구체적인 목적은 일차침전조 같은 폐수나 용수처리 및 상수원 호수에서의 수체유동에 대한 기작을 파악하고자 함이다. 이렇게 개발한 컴퓨터 프로그램 성능을

- * 대우 고등 기술 연구원, 연구원
- ** 충남 대학교 환경공학과, 석사 과정
- *** 한국 전력 연구소, 연구원
- **** 충남 대학교 환경공학과, 부교수
- ***** 충남 대학교 토목공학과, 교수

문헌에 나타난 수치해석 및 실험 자료와 성공적으로 비교, 검증하였다. 첫번째 검증 문제는 응축열 방출에 따른 수체유동해석에 대한 것이며 두번째 문제는 캐나다 온타리오주 사리나市에 있는 일차침전조에 대한 수치해석 실험 결과이다. 이렇게 개발된 컴퓨터 프로그램은 2차원 호소의 전도와 같은 특성규명에 응용하였으며 주요 변수로는 유량, 바람의 속도 그리고 온도 분포 등을 고려하였다. 나아가서 호소의 전도 현상과 같은 유동 특성을 규명하기 위한 연구의 일환으로서 바람의 속도나 온도 분포에 따른 수치해석을 시도하였다. 결과는 물리적으로 일관성 있게 나타났으며 수체 유동 특성 규명을 위한 유용한 도구로서 가능성을 보였다.

1. 서 론

수질 개선을 위한 공학적인 접근은 전통적인 현장 처리 방법에서부터 취수 원에 대한 적극적이고도 근본적인 제어에 이르기까지 매우 다양하며 이는 수문학, 기상학, 수질/수체모델, 고도 정수처리 기술등 다양한 학문 분야가 연계된 총체적인 노력이 요구되기에 이르렀다. 이 중에서 특히 湖沼에 대한 수체 이동 모델은 수문학과 수질 모델을 연계시키는 역할을 하는 것으로서 氣象조건, 오염 물질의 생성 및 농도, 취수 및 유입량 등 제반 변수에 따른 수체의 이동 현상 및 작용 메커니즘에 대한 구체적인 理解가 그 장점으로 나타난다. 수체흐름에 대한 이러한 수치 해석 능력은 구체적으로 화력 및 원자력 발전소 응축열 방출에 따른 온도변화 예측, 취수 지역의 오염 물질이나 용존산소의 농도 변화, 봄·가을 호소의 전도 현상 등 오염원에 대한 예측에서부터 호소의 성층화현상 등에 대한 분석이 가능하다는 점에서 매우 바람직한 연구 방법의 하나라 할 수 있다. 또한 수치처리 시스템에 대한 비근한 例로서 용수나 폐수처리 공정에 다양하게 쓰이는 일차 침전 조의 응용을 들 수 있다. 일차 침전 조의 유량, 규격, 침전물의 특성에 따른 폐쇄로(short-circuiting)방지를 위한 구체적인 배플(baffle)의 설계와 FTC(Flow-Through Curve) 파악, 침전효율 예측에 가능한 유용한 도구로 사용된다. 이러한 바탕에서 본 연구는 2차원 연직 수체의 난류, 열유동해석 프로그램을 개발하는 것을 목적으로 하였으며 그 일차적인 결과를 제시하고자 한다.

전산 유체역학에 의한 수체 유동해석은 위에서 언급한 바와 같이 巨視的인 大洋에서의 유동에서부터 비교적 크기가 작은 湖沼나 저수지, 그리고 폐/용수 처리 설비 내의 유동에 이르기까지 매우 다양하다. 이러한 시스템에 대한 수치 해석인 方法에 의한 설계 능력의 향상은 지난 20-30년간의 컴퓨터 용량및 속도의 현격한 신장과 함께 현상학적인 난류 모델 및 수치 해석 알고리즘의 발전에 힘입은 바 크다. 이러한 수치 해석에 의한 신뢰성 있는 컴퓨터 프로그램의 개발은 경비와 時間의 제약을 받는 實驗的 方法에 대한 相互補充의 도구로서 최근에 그 응용 범위가 급격히 확산되고 있다. 實驗에 의한 방법은 자료 획득이 확실하고 現實的인데 反하여 상세한 자료 획득에 시간적 또는 경비상에 어려움이 있으며 실험 장치 크기 변화에 따른 획득한 자료의 적용 범위가 그 시스템에 국한되는 등 일반성 결여가 문제로 나타난다. 그러나 검증된 프로그램에 의한 수치 해석 방법은 실험 변수나 실험장치 등에 변화가 容易할뿐만 아니라 時間상의 制約이 실험에 비해 크게 완화되는 長點이 있다.

이러한 전산 유체역학에 의한 水體 流動해석의 例는 여러 응용의 경우를 국내외 문헌에서 쉽게 발견할 수 있다. Oberkampf와 Crowe(1976)는 발전소 등에서 방출되는 냉각수로 인한 熱오염의 영향을 검토하기 위하여 작은 湖沼에서의 연직 2次元 유동 해석을 시도하였다. 이들은 운동량 방정식의 해를 위해 stream function과 vorticity 方法을 사용하였으며 난류 모델은 'constant viscosity' 모델을 사용하였다. 나아가서 기타 현상학적 모델로는 바람에 의한 전단력이 호소 유동에 미치는 영향과 함께 태양에 의한 단 파장 복사와 수체와 주

변 환경과 장과장 복사에 의한 열 교환 및 증발에 의한 냉각 효과 등을 고려하였다.

Stamou 등(1989)은 길이 32.7m, 높이 2.7m의 직사각형 형태의 일차 침전조 설계 2次元 연직 단면 직교 좌표에서의 난류 유동 프로그램을 개발하였다. 이들은 운동량 방정식을 해결하는데 있어서 SIMPLE(Semi-Implicit Method Pressure-Linked Equations) (Patankar, 1980)의 發展된 형태의 하나인 SIMPLER(SIMPLE-Consistent ; van Doormaal과 Raithby, 1984) 알고리즘을 사용하였으며 난류에 의한 레이놀즈 전단력 문제는 표준 $k-\epsilon$ 난류 모델을 이용하였다. 또한 일차침전조 부유물질의 농도 분포를 파악하기 위해 Eulerian 형태 부유물질 농도 지배 방정식을 이용하였다. 수치 해석 結果를 실험 자료와 比較하여 프로그램의 신뢰성을 確認하였다. 이렇게 개발한 프로그램을 이용하여 일차 침전조의 유량, 고품부유물의 입도 크기와 분포 등에 따른 장방형의 일차 침전조의 성능 파악 및 설계에 이용하였다.

본 연구에서는 위에서 언급한 두개의 論文 즉 Oberkampf와 Crowe(1976)의 열 오염 문제 그리고 Stamou 등(1989)의 일차침전조 유동해석의 수치 해석 실험적 結果를 본 연구에서 개발한 프로그램의 정확성 및 성능을 검토하는 자료로 사용하였다. 그 밖에 일차침전조와 類似한 개수로나 관수로 등에 대한 수치 수치 해석 例는 많은 문헌에서 쉽게 발견할 수 있다(AbdelGawad와 McCorquodale, 1985 ; Farrell과 Stefan, 1988 ; Viollet, 1987). 한편 Durst와 Wennerberg(1991)는 순환이 존재하는 수체에 대하여 $k-\epsilon$ 모델을 이용하여 정교한 유동 해석을 하였다. 이들은 알고리즘의 종류와 格子數의 크기에 따른 민감도 검사를 수치유동에 대해 조직적으로 시도하였는데 주로 'false diffusion' 영향을 검토하였다. 이들이 사용한 알고리즘은 Quick과 Hybrid Scheme을 사용하였으며 격자 수는 최대 154×150 까지의 크기를 試圖하였다.

한편 Rodi(1987)는 수체와 大氣로 이루어지는 주변 환경의 유동이 대부분 성층화를 이루고 있음을 지적하고 이러한 성층화 현상의 예측 및 해석하

는 수학적 모델에 대한 체계적인 문헌 자료의 분석을 시도하였다. 수치 유동 해석에 대한 국내에 發表된 論文으로는 최근 팔당호 수치 순환 모형을 발표한 윤태훈과 김민규(1994)의 논문을 例로 들 수 있다. 이들은 팔당호 순환을 예측하기 위해 2次元 수심 적분 지배 방정식을 사용하였는데 이 모형은 수심 적분된 유속과 수위를 제공하나 흐름의 연직 변화를 예측 못하는 것이 短點으로 지적된다. 그럼에도 不拘하고 이들이 이러한 모델을 사용한 것은 팔당호의 平均 水深이 7m로 相對的으로 작고 팔당호는 발전과 상수 취수가 많아 수심 방향의 물리량의 변화가 크지 않다고 보았기 때문이다. 이들은 매우 넓은 영역의 수체이동을 고려하였으며 전향력의 효과를 포함하였고 수심에 따른 압력은 정수압 분포를 가정하였다. 한편 정태성과 이길성(1994)은 표면 온 배수 확산을 수치해석하기 위해 물의 유동에 관한 3차원 수치 모형의 結果를 발표하였다. 이들은 밀도 변화와 자유 수면을 고려하였으나 연직방향의 운동량 방정식은 정수압 근사를 하였으며 밀도에 대한 부스네스크(Boussinesq) 가정을 도입하였다.

위에서 살펴본 바와 같이 수치 유동에 대한 고도 수치 해석은 수질 개선을 위한 적극적인 제어 방법으로서 상수원 관리에 필요한 수문학과 수질 모델을 연결시키는 교량 역할을 하는 분야일 뿐만 아니라 용수나 폐수 처리 장치의 설계 및 효율 개선을 위한 중요한 도구로써 역할을 하고 있다. 이러한 목적 달성을 위한 연구로서 본 논문에서는 2차원 수치 난류 유동 프로그램을 개발하였으며 이를 일차침전조와 湖沼 수치 해석 또는 실험 結果와 比較하여 검증하였다. 이렇게 검증된 프로그램을 이용하여 湖沼의 바람 및 온도에 따른 유동 특성을 규명하는데 사용하였다. 본 연구에 대한 자세한 방법 및 내용에 대한 토론은 본 전산열유체 실험실(권오현 등, 1994 ; 박지영 등, 1994 ; 박지영, 1995 ; 이상일 등, 1994 ; Jang 등, 1994)에서 수행한 연구 보고서나 문헌에 제시하였다.

2. 수학적 모델 및 방법

2.1 일반 지배 방정식

2차원 비반응 난류 모델에 대한 유동장을 해석하기 위한 일반 종속변수에 대한 지배 방정식은 단위체적당 시간에 따른 변화량이 유동 및 확산 흐름율(flux)의 divergence와 단위체적당 생성항의 합으로 표시된다. 구체적인 表現式은 아래와 같이 나타내어진다(Patankar, 1980).

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\rho\vec{u}\phi) + \vec{\nabla} \cdot (\Gamma_{\phi}\vec{\nabla}\phi) + S_{\phi} \quad (1)$$

위 식에서 ϕ 는 일반 종속변수로서 x, y 각 방향에 따른 속도 u, v , 압력 p , 난류에너지 k 와 k 의 소산율 ϵ , 온도 T 등을 나타내며 Γ_{ϕ} 와 S_{ϕ} 는 ϕ 에 해당되는 난류확산계수와 생성항을 각각 나타내고 있다. 이 식은 검사 체적에 기초한 유한차분방법(finite difference method)과 멱법칙 기법을 사용하여 이산화 하였다. 이 경우에 아래와 같은 형식은 선형이나 실제 내용은 係數가 종속변수의 함수로 나타내어지는 비선형적인 이산화 방정식을 얻는다(Patankar, 1980).

$$a_p\phi_p = a_E\phi_E + a_W\phi_W + a_N\phi_N + a_S\phi_S + b \quad (2)$$

위에서 a_E, a_W, a_N, a_S 는 주격자점 P에 대한 동서북남방향의 격자점에서의 유동과 확산의 영향을 나타내는 계수이다.

2.2 압력·속도 알고리즘

운동량 방정식에서 압력과 속도의 연계 문제는 SIMPLEC(SIMPLE Consistent) 알고리즘을 사용하였다. SIMPLEC는 SIMPLE 알고리즘의 발전된 형태로 SIMPLER나 PISO와 같은 다른 알고리즘에 비해 컴퓨터 기억용량이 적게 소요되며 수렴능력이 뛰어난 장점이 있다(van Doormaal과 Raithby, 1984 ; Jang 등, 1986).

2.3 난류 모델

난류에서 열 유동 문제의 해석은 매우 다양한 특성 시간과 와(渦)크기에 대한 분해가 필요하나 이 계산은 매우 복잡하고 컴퓨터 용량도 많이 요구되므로 현재 또는 가까운 장래의 컴퓨터 용량과 속도로는 이에 대한 直接的인 해를 구하는 것은 쉽지 않다. 그러므로 보통 사용되는 방법은 주요 변수에 대한 시간 평균값을 얻는 방법이나 이때 유동항과 같은 비선형항에 대한 시간 평균은 레이놀즈(Reynolds) 전단력과 같은 변동상관항(turbulent fluctuation correlation)에 대한 모델이 요구된다. 이러한 레이놀즈 전단력은 부스네스크 가정을 이용하였고 이때 생긴 난류점성계수 μ 는 프란틀-콜모고로프(Prandtl-Kolmogorov) 관계식으로 나타내어지는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다(Rodi, 1984).

$$-\overline{\rho u'v'} = \mu \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \quad (3)$$

$$\mu = \frac{C_{\mu}\rho k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

위 식에서 k 와 ϵ 은 단위질량당 난류에너지와 그의 소산율을 나타낸다. 그러나 최근 $k-\epsilon$ 모델을 대신할 경제적인 난류 모델로 RNG(Renormalization Group) $k-\epsilon$ 모델 등이 많이 사용되고 있으며(Yakhot과 Orszag, 1986) 본 연구에서 이러한 RNG 모델을 부분적으로 사용하여 그 計算 結果를 비교·검토하였다. 이 RNG $k-\epsilon$ 모델은 표준 $k-\epsilon$ 모델의 약점을 보완한 모델로서 선회나 유동분리영역 등에서 잘 맞는 강력한 모델로 최근 제시되고 있다.

2.4 열전달모델

물의 전도 현상이나 온도 등의 성층화 현상을 예측하기 위해서는 에너지 방정식의 해를 얻어야 하며 이 경우에 태양 단 파장 복사, 구름이나 주위 환경과의 장파장 복사, 공기 유동에 따른 대류 열

전달 및 기화열에 의한 냉각 등의 문제가 고려된다. 이는 아래 식으로 요약될 수 있다(Oberkampf와 Crowe, 1976).

$$q_T = q_s + q_a - q_b - q_e + q_c \quad (5)$$

위 식에서 q_s 는 태양의 短波長 복사의 흡수 흐름율로 위도, 시간, 계절, 구름의 양, 물의 반사도 등의 함수로 나타내어지며 q_a 는 흡수되는 長波長 복사 에너지로 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$q_a = C\sigma T_a^4 C_L(1-R) \quad (6)$$

여기서 C 는 경험상수, σ 는 스테판-볼츠만 상수, C_L 은 구름보정인자이고 R 은 대기 복사 반사율을 각각 나타내고 있다.

q_b 는 물의 표면에서 외부로 방출되는 역복사를 나타낸다. q_e 는 기화 냉각에 의한 단위 면적 단위 시간당의 에너지 손실로 다음과 같다.

$$q_e = \rho_w L_w E \quad (7)$$

여기서 ρ_w 는 물의 밀도, L_w 는 기화잠열이고 E 는 기화 속도이다.

마지막으로 q_c 는 공기 유동에 의한 열 전달로서 바람의 속도, 대기압력, 수표면 공기의 온도 경사 등의 함수로 주어진다.

위와 같이 q_s, q_a, q_b, q_e, q_c 의 합을 계산함으로써 수표 면내에서의 순열흐름율(net heat flux)을 계산할 수 있고 이를 단위체적당 열원(volumetric heat source)으로 바꿈으로써 수표면을 통한 열 전달을 계산할 수 있다. 이러한 여러 사항을 고려한 일반 지배 방정식에 관련된 제반 사항을 Table 1에 나타내었다.

2.5 바람전단력 모델

바람에 의한 물 유동에 대한 영향을 고려하기 위해 Oberkampf와 Crowe(1976)가 사용한 물의 표면 위로 부는 바람의 전단력에 대한 經驗式은 아래와 같다.

$$\tau_s = 0.185\rho_a U_s^2 (\log Re_s)^{-2.584} \quad (8)$$

위 식에서 τ_s 는 표면전단력, ρ_a , U_s 는 空氣의 密度와 속도, Re_s 는 호수의 시작 起點으로부터의 현재 지점을 나타내는 거리 x 를 特性길이로 한 레이놀즈수를 나타낸다. 식 (8)의 바람에 의한 湖沼 표면 전단력을 표면에 接하고 있는 검사 체적에서의 체적생성項으로 아래와 같이 나타냈다.

$$\text{바람전단력의 단위체적當 表現式} = \tau_s \cdot \frac{\text{접한면적}}{\text{검사체적의 체적}} \quad (9)$$

한편 Wu(1969)는 다양한 자료를 근거로 하여 아래와 같은 수표면에서 높이에 근거한 아래와 같은 경험 식을 제시하였으며 바람이 비교적 강한 경우에는 바람의 속도 3%정도가 물의 표면 속도로 적절하다고 결론지었다.

$$U_{\text{water surface}} = U_{\text{air}} \times 0.03 \quad (10)$$

본 연구에서는 위의 여러 경우에 적절한 표현식을 고려하였다.

Table 1. Turbulent Diffusion Coefficient and Source Term Expressions for ϕ

Variable	Name	Γ_ϕ	S_ϕ
u	horizontal velocity	μ	$\frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial v}{\partial x}) - \frac{\partial p}{\partial x}$
v	vertical velocity	μ	$\frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial v}{\partial y}) - \frac{\partial p}{\partial y} - (\rho - \rho_0) * g$
k	turbulent kinetic energy	$\frac{\mu}{\sigma_k}$	$G_k - \rho \epsilon$
ϵ	dissipation rate of k	$\frac{\mu}{\sigma_\epsilon}$	$C_1 G_k \frac{\epsilon}{k} - C_2 \frac{\epsilon^2}{k}$
T	temperature	$\frac{\mu}{\sigma_T}$	$\frac{q_T}{c_p} \cdot \frac{\text{area}}{\text{volume}} **$

$$G_k = \mu [2(\frac{\partial u}{\partial x})^2 + 2(\frac{\partial v}{\partial y})^2 + (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})^2]$$

$C_1=1.44, C_2=1.92, C_{\nu k}, \sigma_k=1.22$
* ρ_0 =대상 水體의 평균 밀도
** area/volume은 열 전달 면적을 해당 검사 체적으로 나누어서 평면 열원을 체적 열원으로 변형한 것이며 경계면의 경계 체적에만 적용됨.

2.6 물의 밀도 계산

한편, 연직 방향의 운동 방정식에서 온도 변화에 의한 부력이 발생한다. 즉 $-(\rho-\rho_0)g$ 로서 ρ 는 현재 온도에서의 밀도이고 ρ_0 는 湖沼의 평균 온도에서의 밀도를 나타낸다. 위에서 나타난 부력항을 계산하기 위해서는 온도에 따른 물의 밀도 자료가 필요하며 아래식 (11)은 0°C와 40°C 사이의 물의 밀도 자료(Perry와 Chilton, 1973)를 3차 다항식으로 나타낸 것이다.

$$\rho = (0.63420 + 0.19547 \times 10^{-2}T + 0.12593 \times 10^{-6}T^2 - 0.87217 \times 10^{-8}T^3) \times 1000 \quad (11)$$

2.7 경계 조건

입구에서의 속도 성분은 'parallel injection'을 가정하였으며 난류 강도는 10%를 난류 에너지 소산율은 경험 식에 준하였다. 벽면에서의 속도 성분은 'no slip'조건을 사용하였으며 평행 속도 성분에 대해서는 벽함수를 이용하였다. 出口에서의 경계 조건은 보통 Peclet수가 크다는 가정 하에 outflow boundary condition 또는 'zero Neumann'조건을 사용하였다. 한편 자유 水表面은 Stamou 등 (1989)과 마찬가지로 대칭면 조건을 사용하였다.

3. 수치 해석 결과 및 고찰

본 수치 해석 결과를 검증하기 위한 문제로 Fig. 1에 나타나 있는 6.1m×6.1m 크기의 냉각수 방출 湖沼와 Fig. 2의 캐나다 온타리오주 사리나市에 設置된 길이 32.7m×높이 2.7m의 일차침전조에 대한 자료를 그 대상으로 하였다.

Fig. 3은 6.1m×6.1m 호소에 대한 Oberkampf와 Crowe(1976)의 유동 해석의 결과를 제시하는 것으로서 Fig. 3(a)는 출입구가 상부에 위치해 있고 열 적 부력의 영향이 없는 등온 상태에서의 유동 양상을 나타낸다. Fig. 3(b)와 (c)는 출구 위치가 각각 중간과 아래에 위치할 경우로 유동은 크게 둘로 갈라져 나타나고 출구 위치가 바깥에 따라 재순환 영역의 크기가 달라지며 따라서 유동 유체

와 순환 유체와의 접촉면의 크기도 현저하게 달라짐을 알 수 있다.

Fig. 4의 (a), (b), (c)는 본 연구에서 수행한 수치 해석 결과로서 Fig. 3의 (a), (b), (c)와 각각 같은 경우이다. Fig. 3의 Oberkampf와 Crowe (1976)의 결과와 비교했을 때 유선 형태는 전반적으로 유사한 양상을 보이고 있다. 두 결과 모두 난류 모델에서 등난류점성계수(constant turbulent viscosity)를 사용하였다. 그러나 난류 모델에서 등난류점성계수보다 우수한 표준 k-ε모델을 사용했

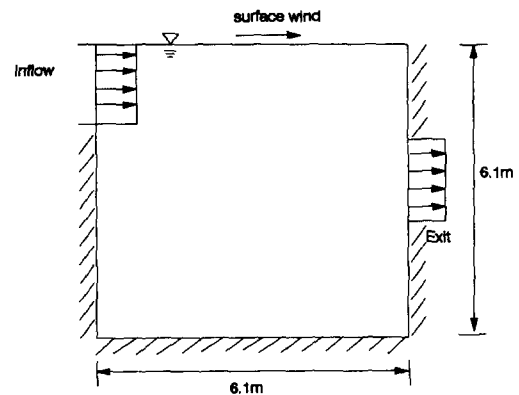


Fig. 1. Schematic Diagram used by Oberkampf and Crowe (1976)

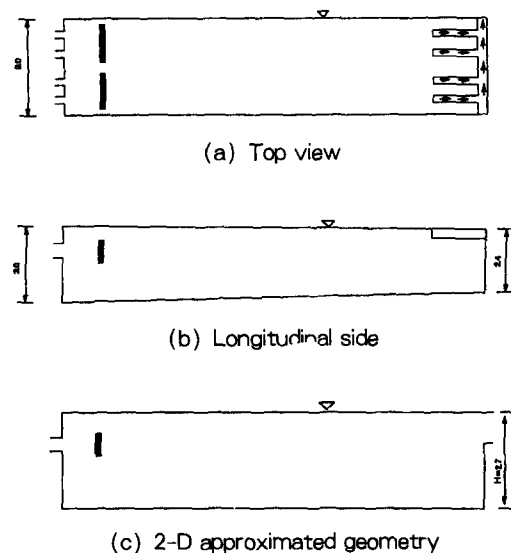
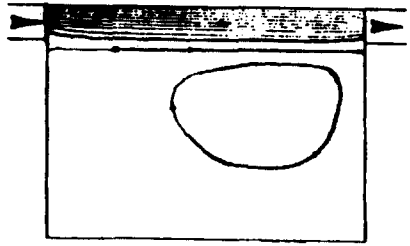
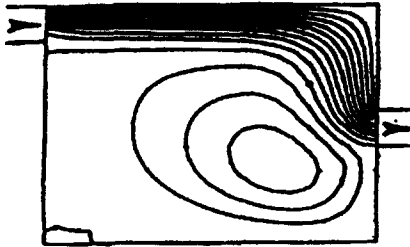


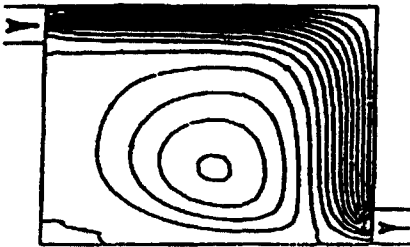
Fig 2. Geometry of the Clarifier



(a) At top



(b) At middle

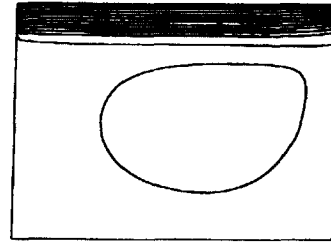


(c) At bottom

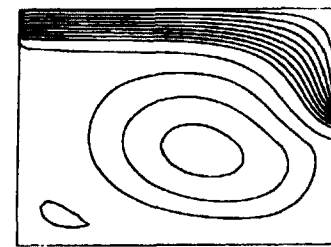
Fig. 3. Streamline Distribution according to the Location of Exit by Oberkamp & Crowe

을 때 유동장은 Fig. 3 및 4와 가시적인 차이를 보여 난류 모델의 중요성이 나타났다. 표준 $k-\epsilon$ 모델에 의한 결과는 본 논문에서 제시하지 않는다 (권오현 등, 1994).

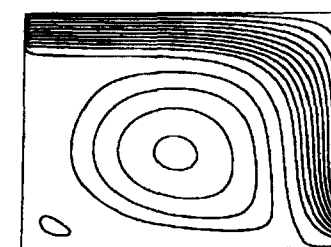
본 연구에서 개발한 컴퓨터 프로그램에 대한 검증의 두 번째 문제로는 문헌에 나타난 Stamou의 Fig. 2를 대상으로 수행하였으며 이 결과를 같은 일차침전조에 대해 수행된 실험 및 수치 해석 결과와 비교하였다. Fig. 5는 Stamou 등(1989)이 수행한 수치 해석 및 실험 결과와 본 연구에서 행한 수치 해석 결과를 상호 비교하여 나타낸 것이다. 이들 그림은 구체적으로 수평 방향의 위치 $x=3$,



(a) At top



(b) At middle



(c) At bottom

Fig. 4. Streamline Distribution according to the Location of Exit by This Prediction

9, 15, 21, 27m에서 수평 방향 속도 u 에 대한 연직분포를 보여준다. 검은 원으로 나타낸 실험치와 실선으로 나타낸 Stamou 등(1989)의 계산치 그리고 점선으로 나타낸 본 연구에서 사용한 standard $k-\epsilon$ 모델과 RNG $k-\epsilon$ 모델의 계산치는 어느 정도 차이가 있음을 보이지만 정성적 경향은 잘 일치하고 있고 계산치 서로간의 비교는 매우 유사한 양상을 보이고 있다. 실험치와 계산치는 일정한 차이를 나타내고 있는데 이는 3차원 유동에 대한 이차원 近似(approximation), 모델 및 수치 해석상의 정확도, 실험 데이터의 부정확 등의 문제를 거론할 수 있다. 본 연구에서 수행한 표준 $k-\epsilon$ 과

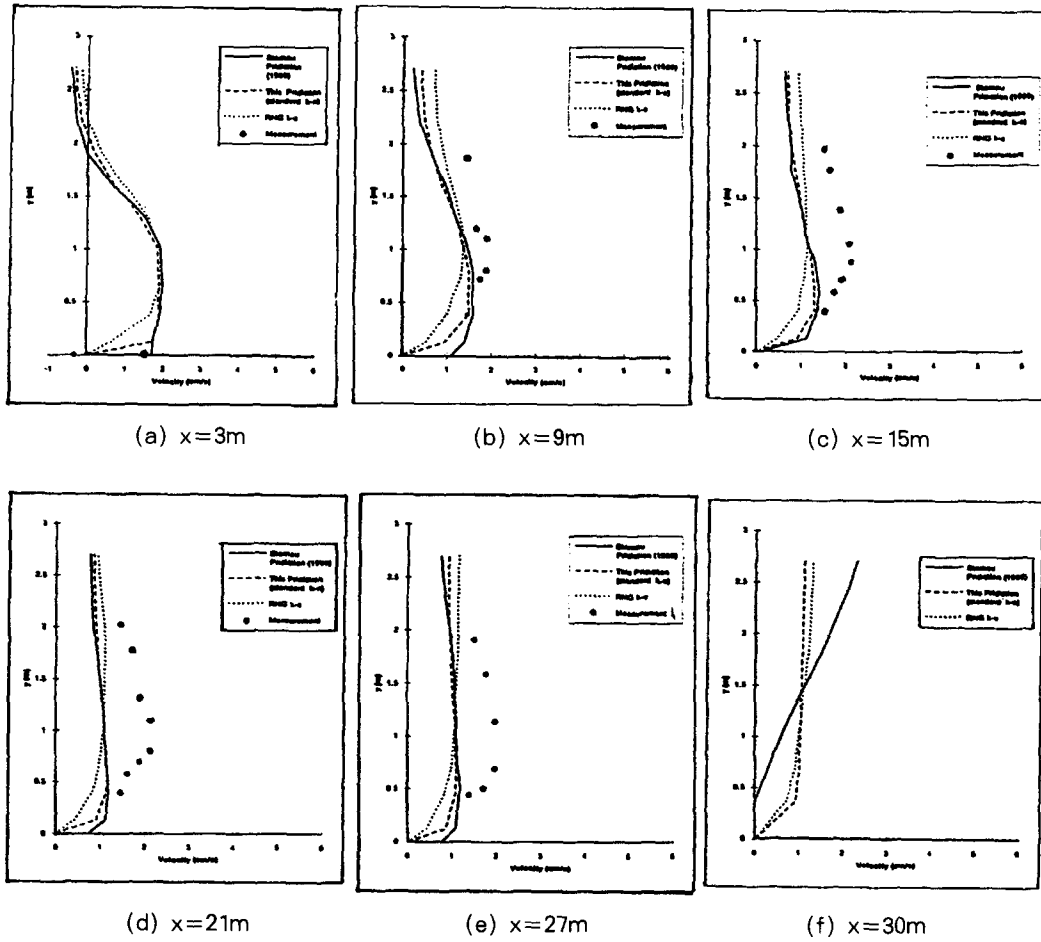


Fig. 5. Comparison between This Calculation(standard $k-\epsilon$ Model) and Predicted (RNG $k-\epsilon$ Model) and Experimental Data by Stamou et al. (1989)

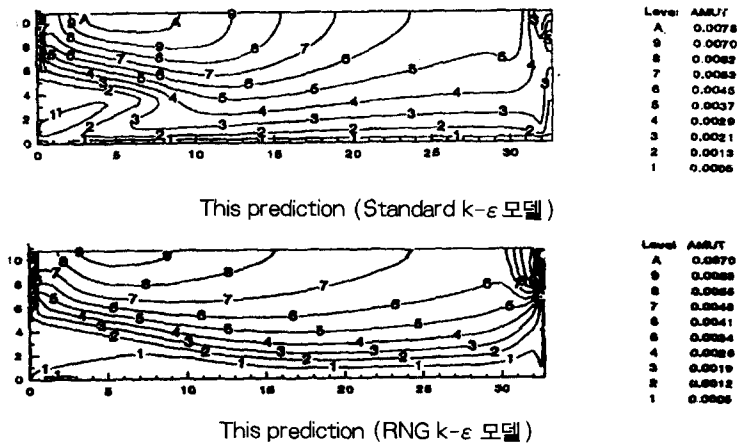


Fig. 6. Turbulent Viscosity Contour Plots

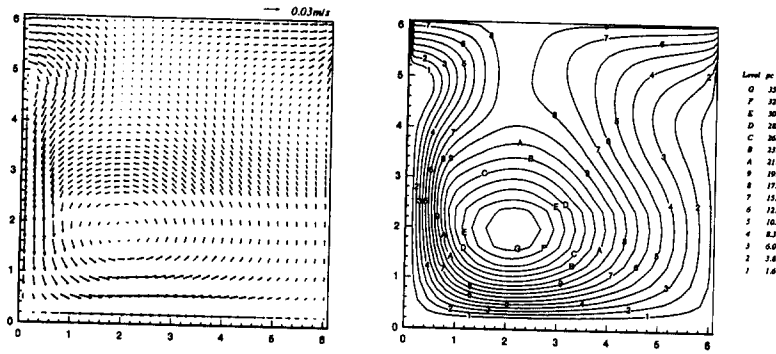


Fig. 7. Velocity Vector and Streamline Plots(Top = 4°C, Bottom = 0°C, $U_{in} = 1.8$ cm/sec)

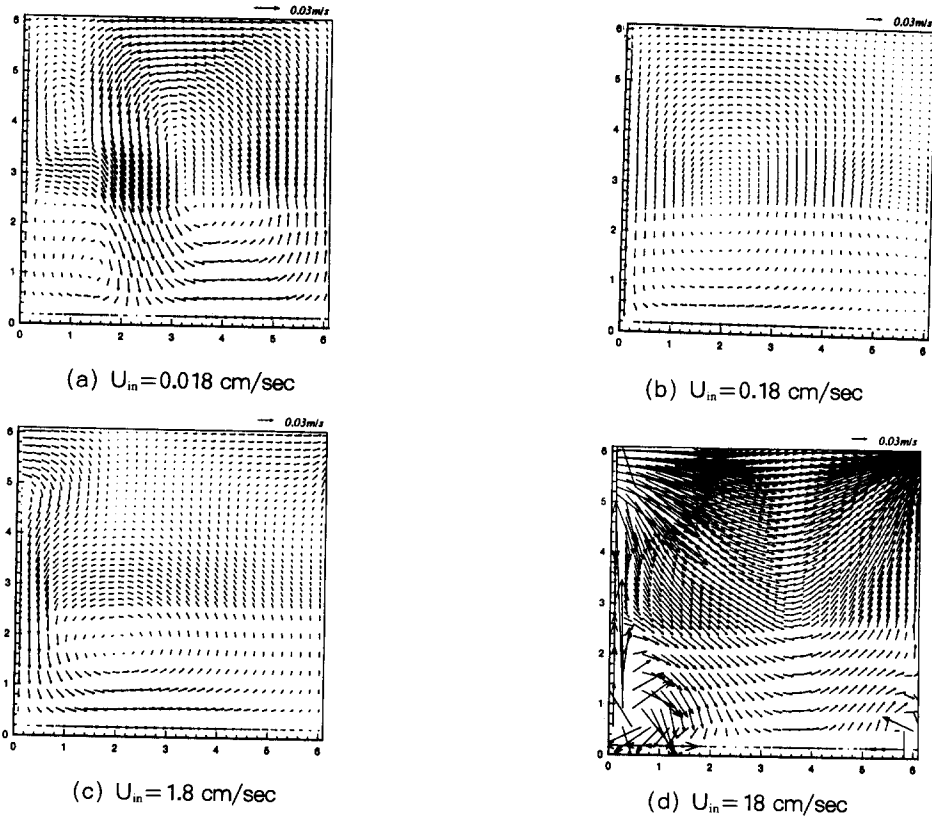


Fig. 8. Velocity Vector Plots according to Inlet Velocity(Top = 4°C, Bottom = 0°C)

RNG $k-\epsilon$ 은 가시적으로 차이를 나타내고 있지 않는데 이는 본 일차 침전 조의 유동 특성이 강한 순환이나 유동 박리 현상이 없는 'plug' 형태이기 때문으로 판단된다.

Fig. 6에 $\nu/(U_{in}H)$ 인 무차원 난류동점성계수에

대한 표준 $k-\epsilon$ 과 RNG $k-\epsilon$ 에 의한 수치 해석 결과를 나타내었다. 그림에서 나타낸 바와 같이 난류동점성계수의 값은 최대 0.08 크기로 물의 역학 점성 계수 8.55×10^{-4} N·s/m²에 비해 100 배정도 큰 값을 나타내고 있다. 난류점성 값은 입구에서의

난류강도 소산율, 격자수 등에 따라 같은 운동량 해석 알고리즘을 사용할 경우에도 차이가 많이 나타나는 것으로 알려져 있다. 본 논문에는 나타내지 않았지만 Stamou의 계산 값은 일차침전조 앞부분에서 그 분포 경향이 일치하나 크기가 2~3배정도 크게 예측되었다.

위에서 제시한 바와 같이 수치 해석 결과는 다른 문헌 자료와 잘 비교되어 개발한 컴퓨터 프로그램의 성능을 검증할 수 있었다. 개발한 프로그램에 대한 응용으로서 두 개의 수체유동 문제를 선택하였다.

첫째는 깊이 6.1m×길이 6.1m의 연직 정사각형 호소 유동이고 두 번째 문제는 깊이 20m×길이 200m의 연직 장방형 수체에 대한 유동 해석이다. 첫 번째 정사각형 호소에 대한 수치 해석은 유입수의 온도와 호소 바닥의 온도가 다른 경우로서 두 온도 차이, 유입수의 속도 그리고 수조의 종횡 비를 변화시켜 가며 호소 내의 유동 특성 파악을 위한 수치 해석 시도하였다. Fig. 7-10은 이에 대한 수치 해석 결과를 나타내는 것으로서 첫 번째 Fig. 7에 나타낸 결과는 유입수의 밀도가 수용 수역의 밀도보다 큰 경우로서 유입 속도 1.8cm/s이며 유입수의 온도가 4℃이고 호소 바닥의 온도가 0℃인 경우에 대한 정상 상태의 유동이다. 예측한 바대로 유입수의 밀도가 호소 수체의 밀도에 비해 크기 때문에 유입된 후 초기 관성에 의해 일정 거리를 수평 방향으로 진행하였으나 아래로 침강하는 양상을 뚜렷이 나타내고 있다.

유입 속도에 의한 관성 효과와 밀도 차이에 의한 침강의 상대적인 영향을 검토하기 위해 Fig. 8에는 Fig. 7과 같은 온도 조건에 대해 유입 속도가 0.018, 0.18, 1.8, 18cm/s로 변화시킨 결과를 나타내었다. 그림에 나타내었듯이 유입 속도가 증가함에 따라 입구에서 수평 방향으로 침강되는 위치가 증가함이 가시적으로 나타나고 있다.

Fig. 9에서는 유입 속도를 1.8cm/s로 고정시킨 경우에 대해 유입수와 수용 영역의 온도 차이에 따른 아래 3가지 경우에 대해 수치 해석을 시도하였다. 첫째 (a)의 경우는 온도차가 없는 경우로서 유입수의 온도가 20℃이고 호소 바닥의 온도가 20℃이며 (b)의 경우는 바닥의 온도는 0℃이고 유입수의 온도는 Fig. 7, 8의 경우와 같이 4℃로서 유

입수의 밀도가 높은 경우이다. (c)의 경우는 유입수의 밀도가 반대로 낮은 경우로서 유입수의 온도가 20℃이고 호소 바닥의 온도가 15℃의 경우에 대한 결과를 각각 나타낸다. 결과에서 알 수 있

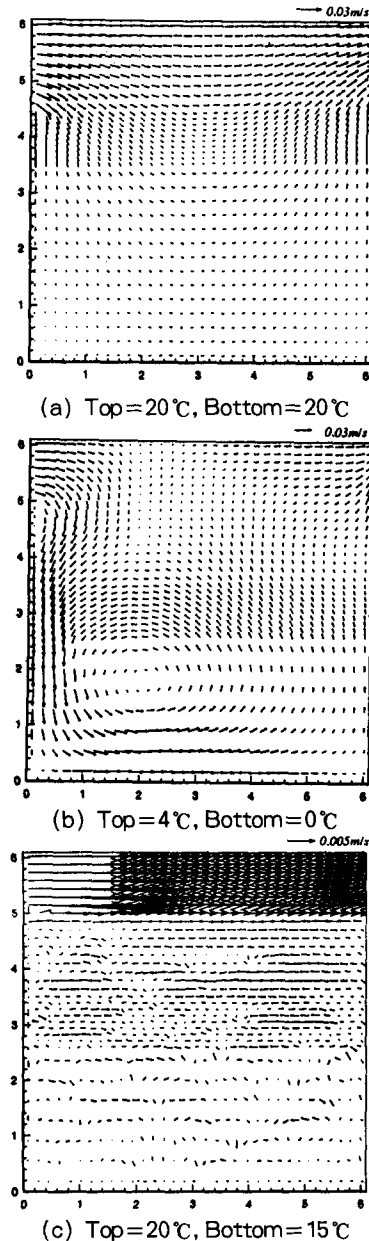


Fig. 9. Velocity Vector Plots according to Various Temperature Difference ($U_{in} = 1.8\text{cm/sec}$)

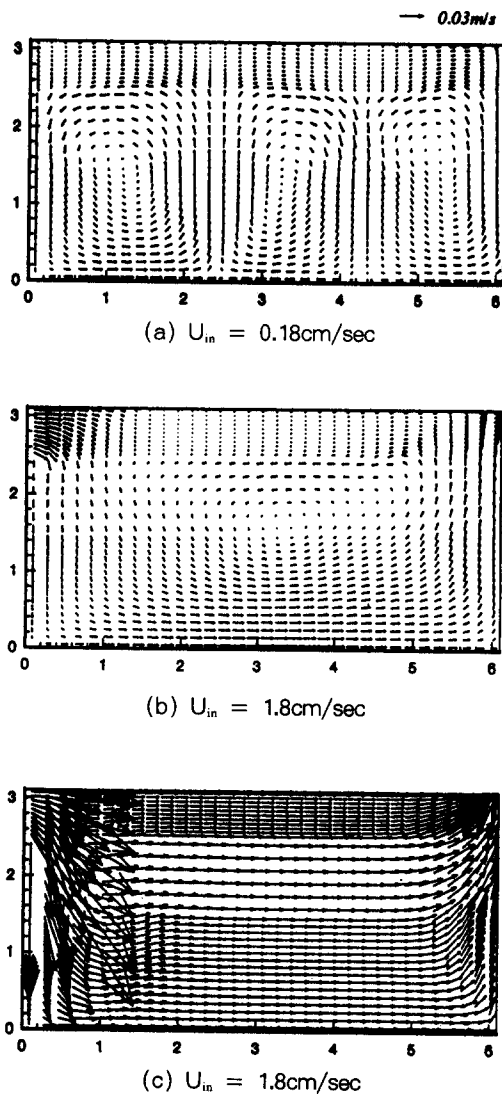


Fig. 10. Velocity Vector Plots according to Inlet Velocity (Top=4°C, Bottom=0°C)

듯이 온도차가 없는 (a)의 경우는 젯이 분출하여 입구에서 출구로 빠져나가는 젯 확산과 유사한 유동 양상을 보여주고 있었다. 한편 유입수의 밀도가 높은 (b)의 경우는 위에서 이미 언급한 바와 같이 수직 하강하는 양상을 나타내고 이와 반대로 유입수의 밀도가 낮아 안정 상태인 (c)의 경우는 주 유동이 입구와 출구 깊이 한도에서 주로 이루어지고 그 이하 수심에는 유동의 영향이 현저히 감소됨

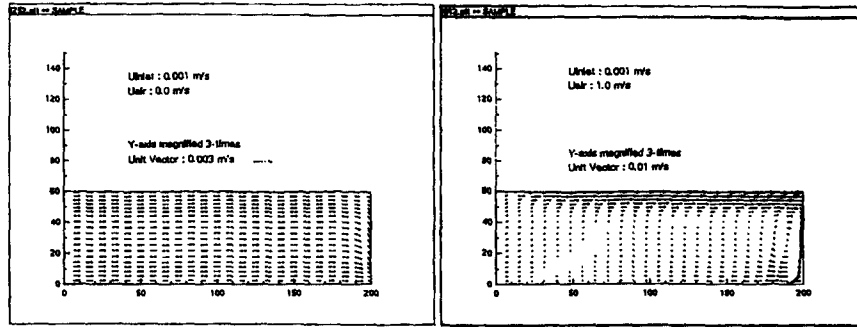
을 보여 주고 있다.

Fig. 10은 호소의 수심을 1/2로 작게 한 경우에 유입수의 온도 4°C, 호소 바닥의 온도 0°C로 유입수의 밀도가 큰 경우에 대해 유입 속도를 0.18, 1.8, 18cm/s로 변화시킨 결과를 나타내었다. Fig. 7의 경우와 같이 유입수의 밀도가 큰 관계로 수직으로 침강하는 양상을 나타내고 있었으나 중형 비의 변화로 인해 Fig. 7과 비교해서 와의 형성이나 형성된 모양 등 유동 양상에 가시적인 변화를 나타내고 있다.

Fig. 11은 수평 방향의 길이 200m, 깊이 20m의 연직 평면에 대한 수치 해석 결과를 나타낸다. 이 경우에 물은 왼쪽 입구에서 'plug' 형태로 깊이에 따라 일정한 속도로 주입되며(Fig. 11은 높이 방향으로 길이가 3배 확대되었음) 출구는 바닥에서 6 m까지로 가정했다.

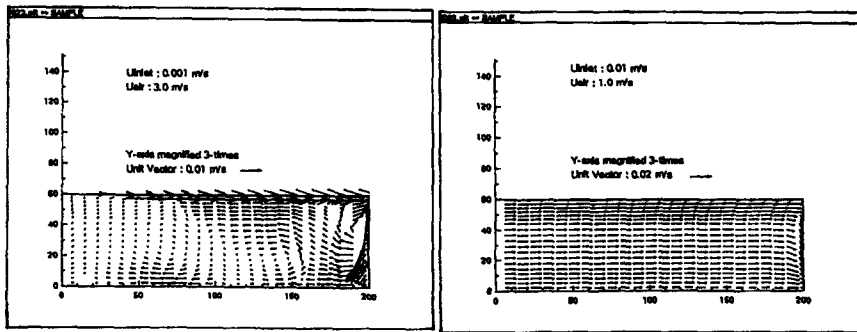
Fig. 11(a)의 계산 조건으로는 입구의 물의 속도를 0.001m/s, 난류 강도는 10%, 바람의 속도 u_{air} 는 霧을 가정했다. 그림에 나타난 계산 결과는 유동이 큰 변화 없이 층류 형태를 유지하며 출구 쪽을 향해 빠져나감을 보이고 있다.

Fig. 11의 (b)는 바람의 속도를 1m/s로 했을 때의 결과이다. 계산 결과는 바람에 의해 水面에 강한 유동이 형성되었으며 그로 인해 전체 계산 영역에 순환 유동이 형성되었다. 같은 그림의 (c)는 바람의 속도를 3m/s로 하였을 때의 결과를 나타내고 있다. 200m의 계산 영역의 유동은 크게 세 부분으로 나누어진 매우 복잡한 형상을 나타낸다. 구체적으로 이 결과를 수용하기에는 본 계산에서 사용한 격자계의 크기 및 반복 계산에 따른 수렴의 신뢰성에 대한 세밀한 점검이 선행되어야 한다. 그러나 본 결과에서 알 수 있는 것은 Fig. 11의 (b)와 같이 $U_{in} = 0.001m/s$ 로 주입 流速이 弱한 경우, 3m/s의 바람 또한 강한 영향을 미침을 알 수 있다. 물의 입구 속도를 크게 하여 물의 유동 강도가 증가한 경우의 수치 해석 결과를 제시하기 전에 본 토론에서 강조할 사항은 본 계산 결과가 定常 상태(steady-state)를 가정하고 한 계산이므로 실제 상황에서 이러한 정상 상태까지 도달하기 위한 과정에 대한 고려는 본 연구에서는 배제되었다는 점이다. 이와 같은 非定常 상태(unsteady-state)유



(a) $U_{in}=0.001\text{m/s}$, $U_{air}=0\text{m/s}$, $Y_{out}=10\text{m}$

(b) $U_{in}=0.001\text{m/s}$, $U_{air}=1\text{m/s}$, $Y_{out}=10\text{m}$



(c) $U_{in}=0.001\text{m/s}$, $U_{air}=3\text{m/s}$, $Y_{out}=19\text{m}$

(d) $U_{in}=0.01\text{m/s}$, $U_{air}=10\text{m/s}$, $Y_{out}=19\text{m}$

Fig. 11. Velocity Vector Plots of Fluid Flow(200m x 20m)

동 또한 흥미 있는 사안 중의 하나로 연구 대상이다.

Fig. 11(d)는 주입구의 속도를 0.001m/s에서 0.01m/s로 10배 증가시킨 경우의 결과로서 이때의 풍속은 1.0 m/s인 경우를 나타내었다. 수면에서 바람의 전단력에 의한 영향이 가시적으로 나타나고 있지 않았다. 본 논문에는 나타내지 않았지만 풍속이 10m/s까지 증가시켰으나 전체적인 흐름은 풍속이 1m/s인 경우와 큰 차이를 나타내고 있지 않다. 이러한 결과로부터 유추할 수 있는 것은 물의 속도가 증가한 것에 기인한 바람 영향의 상대적 약화로 풀이할 수 있다.

풍속과 물의 유속간의 상대적인 영향 관계는 좀더 정량적으로 연구되어야 할 사항이며 이와 더불어 풍속에 의한 전단력 관계로 추후 검토가 필요한 사항으로 남아 있다.

4. 결론 및 향후 연구

수체 열유동 특성 및 기작을 파악하기 위한 연구로서 2차원 난류 컴퓨터 프로그램을 검사 체적에 기초한 유한차분 방법을 이용하여 개발하였다. 운동량 방정식에 나타나는 압력과 속도의 연계는 SIMPLEC 알고리즘을 비선형 유동항에 대한 난류 모델로는 표준 k-ε과 RNG k-ε 모델을 각각 고려하였으며 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- (1) 2차원 연직 단면 난류 유동 해석을 위한 컴퓨터 프로그램을 개발하였으며 문헌에 나타난 일차침전조 및 응축열 방출 호소에서의 연구 결과와 성공적으로 비교 검증 하였다.
- (2) 열적 부력 효과에 의한 유동 특성 및 전도 현상을 유속, 유입수와 수용 영역의 온도 차

이, 호소의 종횡비 및 바람의 영향에 대해 수치 해석적으로 조사하였으며 이 결과로 크기가 확대된 호소의 유동 특성에 대한 이해와 예측을 가능케 하였다.

- (3) 취수로와 같은 개수로에서 바람의 영향은 물의 유동 강도와 상대적임을 나타냈으며 이에 대한 조직적인 변수 연구가 수행되었다.

이와 같은 연구 결과로서 개발한 컴퓨터 프로그램은 수체 유동 특성 규명을 위한 유용한 도구로서의 가능성을 보였다고 판단하며 기타 다른 시스템 적용에 의한 검증이 추후 과제로 남아 있다.

참 고 문 헌

- 권오현, 장동순, 서동일, 부성민 (1994). "수중폭기에 따른 수질 변화 예측 및 효과 규명에 관한 연구 (2차)." 연구보고서, 한국수자원공사.
- 나혜령, 이은주, 장동순, 서영태 (1995). "고기상 독성 오염 물질 대기 확산에 관한 수치 해석적 연구 : 화확종, 온도, 상대 속도." 한국산업안전공학회지, 제10권, 제3호, pp. 68-80.
- 박지영, 장동순, 이상일 (1994). "전산 유체역학을 이용한 일차침전조設計." '94 한국화학공학회 추계 학술대회, 전북대학교.
- 박지영 (1995). "熱流體 數値解析에 의한 환경/에너지 시스템 高度 設計 研究 : 스토커 소각로, 고효율 축상형 사이클론, 일차침전조," 석사학위논문, 충남대학교.
- 이상일, 김창원, 장동순 (1994). "난분해성 특성산업 폐수처리 기술 : Mg^{2+} 을 이용한 알카리성산업폐수 처리." 연구보고서, 환경처.
- 윤태훈, 김민규 (1994). "팔당호의 수치 순환모형." 대한토목학회논문집, 제14권, 제2호, pp. 317-324.
- 정태성, 이길성 (1994). "3차원 수치 모형에 의한 表面 溫排排 확산의 수치 해석." 대한토목학회 논문집, 제4권, 제6호, pp. 1385-1394.
- AbdelGawad, S.W., and McCorquodale, J.A. (1985). "Numerical simulation of rec-tangular settling tank." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 23, No. 2, pp. 85-100.
- Durst, F., and Wennerberg, D. (1991). *Numerical aspects of calculation of confined swirling flows with internal recirculation*. John Wiley & Sons.
- Farrell, G.J., and Stefan, H.G. (1988). "Mathematical modeling of plunging reservoir flows." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 26, No. 5, pp. 525-537.
- Jang, D.S., Jetli, R., and Acharya, S. (1986). "Comparison of PISO, SIMPLEC algorithms for the treat-of the pressure-velocity coupling in steady flow problem." *Numerical Heat Transfer*, Vol. 10, pp. 209-228.
- Jang, D.S., Park, J.Y., Lee, S.K., Na, H.R., and Song, W.Y. (1994). "Numerical simulation using Patankar's SIMPLE method on several energy and environmental problems : Clarifier, pulverized coal-fired combustor, axialvane type cyclone, atmospheric pollutant dispersion and lake turnover." '94 *Materials & Tech.*, BUCT-CNU, Beijing, Oct. 9-14.
- Oberkampf, W.L., and Crowe, L.I. (1976). "Numerical study of the velocity and temperature fields in a flow-through reservoir." *Journal of Heat Transfer*, Transactions of the ASME, pp. 353-359.
- Patankar, S.V. (1980). *Numerical heat transfer and fluid flow*. Hemisphere Publishing Corp., Washington.
- Perry, R.H., and Chilton, C.H. (1973). *Chemical engineers' handbook*, 5th ed., McGraw-Hill.
- Rodi, W. (1984). "Turbulence models and their application in hydraulics : A state of the art review." *Report*, Univ. of Karlsruhe, Germany.
- Rodi, W. (1987). "Examples of calculation methods for flow and mixing in stratified fluids." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 92, No. 5, pp. 5305-5328.
- Stamou, A.I., Adam, E.W., and Rodi, W. (1989). "Numerical modeling of flow and settling in primary rectangular clarifiers." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 5, No. 5, pp. 1097-1104.

Van Doormaal, J.P., and Raithby, G.D. (1984). "Enhancements of the simple method for predicting incompressible fluid flows." *Numerical Heat Transfer*, Vol. 7, pp. 147-163.

Viollet, P.L. (1987). "Observation and numerical modeling of density currents resulting from thermal transients in a nonrectilinear pipe." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 25, No. 2.

Wu, J. (1969). "An estimation of wind effect on dispersion in wide channels." *Water Resour. Research*, Vol. 5, No. 5, pp. 1097-1104.

Yakhot, R., and Orszag, S.A. (1986). "Renormalization group analysis of turbulence: I. Basic theory." *Journal Scientific Computing*, Vol. 1. No. 1, pp. 1-51.

기 호

a : 이산화 방정식의 계수
 C_L : 구름 보정 인자
 c_p : 유체의 비열 (specific heat), [J/kg·°C]
 c_μ : k-ε 난류 모델 상수
E : 기화 속도 [m/s]
 k : 단위 질량당 난류 운동에너지,
 $k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$, [J/kg]
 L_w : 기화 잠열 [kcal/kg]
R : 대기의 복사 반사도
 Re : Reynolds 수, $\frac{\rho v D}{\mu}$

S_ϕ : 단위 시간당, 단위체적당 종속변수의 생성항 (volumetric source per unit time)
T : 온도, [°C]
 T_0 : 호소의 평균 온도, $T_0 = \frac{1}{2}(T_B + T_T)$
 u : x 방향 속도 성분, [m/s]
 U_a : 공기의 속도, [m/s]
 v : y 방향 속도 성분, [m/s]
 Γ_ϕ : 확산 계수, [kg/m·s]
 ϵ : 난류운동에너지소산율 [J/kg·s]
 μ : 난류 점성 계수, $\mu = \frac{c_\mu \rho k^2}{\epsilon}$, [kg/m·s]
 ν : 동점성계수 (kinematic viscosity), [m²/s]
 ρ : 유체의 밀도, [kg/m³]
 ρ_a : 공기의 밀도, [kg/m³]
 ρ_w : 물의 밀도, [kg/m³]
 σ : Stefan-Boltzmann 상수,
 $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} [W/m^2 K^4]$

τ_s : 표면 전단력 [kg/m·s²]
 ϕ : 종속변수 (물리량/kg)
 ∇ : del ($\frac{\partial}{\partial x}i + \frac{\partial}{\partial y}j + \frac{\partial}{\partial z}k$)

하 첨 자

N : North
S : South
E : East
W : West

<접수: 19 년 월 일>