〈기술논문〉

다상모델을 이용한 탁도계 버블트랩 내부 유동장에 관한 고찰

이 계 복† · 김 영 도*

(2007년 3월 20일 접수, 2007년 10월 11일 심사완료)

A Study on the Flow Fields of Bubble Trap of Turbidimeter Using the Multiphase Model

Kye-Bock Lee and Young-Do Kim

Key Words: Multiphase Model(다상모델), Bubble(기포), Turbidity(탁도), Bubble Trap(버블트랩)

Abstract

The objectives of this study are to examine a bubble trap mechanism of the turbidimeter for low turbidity and to acquire it's technology concerned. Reynolds-Averaged Navier-Stokes equation and Laglangian discrete phase model were applied to analyze a flow field in the bubble trap. 3D hybrid grid system was used to simulate the flow field of bubble trap and numbers of it's node point are about 110,000. From the comparison between the standard k-ε model and the laminar state, it was found that the former estimated less the velocity in the outlet of bubble trap than the latter did, and that the former estimated more the shear stress at the wall of bubble trap than the latter did. And, it was possible to visualize the path of bubbles in the bubble trap and to copy the removal process of bubbles out bubble trap. Also, it was found that nearly most of bubbles in the bubble trap disappeared.

기호설명

ρ	: 유체 밀도 (fluid density)
R_e	: 상대 레이놀드 수(Reynolds Number)
υ_t	: 난류확산계수(turbulence Number)
ε	: 소산율(dissipation rate)
k	: 난류운동에너지(turbulence kinetic energy)
l	: 특성길이(Length Scale)
μ_t	: 난류점성(Turbulence Viscosity)
F_D	: 입자 저항력(Particle Force)
C_D	: 항력계수(Drag Coefficient)

† 책임저자, 회원, 충북대학교 기계공학부
E-mail : KbLee@Chungbuk.ac.kr
TEL : (043)261-3232 FAX : (043)263-2448
* 회원, 충북대학교 대학원 기계공학부

1. 서 론

최근 들어 국내의 음용수 수질에 관한 법규제의 강화로 저농도형의 탁도 제어기술이 필수적으로 요구되고 있으며 이를 위하여 신뢰성 있는 연속 탁도 측정기의 필요성이 대두되고 있다. 특히 서울시 등 정수장 현대화사업을 추진하고 있는 자자체 등에서 저탁도 감지 기능이 우수한 탁도계의 수요가 점점 커지고 있다. 일반적으로 탁도 현상이란 미립자에 빛이 부딪쳐서 생기는 광의 산란현상, 다시 말하면 원수내부의 각종 부유물에 의해서 빛이 산란 되는 현상이며 탁도란 그 산란 정도를 정량적으로 나타낸 값이다.[1~3] 탁도를 측정하기 위하여 원수 내부로 빛을 투과시킬 때 원수에 기포가 포함되어 있는 경우에는 그 기포는 투과되는 빛을 산란시켜 탁도의 정확한 측정을 방해하게 된다. 따라서 정확한 탁도를 측정

하기 위해서는 원수 내부에 포함되어 있는 기포를 완전히 제거하여 탁도 측정에 방해가 되는 요소를 없애는 작업이 선행되어야 한다.[4~6] 그러나 유동 내부에 잔존해 있는 기포를 제거하는 일이란 결코 쉬운 작업이 아니며 특히 지름이 매우 작은 미소기포의 경우에는 상대적으로 지름이 큰 기포에 비하여 기포의 부력이 경미하여 이를 효과적으로 제거하는데 상당한 어려움이 존재한다.

종래 유체내부에 기포나 입자, 액적을 포함한 유동에 관한 연구가 많이 진행되어 왔다. 자유전단층에서 부력을 가진 입자의 소산에 관하여 1993년 Tio, Lasheras 등의 분석적, 수치적 연구나 2001년 J. B. Joshi의 bubble column에 관한 연구[7] 등이 보고되었다. 그러나 이들 연구의 대부분은 다상유동 해석이 아닌 제한적인 연구에 국한됨으로서 유체와 유체내의 기포 등에 대한 정확한 해석에 한계가 있어왔다.

그러나 최근 들어 컴퓨터 처리 속도의 급격한 발전과 더불어 여러 다상모델이 정립됨에 따라서 수치적 시뮬레이션으로의 접근이 가능하고 있다.

따라서 본 연구에서는 최근 정부에서 제시된 탁도 기준인 "500 m^3/day이상을 처리하는 모든 정수장의 매월 측정된 시료수의 95 %이상이 0.3 NTU를 초과하지 않을 것"으로 엄격하게 강화됨에 따라 저농도 탁도계의 설치가 의무화됨으로서, 이들 탁도계의 국산화가 매우 시급한 실정임을 고려, 상용코드를 사용하여 버블트랩 내부 유동장을 가시화하고 버블트랩 내부의 기포의 거동과 소멸 메카니즘을 DPM(discrete phase model)모델을 통하여 해석하여 봄으로서 이론적 근거를 확인하고자 한다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식

본 연구에서는 3차원 비압축성 유동장을 해석하기 위해서 다음의 식으로 주어지는 3차원 비압축성 나비에스토크스 방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\delta_{ij}\right)\right]+\rho g_i+F_i \tag{2}$$

식 (1)은 연속방정식, 식 (2)는 Reynolds-Averaged Navier-Stokes 운동량 방정식이다. 위 식들을 유한체적법으로 이산화, 공간항에 대해서는 Upwind scheme, 시간 항에 대해서는 다단계 Runge-Kutta 법을 적용하였다. 본 수치해석에서 얻어진 수치해의 수렴여부를 판정하기 위하여 질량, 운동량, k와 ε값의 잔차를 10^{-5} 이하로 설정하여 이 조건을 만족했을 때를 해가 수렴한 것으로 판정하였다.

2.2 난류모델

본 연구에서 사용한 난류모델은 레이놀즈 응력항을 계산하기 위해서 일반적으로 사용되어지는 Boussinesq 가설을 도입한 대표적인 2 equation 모델인 표준 k-ε난류모델이며 더불어서 층류(laminar)상태에 대해서도 수치계산 하였다. 표준 k-ε난류모델은 난류운동에너지 k로부터 특성속도를, 점성소산율의 크기 ε을 이용하여 간접적으로 특성길이를 구하는 모델이다. k-ε난류모델에서 난류확산계수 ν_t는 식 (3)으로 부터 구해진다.[8]

$$\nu_t=\frac{C_\mu k^2}{\epsilon} \tag{3}$$

여기서, ε : 소산율(dissipation rate)

C_μ : 상수(constant)

k : 난류운동에너지(turbulence kinetic energy)

또한, 특성길이(length scale) l은 난류운동에너지의 소산률 ε을 이용하여 식 (4)에 의해 구한다.

$$l\approx\frac{k^{\frac{3}{2}}}{\epsilon} \tag{4}$$

여기서 난류운동에너지 k와 난류소산률 ε은 다음의 (5), (6)의 수송방정식을 이용하여 구한다.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}+G_k-\rho\epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon)=$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}\right)\frac{\partial \epsilon}{\partial x_i}+C_1\frac{\epsilon}{k}G_k+C_2\rho\frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

여기서, C_1, C_2 : 상수
$\sigma_k, \sigma_\epsilon$: 각각 k, ϵ의 난류 프란틀수
G_k : 난류운동에너지의 생성
μ_t : 난류점성

으로서 $C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\epsilon$는 실험으로 얻어지는 상수이이며 G_k항은 속도구배에 의해서 발생되는 부산물로서, 식 (7)과 같이 난류점성에 의존하게 된다.

$$G_k=\mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (7)$$

2.3 DPM모델(Discrete Phase Model)

액적이나 기포와 같은 이산상(discrete phase)의 입자 궤적은 Lagrangian reference frame이라고 기술된 입자에 관한 힘의 균형을 적분함으로서 예측할 수 있다. 이와 같은 힘의 균형은 입자에 작용하는 힘을 지닌 입자의 관성으로, 식 (8)과 같이 계산한다[9,10].

$$\frac{du_p}{dt}=F_D(u-u_p)+\frac{g_x(\rho_p-\rho)}{\rho_p}+F_x \quad (8)$$

여기서, F_D : 입자의 저항력
u : 유체의 상 속도(phase velocity)
u_p : 입자 속도
ρ : 유체의 밀도
ρ_p : 입자의 밀도
F_x : 추가 힘

또한, $F_D(u-u_p)$는 단위 입자질량당 항력을 나타내며, F_D는 식 (9)로 나타낸다.

$$F_D=\frac{18\mu}{\rho_p d_p^2}\frac{C_D Re}{24} \quad (9)$$

여기서, d_p : 입자의 직경
μ : 유체의 분자 점성
C_D : 항력계수
R_e : 상대 레이놀드 수

또한, 상대 레이놀드 수 R_e는 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$R_e\equiv\frac{\rho d_p|u_p-u|}{\mu} \quad (10)$$

항력계수 C_D는 식 (11)과 같다.

$$C_D=\frac{24}{Re}(1+b_1 Re^{b_2})+\frac{b_3 Re}{b_4+Re} \quad (11)$$

여기서,

$$b_1=\exp(2.3288-6.4581\phi+2.44\phi^2$$

$$b_2=0.0964+0.5565\phi$$

$$b_3=\exp(4.905-13.8944\phi+18.4222\phi^2-10.2599\phi^3$$

$$b_4=\exp(1.4681+12.2584\phi-20.7322\phi^2+15.8855\phi^3) \quad (12)$$

와 같이 haider와 Levenspiel[11]모델을 사용하였다. 또한, 형상계수 ϕ는 다음과 같다.

$$\phi=\frac{s}{S} \quad (13)$$

여기서, s는 입자와 동일한 체적을 지닌 구의 표면적을 나타내며, S는 입자의 실제표면적을 나타낸다.

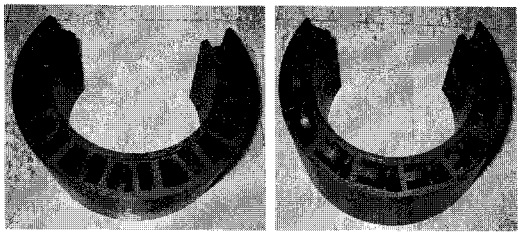
식 (8)에는 특수한 환경에서는 중요할 수 있는 입자 힘의 균형에 추가되는 힘 F_x를 고려하였다. 이 힘 F_x는 식 (14)와 같이 쓸 수 있다.

$$F_x=\frac{1}{2}\frac{\rho}{\rho_p}\frac{d}{dt}(\mu-\mu_p) \quad (14)$$

2.4 계산영역 및 격자

2.4.1 수치해석 모형

본 연구에서 수치해석에 사용한 모델은 H사의 탁도계 내부에 설치되어 있는 버블트랩으로,[12] 모델의 전체 형상은 Fig. 1에 나타나 있다. 이 모델은 H사에서 특허를 소유하고 있는 것으로 경로탐색(path finder)의 일환으로 이 모델을 본 연구의 기본 모델로 선정하여 수치해석을 수행, 작동원리에 대한 기초지식을 습득하고 유동장의 기본적인 데이터를 생성하여 이 데이터를 바탕으로



(a) Top view (b) Bottom view

Fig. 1 Pictures of bubble trap

하여 버블트랩 기술을 확보하고 더욱 향상된 버블트랩을 개발하고자 한다.

탁도를 측정하기 위한 측정대상 원수는 Fig. 1의 버블트랩을 지나게 되고 이 과정에서 유동 내부의 기포가 제거된다. 기포가 제거된 원수는 광원측정부로 이동하여 측정부에서 원수의 탁도가 정량적으로 측정된다.

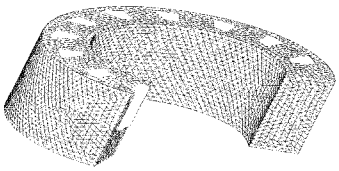
2.4.2 계산영역 및 격자시스템

버블트랩 내부의 유동장을 분석하기 위하여 버블트랩의 치수를 실측하여 전체 3차원 영역을 계산 영역으로 설정하였다. 계산 모형의 고체 구조물 형상을 고체(solid)영역으로 설정하였고 유동이 지나가는 모형 내부를 유체(fluid)영역으로 설정하였다. 본 연구에서는 버블트랩 벽면을 통한 열전달 효과를 무시하였으므로 고체영역은 계산과정에서 제외하고 모형의 내부 유동이 존재하는 부분만을 수치해석 하였다.

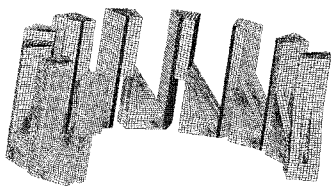
Fig. 2는 적용한 모델의 수치계산 격자를 나타낸 것이다. 수치계산에 사용한 격자 시스템은 3차원 격자계로서 고체영역은 약 3만개의 4면체 격자(tetrahedral mesh)를 생성하였으며 유체영역엔 약 8만개의 6면체 격자(hexahedral mesh)를 생성, 총 약 11만개의 격자를 생성하였다. 그리고 유체영역 내부에 유동이 가속되는 부분과 점성효과를 고려하여 벽면 근처에는 더 많은 격자를 생성토록 하였다.

2.5 경계조건

본 연구에서는 버블트랩의 3차원 해석영역에 대하여 정상 · 비정상 계산을 수행하였다. 정상 · 비정상 계산 모두 Segregated Model을 사용하였으며 비정상 계산시 시간 항은 2차의 Implicit Scheme을 사용하였다. 각 시간간격은 최초 0.001



(a) Solid area grid



(b) Fluid area grid

Fig. 2 Geometry of computational grid

로 두고 계산을 하여 해의 안정성을 확보한 후 다시 0.1까지 증가시켜 120초까지 계산하였으며 각 시간간격 당 최대 반복계산 횟수는 50으로 하였다. 그리고 고려되는 유속 범위에 따라 저속의 층류 영역이나 국부적으로 유동이 가속되는 영역 등에 발생할 가능성이 있는 난류성분을 적절하게 모사하기 위하여 표준 k-ε난류모델과 더불어 층류상태의 해석결과를 비교 분석하였다.

Fig. 3은 수치계산 모형에 사용한 경계조건을 나타낸 것이다. 모형의 입구에는 일정유량을 가정하여 mass flow rate inlet 조건을 설정, 시뮬레이션시에 적용된 유체 질량유량은 0.1~2.5 kg/sec, 기포의 질량유량은 연속상의 유체 질량유량의 10% 그리고 기포의 속도는 x방향 -0.9 m/sec, y방향 2.0 m/sec, z방향 0.0013 m/sec로 하여 해석하였다. 유입시 유체의 온도는 20 ℃로 가정하였으며 출구에는 pressure outlet 조건으로 대기압의 자유표면 경계로 가정하였다. 또한 모든 단면에 대하여 단열 및 No Slip조건과 벽면 점성영역의 계산에서는 계산 격자를 많이 필요로 하지 않는 Standard Wall Function을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 정상상태(Steady state) 해석

Fig. 4는 버블트랩 입구에서의 질량유량이 0.6 kg/s 일 경우 버블트랩 내부의 정압분포를 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 버블트랩 내부의 정

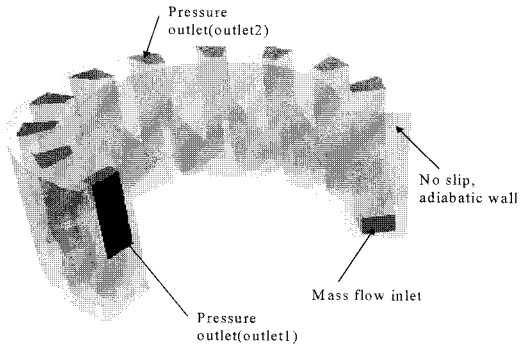


Fig. 3 Boundary conditions of computational domain

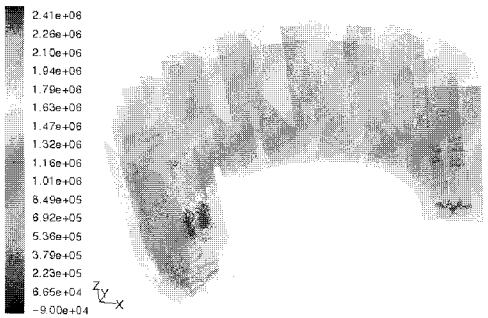


Fig. 4 Static pressure contour of bubble trap inside

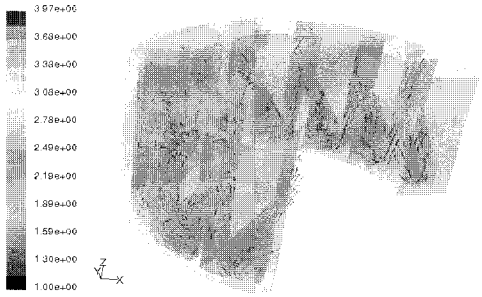


Fig. 5 Velocity vector of bubble trap inside ($\dot{m}$=0.1 kg/s)

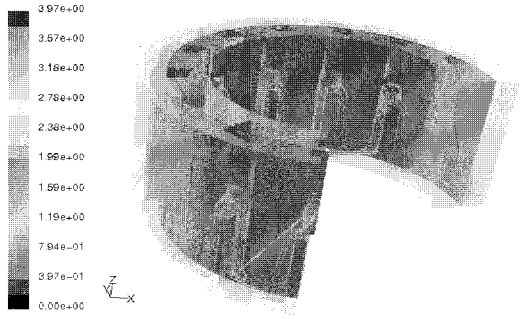


Fig. 6 Velocity contour at a certain area of bubble trap inside($\dot{m}$=0.1 kg/s)

압분포는 출구쪽으로 갈수록 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 버블트랩 유로 형상이 점차적으로 면적이 축소되는 덕트의 주기적인 반복형으로 되어 있으므로 버블트랩 내부를 지나는 유동은 점차적으로 가속되어 이의 영향으로 전체적인 정압의 강하가 발생하게 된 것으로 사료된다.

Fig. 5는 유입질량유량이 0.1 kg/s 일 경우의 버블트랩 내부의 속도벡터를 나타낸 것이다. 유동이 입구에서 유입되어 점차적으로 좁아지는 삼각형 형태의 유로를 통하여 위쪽으로 상승하여 수직 기둥 형태의 유로로 유입되고 이 유동은 수직 기둥 유로의 중간부분에서 아래로 하강, 다시 삼각형 형태의 유로로 유입되는 일련의 유동형태가 잘 나타나 있다. 그림으로부터 유동의 유속이 삼각형 형태의 유로 출구부분에서 가장 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 삼각형 형태의 유로 단면적이 점차적으로 감소함에 따라서 유동이 상승하면서 가속되는 까닭이다. 유동의 가속정도는 질량유량이 0.1 kg/s 일 경우를 고려하면 개략적으로 약 3배 정도의 속도 증가를 보이고 있다.

Fig. 6은 반경방향의 임의단면을 설정하여 그 단면에서의 등속도 선도를 나타낸 것이다. 역시 마찬가지로 유동이 국부적으로 그리고 주기적으로 가속되는 양상을 잘 알 수 있다.

Fig. 7은 정상상태에서 DPM 모델을 이용하여 유동장 내에 기포를 생성, 이 기포의 경로선을 그린 것으로 수직기둥 형태의 유로에 각각 번호를 붙여 나타내었다. 이후 이 번호는 동일하게 적용된다. 앞서 언급했듯이 유동장 내부에 가정한 기포의 체적분율은 약 5 %~10 % 정도이며 크기분포는 Rosin-Rammler의 액적분포함수를 사용하여 미세기포의 분포는 1~200 ㎛임을 고려하여, 초기설정 값으로 최대지름을 200 ㎛, 평균지름은 150 ㎛로 가정하여 설정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 최초 원수와 함께 버블트랩 내부로 유입된 기포는 수직기둥형 유로로 유입되면서 outlet 2를 통하여 대기로 방출되어 5번째 수직기둥형 유로에서는 거의 제거되어 이후의 유동장에는 나타나지 않고 있음을 알 수 있다.

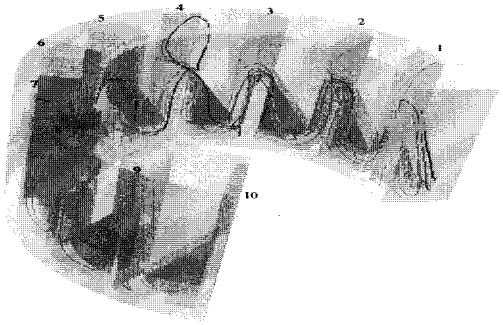


Fig. 7 Bubble pathline of bubble trap inside

유동 내부에 존재하고 있는 기포는 유동과 함께 버블트랩 내부로 유입되어 유로 단면적이 좁아지는 삼각형 형태의 유로 출구에서 가속되는 유동으로 인해 발생한 국부적인 압력 저하의 영향으로 유동 내부에서 유동 표면으로 상승한다. 이렇게 유동 표면으로 이동한 기포는 대기에 노출되어 파괴되어 소멸되어진다. 이들 과정의 주기적인 반복을 통하여 수직기둥형 유로의 상반부를 통하여 기포가 외부로 방출되게 된다.

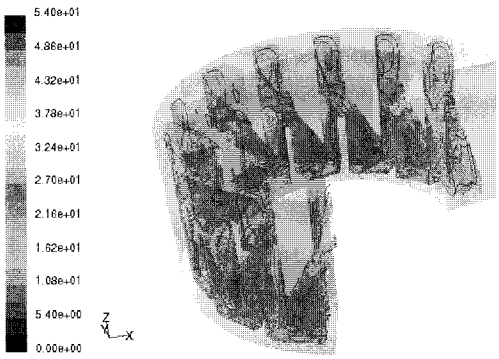
Table 1은 입구에 유입된 기포의 개수가 100개 일 경우 Fig. 7에 표시한 각 위치를 통과하는 기포의 개수를 나타낸 것이다. 유동내에 포함되어 있는 기포의 90 %정도는 6번 위치를 통과할 때 제거되어 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 표준 k-ε난류모델과 층류상태에서 벽면 전단 응력 값의 분포를 나타낸 전단 응력 선도이다. 벽면 전단응력의 피크값은 유동이 가속되는 삼각형 형태의 유로 출구에서 나타나고 있으며 표준 k-ε난류모델이 층류상태의 경우에 비해 벽면 전단응력을 4배정도 더 크게 예측하고 있다.

Table 2는 수치계산에 사용한 난류모델이 유동장에 미치는 영향을 정량적으로 알아보기 위하여 표준 k-ε 난류모델과 층류상태 각각의 경우에 대해서 입구와 출구에서의 속도를 비교하여 나타내었다. 결과로부터 질량유량이 0.5 kg/s인경우를 살펴보면 층류상태의 출구속도 해석결과는 6.658 m/s이나 표준 k-ε모델의 경우는 5.43 m/s로 층류상태에서 출구속도를 더 크게 예측하고 있다. 다른 질량 유량 값에 대해서도 전반적으로 층류상태가 표준 k-ε난류모델보다 출구 속도를 더 크게 예측하고 있는 것을 알 수 있다.

Table 1 Numbers of bubbles by position

position	Inlet	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. of bubble	100	70	50	42	34	12	8	5	3	2	1



(a) Wall shear stress (k-ε turbulence model)

(b) Wall shear stress (laminar state)

Fig. 8 Distributions of wall shear stress(Pa)

Table 2 Comparison k-ε turbulence model with laminar state

mass flow rate (kg/s)	k-ε turbulent model		laminar state	
	velocity(m/s)		velocity(m/s)	
	inlet	outlet	inlet	outlet
0.1	0.312	1.08	0.312	1.323
0.5	1.56	5.43	1.56	6.658
1.0	3.12	10.95	3.12	13.3

3.2 비정상상태(Unsteady state) 해석

지금까지는 유동이 정상상태일 때의 해석결과에 대해서 살펴보았다. 그러나 실제에서의 유동

은 시간에 따라 변화하는 비정상 유동이며 유동 내부의 기포가 그리는 궤적이나 분포양상 역시 비정상성을 가지기 때문에 본 연구에서는 버블트랩 유동장의 비정상 해석을 통하여 좀 더 많은 데이터를 얻고자 하였다.

비정상 흐름에서의 기포의 흐름을 분석하기 위해 질량유량을 0.1 kg/s을 조건으로 버블트랩 내부에 유동을 완전히 형성시킨 후, 계산 시작 후 5초 후부터 2초간 기포를 주입하면서 기포의 거동을 확인하였다. 기포의 초기 속도는 최초 유동의 유입속도와 동일하게 하였다.

Fig. 9는 버블트랩 내부로 유동이' 유입된 후 7초가 지났을 때의 유동장을 나타내고 있다. 연속상인 물의 속도벡터와 이산상인 기포의 분포위치를 동시에 나타낸 것으로 정상상태의 해석과 마찬가지로 유동이 가속되어 유입되는 수직기둥 형태의 유로에서 유동내의 기포가 빠져나와 상승하고 있는 것을 명확히 확인 할 수 있다.

Fig. 10은 버블트랩 유동장 내에 기포의 거동을 확인하기 위해서 기포 주입 후부터 기포가 완전히 제거되기까지의 기포분포 위치를 시간에 따라서 나타낸 것이다. Fig. 10(a)는 기포 주입 후 0.2초가 지났을 때의 기포분포를 나타내고 있다. 두 번째의 수직기둥형 유로 상반부로 버블트랩 입구에서 주입된 기포의 일부가 빠져나가고 있음을 알 수 있다. Fig. 10(a)~(b) 까지는 기포를 주입하고 있으므로 기포의 개수가 계속 증가하고 있다. 그러나 기포가 주입되고 있는 상황에서도 수직기둥 형태의 유로 상반부로 기포가 이동하여제거되고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 10(c)는 기포주입을 멈춘 후 1초가 지난 후의 기포분포를 나타낸 것이다. 기포의 개수가 3541개에서 2192개로 감소되어 있으며 버블트랩 내부의 기포분포위치를 확인해 보면 대부분의 기포들이 수직기둥 형태의 유로 상반부로 이동

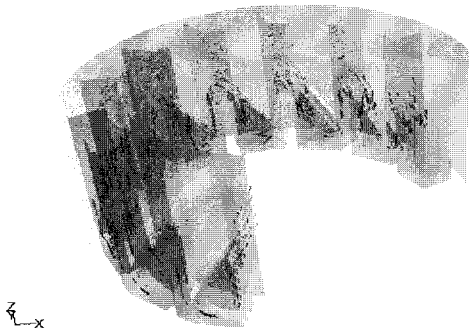
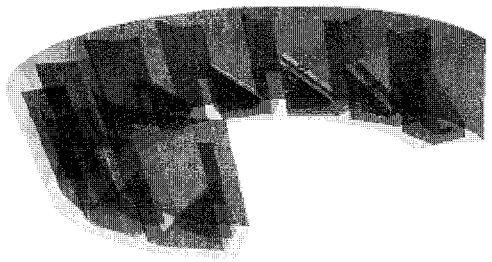
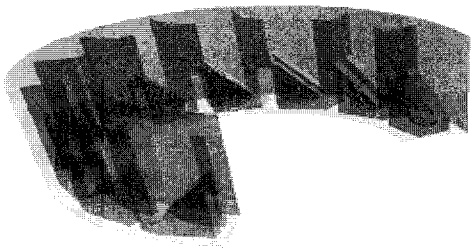


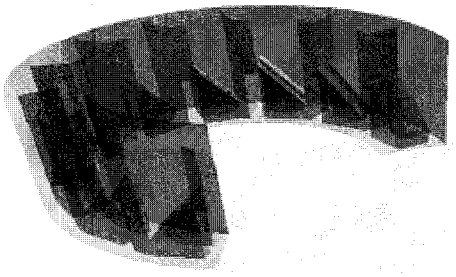
Fig. 9 Velocity vector and bubble location of bubble trap inside



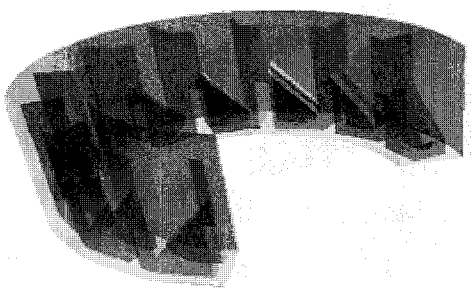
(a) Bubble location(t=5.2s, number : 1037)



(b) Bubble location(t=7.0s, number : 3541)



(c) Bubble location(t=8.0s, number : 2192)



(d) Bubble location(t=11.0s, number : 221)

Fig. 10 Location and numbers of bubbles by time

해 있음을 알 수 있다. 시간이 더욱 증가하여 Fig. 10(d)의 11초인 경우를 살펴보면 기포의 개수가 221개로 감소되었으며 이후 12초의 경우엔 전체 기포 개수 3541의 약 1.7 % 정도만이 남아 있음을 확인 할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 버블트랩 내부의 유동장에 대한 정상 및 비정상상태에서 해석을 실시한 결과는 다음과 같다.

(1) 버블트랩 내부의 정압은 유입부에서 유출부로 갈수록 점차적으로 강하한다는 것을 알았다. 이는 버블트랩 내부의 유로형상이 삼각형 형태의 축소형 덕트와 수직기둥형 덕트가 조합되어 이루어져 있기 때문에 유로 단면적이 감소하는 부분에서 유동의 속도가 증가됨에 따라서 국부적인 압력강하가 발생하였기 때문으로 생각된다.

(2) 버블트랩 내부의 유동장의 속도 예측에 있어서는 표준 k-ε난류모델이 층류상태에 비하여 출구 속도를 과소평가 하였으며, 벽면 전단응력 선도의 예측에 있어서는 층류상태가 표준 k-ε난류모델에 비하여 벽면 전단응력을 과소평가 하였다.

(3) 버블트랩 내부의 유동장에서 시간의 변화에 따른 기포가 그리는 궤적을 가시화 하여 모사하므로써 기포가 유동장 밖으로 이탈하여 거의 대부분이 제거되는 과정을 확인할 수 있었다.

결론적으로 저농도 탁도의 정확한 측정을 위해 측정대상 원수가 포함하고 있는 기포의 효율적 제거과정을 이해 할 수 있었으며, 향후 시급히 개발이 요구되고 있는 저농도형 탁도계의 국산화를 위한 자체 설계기술을 확보하는데 귀중한 자료로 활용하고자 한다.

참고문헌

(1) EPA, 1999, "EPA Guidance Manual Turbidity provisions-Basic turbidimeter Design and Concepts", *U.S. Environmental Protection Agency*, pp. 11-1~11-12.

(2) HACH, 1999, "Turbidimeter Guidline", *HACH Com. manual.*

(3) International Organization for Standards(ISO), 1990, "International Standard ISO 7027 - Water Quality-Determination or Turbidity", *ISO.*

(4) Vincent S, Hart. and Chris E, Johnson., 1992, "An Analysis of Low-Level Turbidity Measurements," *Journal AWWA, Management and Operations*, pp. 40~45.

(5) YOUNG Xiaolin, 2000, "The Study of Low Range Turbidity Sensor," *International Conference on Sensors and Control Techniques*, pp. 296~299.

(6) Mike Sadar, 1998, "Turbidity Standards," *Hach company, Technical Information Series- Booklet* No. 12, pp. 7045~7057.

(7) Joshi, J., B., 2001, "Computational Flow Modeling and Design of Bubble Column Reactors," *chemical Engineering science*, Vol. 56, pp. 5893~5933.

(8) VERSTEEG, H., K. & Malalasekera, W., 1999, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics-The Finite Volume Method," *LONGMAN Group Ltd.* pp. 41~84.

(9) Fluent, 2001, "User's Guide Volume 4 - Discrete Phase Model," *Fluent Inc.*, pp. 19-1~19-8.

(10) Choi, Choeng Ryul "Flow Characteristic with Inflow-Duct Types in the Reactor of an Integrated Adsorption/Catalysis Process with Bag Filters", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 31, No. 5, pp. 425~427.

(11) Haider and Levenspiel, O., 1989, "Drag Coefficient and Termianl Velocity of Spherical and Nonspherical Particles", *Power Technology*, Vol. 58, pp. 63~70.

(12) Michael, J. Sadar, 1998, "Turbidity Science", *Hach company, Technical Information Series-Booklet* No. 11, pp. 24~25.