

버블 플룸을 이용한 탈성층의 평가: 차원해석 및 설계방법론의 제시

A Study on Destratification System Using Bubble Plume: Dimensional Analysis and Design Methodology

김성훈 · 김재윤 · 박희경*

Kim, Sung-Hoon · Kim, Jae-Yun · Park, Heekyung*

한국과학기술원 건설 및 환경공학과

(2005년 11월 4일 논문 접수; 2005년 12월 13일 최종 수정논문 채택)

Abstract

In this study, we derived a new non-dimensional variable including bubble size and air diffusing area by Buckingham's theorem for making a practical correlation with experimental results. Firstly, we drew a relationship between a non-dimensional variable, NH/u_s , which has a form of Froude number and destratification efficiency with a simple theoretical consideration. Then we derived two non-dimensional variables by Buckingham's π -theorem and equating them with a form of Fr_N for making single parameter to correlate overall destratification efficiency. As the result, the single parameter Be number shows a correlations with destratification efficiencies obtained from laboratory and pilot experiments. Also, for the practical applications, we conducted multiple regression analysis using Be and tank area to make predictive equations about destratification efficiency. The result also shows a successful correlations with destratification efficiency ($R^2 > 0.9$, $p < 0.001$). Using this equation, we proposed a new design methodology with respect to bubble diffusing area.

Key words: Bubble plume, Destratification efficiency, stratification Froude number (Fr_N), Bubble efficiency number (Be)

주제어: 버블 플룸, 탈성층 효율, 성층 프라우드수 (Fr_N), Be 수

1. 서 론

저수지의 성층화(thermal stratification)현상은 연직

방향으로의 열전달과 물질전달을 저해하여 심층부의 산소고갈로 인한 수질 악화 등의 많은 문제를 야기한다(Zic 등, 1992; Shladow, 1993). 저수지에서의 이와 같은 문제점들을 극복하기 위하여 도입된 이러한 수

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

중폭기 시스템의 설계 및 운영기준에 대한 연구는 국·내외적으로 지속적으로 이루어져 왔으나, 시스템 별로 사양이 다양하고 적용지역의 조건에 여러 가지 영향을 받는 등 기존의 설계방법들은 경험에 의존하는 경우가 많아, 실제 мем지역내 폭기설비의 최적화된 설계가 어려운 실정이다.

일반적인 저수지에서의 버블 플룸은 웨버수 (Weber number)가 1 이상인 비(非)자기보존적(non self-preservation) 특성을 나타내므로 간략화 하기 어렵다. 많은 연구들에 의해 버블 플룸의 거동 특성을 지배하는 무차원 수들은 현재까지도 새로운 연구들에 의해서 변형되고 수정되고 있다. 최근의 연구에서 Sahoo와 Luketina(2003)는 기존의 잘 알려진 P_N 과 M_H 를 새로이 변형한 형태의 무차원수를 제시한 바 있으며, Socolofsky와 Adams(2003, 2005)는 P_N 과 M_H 를 결합한 형태의 무차원 기포 슬립속도(U_N)를 제안하여 단일 지수화 하고자 하였다.

1990년대 중반 이전의 버블 플룸 관련 선행 연구들에서는 기포크기가 수리적으로 미치는 영향의 중요성에 대해서는 인정하고 있으면서도 부력 플럭스가 충분히 큰 경우에 기포크기의 영향은 상대적으로 무시할 수 있을 정도로 작다고 설명하고 있는 데에 그치는 경우가 많아 플룸 거동의 지배인자로서의 직접적인 기포크기 영향에 대한 고려가 다소 미흡하였다. 따라서 기포 크기와 관련된 저수지 탈성층의 설계인자들은 아직 확립되어 적용되지는 못하고 있는 실정이다. 최근에 들어서 많은 연구자들은 이전의 연구결과를 확장하여 탈성층과 연관된 기-액(gas-liquid) 시스템에서의 기포크기의 물리화학적 영향에 대한 연구를 수행하고 있다(Chen and Cardoso, 2000; Sato and Sato, 2001; Rensen and Roig, 2001; Sahoo and Luketina, 2003; 안 등, 2004; Sahoo and Luketina, 2005). 이들 중에서 Sato와 Sato(2001)는 기존의 무차원수들과는 다른 기포크기와 인트루전 깊이(intrusion depth: H_{im})를 고려한 $Q' = (QN^5)/(g^3)$, $d' = (dN^2)/(g)$, $H' = (HintN^2)/(g)$ 와 같은 무차원군을 도입하였으며, 용해성(CO₂), 비용해성 기체(air)를 사용한 실험실 규모 연구를 통해 이들관의 상관관계를 도출하고자 하였다. 안(2004)은 실험실 규모에서의 유동가시화 실험과 탈성층 효율평가를 통하여 수중폭기에 의한 탈성층시 기포크기가 수리적 거동에 매우 강한 영향

을 미친다는 사실을 밝혔다. 또한, 반응기의 기하학적 요소들을 고려한 연구들도 계속되고 있는데, 이 중 Wüest 등(1992)은 버블 플룸 해석에 top hat profile을 적용한 모델을 통하여 기포 크기와 산소 유입량, 초기 플룸 면적(initial plume area), Froude 수, 연행계수(entrainment coefficient, α) 등에 따르는 최대 플룸 상승 높이를 모델화 한 바 있으며, Freire 등(1992)은 두 개의 Gaussian 플룸 가정을 통해 플룸 간격과 Froude 수, Weber 수 등의 무차원 수에 따른 플룸의 거동을 평가하였다. 또한, Yum 등(2005), 박 등(2005)은 P_N 및 폭기장치의 간격영향에 따르는 효율을 평가하여 설계인자에 반영하고자 하였다.

이와 같은 많은 연구들에도 불구하고, 버블 플룸의 응용 분야가 많은 만큼 저수지 탈성층 분야에 직접 적용할 수 있는 연구는 한정되어 있는 실정이며, 따라서 실제 설계에 반영될 수 있는 버블 플룸 거동 및 탈성층 효율과 관련된 기하학적 인자들에 대한 평가는 다소 부족한 측면이 있다. 따라서, 본 연구에서는 수중폭기 설계·운영에 관하여 기포크기 및 산기면적을 포함하는 새로운 무차원 변수를 도출하고 실험실 규모 실험 및 파일럿 규모의 실험을 통해 적절한 관계식을 제시하며, 이의 설계인자로서 적용타당성을 평가하여 새로운 탈성층 설계 방안을 모색 하고자 한다.

2. 본 론

2.1. 탈성층 효율 평가방법에 대한 검토

버블 플룸의 탈성층 효율을 평가하기 위한 방법들은 여러 연구자들에 의해서 제시된바 있다. Schladow (1992)는 버블 플룸의 영향을 측정하는 지표로서 혼합 효율(mixing efficiency) E_{mix} 을 제시하였다. 이는 특정한 시간간격에 대한 효율을 나타내는 지표이다. 예를 들어 Schladow가 논문에서 적용한 하루간의 간격을 기준으로 할 때, E_{mix} 는 다음과 같이 표현된다.

$$E_{mix} = 8.64 \times 10^4 (PE_f - PE_i) / (PE_b - PE_i) \Delta t \quad (1)$$

여기서, PE는 수체 내의 위치에너지(첨자 i, f, b 는 각각 초기, 최종, 완전혼합(homogeneous)를 의미), Δt 는 폭기 운전시간 혹은 모델의 시간간격(model

time step)이 된다.

또한, 이에 대한 대안으로 Schladow는 같은 논문에서 공기 압축기(compressor)로부터 공기를 발생시키기 위해 필요한 일(work)을 분모로 하는 기계적 효율(mechanical efficiency)을 다음과 같이 정의하였다.

$$\eta_{\text{mech}} = (PE_f - PE_i) / W_{\text{iso}} \quad (2)$$

$$W_{\text{iso}} = 2.303 p_i Q_0 \Delta t \log(p_2/p_1) \quad (3)$$

여기서, p_1 과 p_2 는 각각 수표면에서와 폭기장치 위치에서의 압력을 의미한다. 윗 식은 Asaeda와 Imberger(1993)이 제시한 탈성층 효율 평가공식(식 4)와 비교하여 수체의 기준 밀도(reference density)만 같게 고려한다면 동일한 공식이 된다.

$$\eta = \frac{\Delta PE}{\Delta KE} = \frac{\Delta PE}{\bar{\rho} g Q_0 H_A \ln(1 + \frac{H}{H_A}) \Delta t} \quad (4)$$

본 연구의 경우, 폭기의 운전시간은 바닥층의 수체까지 혼합되는 시간을 적용하므로 식 (2) 또는 식 (4)를 사용하는 것이 적절하다. E_{mix} 를 적용하는 것은 동일한 성층조건에서는 평가지표로서의 역할을 할 수 있으나, 일반적으로 동일한 공기 유입유량에 대한 탈성층 효율은 시간이 지남에 따라 감소하는 특성을 고려하면 임의의 시간간격을 설정하는 것이 쉽지 않아 일반적인 탈성층 효율의 평가에는 적합하지 않다.

앞서 언급한 바와 같이, Kim 등(2005)은 성층강도에 비해 부력 플럭스가 크지 않은 버블 플룸인 경우 탈성층 효율은 부력보다는 버블 슬립속도와 성층강도, 수위의 관계에 보다 더 의존한다고 주장하였다.

Larson과 Jönsson(1996)은 제트 믹서(jet mixer)에서의 탈성층 평가를 통해 2단 성층에서 발달하는 중층의 밀도구배층(intermediate layer)의 두께(l)가 증가하는 점을 고려하여 중층의 온도가 동일하고 상하층간의 밀도의 평균과 같다는 가정 하에서 ΔPE 의 시간에 따르는 변화량을 다음과 같이 간략화 하였다.

$$\Delta PE / \Delta t = \frac{1}{4} \Delta \rho A g l \frac{dl}{dt} \quad (5)$$

여기서 A 는 조(tank)의 면적을 의미한다.

Zic 등(1992)과 Kim 등(2005)은 각기 약 1.44m와 4.5m 높이 수조에서의 온도구배에 의한 탈성층 실험을 통해 2단 성층구조에서의 버블 플룸에 따른 밀도 변화는 수온(thermocline)이 지속적으로 바닥층으로 감소하는 형태를 나타낸다고 했기 때문에 제트 믹서 실험과 같은 중층의 증가(growth)가 나타나지 않을 것이다. 그러므로 본 연구에서는 2단 성층에서의 상층부(epilimnion)의 높이 h_u 를 택하면 식 (5)를 다음의 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta KE / \Delta t \sim \Delta \rho g b_u A \frac{db_u}{dt} \quad (6)$$

다음으로 시간에 따른 ΔKE 변화는 식 (4)으로부터 도출될 수 있다. 일반적으로 버블 플룸에 의한 탈성층시 폭기 유량은 일정하게 고정되므로 식 (4)의 분모에서 시간항을 제외한 것과 같다. 여기서, 수두(head)관련 항은 수위에 따른 계수의 역할을 한다고 가정(v)하고, 공기의 유량 Q_B 으로부터 나타나는 부력 플럭스($B = Q_B g$)를 운동량 플럭스로 치환하기 위하여 플룸의 길이 스케일과($b = D/2$)과 속도 스케일(u_B)로 치환한 뒤 식 (5)와 식 (6)을 결합하면 다음의 식이 된다.

$$\frac{\Delta PE}{\Delta KE} \approx \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}} \frac{g b_u A}{\gamma \times \pi b^2 u_B^2} \frac{db_u}{dt} \quad (7)$$

또한, Schladow(1993)는 Bubble-Plume Model의 적용과 관련하여 속도 스케일 u_B 를 기포의 슬립속도와 운동량의 부력 전환비율(λ , bubble spreading ratio 또는 plume radius ratio)을 통하여 다음과 같이 정의하였다.

$$u_B = u_s (\lambda^2 + 1) \quad (8)$$

따라서, 식 (7)은 성층 프라우드 수(Fr_N)의 형태를 포함하는 다음의 식으로 나타낸다.

$$\frac{\Delta PE}{\Delta KE} \approx \frac{1}{Fr_N^2} \times \frac{A}{\gamma \pi (1 + \lambda^2)^2 b^2} \frac{db_u}{dt}$$

비록 db_u/dt 항이 시간에 따라 줄어드는 변수로 나타나지만, 위와 같은 간단한 고찰을 통해서 효율이 어

는 정도 성층 프라우드 수에 영향 받는 다는 사실을 고려할 수 있다.

2.2. 차원해석을 위한 가정 사항

앞서 살펴본 바와 같이 탈성층시 기포에 의해 유도되는 수체흐름의 영향을 규정짓는 인자는 매우 많으며, 모든 인자에 대한 실험을 실시하는 것은 어려움이 따르므로 적절한 고려 인자를 찾아내는 것이 중요하다. 잘 알려진 플룸 넘버(P_N)의 경우, 고려 인자들 N, H, Q, g 로 두어 $f(N, H, Q, g) = 0$ 의 관계로 나타낸 뒤 차원분석 함으로써 유도된다.

본 연구는 탈성층 관련 무차원변수를 유도함에 있어 플룸의 초기 길이 스케일($b = 2/D$)와 기포 크기를 고려하면서도 수중폭기의 적용범위 내에서 유도된 무차원변수와 탈성층 에너지 효율과의 직접적인 상관관계를 나타낼 수 있는 보다 간략한 관계식을 도출하는 것을 목적으로 하고 있다. 효율과 무차원 변수간의 상관성을 나타내기 위한 인자도출시 가정은 다음과 같다.

(a) 탈성층의 효율은 상간(相間: interphase) 운동량 전달에 의해 크게 영향받는다. 이 중 항력(drag force)만을 주된 고려대상으로 한다.

일반적으로 버블 플룸을 통한 탈성층의 효율은 플룸의 부력 플럭스와 기포에 의해 수체로 미치는 항력, 입자레이놀드 수와 관련된 후류(wake)의 크기, 그리고 플룸의 간격과 같은 기하학적 요소에 좌우된다.

물과 공기와 같이 비균등(inhomogeneous) 다상(多相: multiphase) 시스템에서 모멘텀의 전달은 상호간의 계면력(interfacial force)에 의해 크게 좌우된다. 식 (9)는 공기(β)의 작용에 의해 물(α)에 전달되는 모멘텀을 나타내고 있다.

$$M_\alpha = \sum_{\beta \neq \alpha} M_{\alpha\beta} \quad (9)$$

또한, 두 상 서로 간에 미치는 계면력은 크기가 같고 방향이 다르므로 순수한 계면력의 합계는 0이 된다.

$$M_{\alpha\beta} = -M_{\beta\alpha} \Rightarrow \sum_\alpha M_\alpha = 0 \quad (10)$$

이러한 상간 계면력은 다음과 같은 독립적인 물리

적 효과의 합으로 나타낼 수 있다.

$$M_{\alpha\beta} = M^{D_{\alpha\beta}} + M^{L_{\alpha\beta}} + M^{LUB_{\alpha\beta}} + M^{VM_{\alpha\beta}} + M^{TD_{\alpha\beta}} + M_S + \dots \quad (11)$$

위의 식은 각각, 항력, 양력(lift), 벽윤활력(wall lubrication force), 가상체적력(virtual mass force), 난류 분산력(turbulent dispersion force), 고체에 의해 추가되는 힘(solid pressure force)을 나타낸다. 본 연구와 같이 수 mm 크기의 기포를 상승시키는 경우에 있어 크게 관련되는 항은 항력과 난류분산력이 될 것이다. 본 논문에서는 항력항에 관련된 인자를 중심으로 고찰하고자 한다.

항력에 의한 운동량 전달만을 고려할 때, 식 (9)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$M_\alpha = c_{\alpha\beta}(u_\beta - u_\alpha) \quad (12)$$

여기서, u 는 각 상의 유속을 의미하며 $u_\beta - u_\alpha = u_s$ 로 바꾸어 쓸 수 있다. 계수 $c_{\alpha\beta}$ 는 여러 조건에서 잘 알려진 무차원 항력계수 C_D 와 연관되며, C_D 는 일반적으로 레이놀드 수의 함수가 된다. 입자를 구형으로 가정하였을 경우, $c_{\alpha\beta}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$c_{\alpha\beta} = \frac{3}{4} \frac{C_D}{d_b} \varepsilon_\beta \rho u_s \quad (13)$$

여기서, d_b 는 기포의 직경, ε 는 기포의 상체유량을 나타낸다. 이와 같은 고찰에서 기포직경과 기포의 슬립속도는 독립변수로서 차원해석에 별개로 포함되어야 한다고 말할 수 있다. 또한, 운동량 전달의 표현에 있어 무차원으로 표현되는 상체유량(volume fraction 또는 hold-up)의 중요성도 고려되어야 하는데, 이를 고려하기 위해서 본 연구에서는 플룸의 길이스케일에 대한 인자를 포함하도록 하였다.

(b) 고려 인자로서 공기와 물 사이의 표면장력과 점성력은 제외한다.

기포나 액적이 충분히 작은 입자 레이놀드 수를 가지는 흐름인 경우에는 항력계수는 잘 알려진 Schiller-Naumann 상관식 등을 직접적으로 이용할 수 있다. 즉, 기포가 구형(spherical) 고체입자와 같은 수리적

Table 1. Characteristics of the bubbles used in this study and in previous studies

Experiment	d_b (m) $\times 10^{-3}$	Re_p	Eötvös number	Bubble shape
McDougall (1978) ^a	1.25	252	0.222	Spherical
Leitch and Baines (1989) ^a	3.2	630	1.40	Ellipsoidal
Baines and Leitch (1992) ^a	4.2	1100	4.40	Ellipsoidal
Asaeda and Imberger (1993)	2, 4	420, 830 ^b	0.6, 2.2	-
Chen and Cardoso (2000) ^a	0.15	1.61	0.00308	Spherical
Sato and Sato (2000)	0.29, 0.43	7.3-18.4 ^b	0.012-0.025	Spherical
This work	0.73-3.1	152-646 ^b	0.1-1.31	Ellipsoidal

^a from Chen and Cardoso (2000)

^b velocity of the bubble was calculated using an equation given by West et al. (1992)

Table 2. Surface tension of water in contact with air at various water temperature

Water temperature (°C)	0	5	10	15	20	25	30
Surface tension (N/m)	0.0770	0.0763	0.0757	0.0748	0.0740	0.0732	0.0724

거동을 나타낸다는 뜻이다. 그러나 더 큰 Particle Reynolds number를 나타내는 흐름에서는 이러한 상관식이 잘 맞지 않게 되며, 표면장력이나 상체유량 (volume fraction or holdup) 등의 영향을 받게된다. 기존의 관련연구와 본 연구에서의 기포직경은 0.5 ~ 5mm 범위에 있어 Particle Reynolds number가 수백에서 천 이상으로 큰 범위에 있으며, 구형이나 타원형 (elliptic) 형상을 나타낸다(**Table 1**). 이러한 경우에 적절한 Ishii-Zuber 상관식(식 (14))이나 Grace의 상관식(식 (1))은 기포의 직경과 표면장력을 포함한다. 이러한 사실은 가정 (a)에서와 마찬가지로 기포크기의 중요성을 설명함과 동시에 표면장력과 점성력의 중요성을 지적하고 있다. 그럼에도 불구하고 물의 표면장력은 일반적인 성층화된 저수지의 온도조건 (5~30°C)에서 5% 내외의 변화를 나타내며(**Table 2**), 점성계수의 경우에도 계면 운동량 전달과의 상관성이 매우 낮으므로 본 연구에서는 고려하지 않는 것으로 가정하였다.

$$C_D = \frac{2}{3} Eo^{0.5} \text{ (Ishii-Zuber's correlation)} \quad (14)$$

여기서, Eo 는 기포의 형상과 관련되는 무차원 변수인 Eovtos 수를 의미한다.

$$Eo = \frac{g\Delta\rho d_b^2}{\sigma} \text{ (Eötvös number)} \quad (15)$$

$$C_D = \frac{4}{3} \frac{gd_b}{u_s^2} \frac{\Delta\rho}{\rho_a} \text{ (Grace's correlation)} \quad (16)$$

(c) 기포에 의해 유도되는 버블 플룸의 초기 효율이 전체 효율에 영향을 미친다.

기존의 많은 연구들에서 유입공기의 운동에너지에 대하여 수체의 위치에너지가 변환되는 초기의 탈성층 효율은 23%에 이르는 것으로 알려져 있다(Asaeda and Imberger, 1993). 실제로 이러한 성층 효율은 성층강도의 감소와 함께 낮아지게 되어서는 실제로 그들의 실험에서 전체 효율은 약 12% 이하로 나타난다. 만약, 에너지의 변환효율을 높이기 위한 것만이 목적인 경우에는 수중폭기장치의 운전시 시간에 따라 유입공기유량을 줄여나가는 것이 적절할 것이지만 심층부 산소의 공급 및 저수지 탈성층 소요시간을 고려할 때 이는 바람직하지 못하다고 할 수 있으며, 잘 알려진 무차원 변수 설계방법론들 역시 이러한 전체 효율에 대한 가정을 바탕으로 하고 있다. 본 연구도 마찬가지로 전체 탈성층 효율을 검토하는 것을 목적으로 하고 있으므로 버블 플룸에 의한 탈성층시 에너지 변환효율의 시간에 따른 감소가 비교적 일정한 감소추세를 보인다고 가정하였다. 이와 관련하여 Kim 등 (2005)의 실험에서 시간에 따르는 효율추세를 선형으

로 가정하여 나타내었을 때, 전체 효율은 초기효율의 50%가 다소 넘는 57~62% 정도로 나타난다는 결과가 있다. 따라서, 초기의 버블플룸 관련 변수들의 조건을 결정하면 전체 효율이 높게 나타나는 결과를 얻을 수 있다고 말할 수 있다.

(d) 기포유입의 면적이 탈성층 효율에 영향을 미친다.

Chen과 Cardoso(2000)에 따르면, 기존의 연구들에서 사용된 기포직경 범위(1.25~4.2mm)에서는 후류가 발생한다고 하였다. 이러한 기포상승시 후류(wake)의 효율을 감소시키는 요인이 되며, 이는 기포간 간격이 적을수록 기포간 상호작용에 의해 운동량 전달이 감소하여 기포에 의한 탈성층 효율에 부정적인 영향을 주는 것으로 생각할 수 있다. 이러한 가정하에서 차원해석에는 플룸의 수평적 길이 스케일인 $D(=2b)$ 를 고려하였다. 여기서, 기포의 유입 면적은 반드시 상승속도를 기포의 종단속도보다 작아야하며(식 (17)), 합체(coalescence)는 없다는 가정이 필요하다. 본 연구에서의 실험범위는 이를 충분히 만족하는 범위 내에서 수행되었다.

$$u_s \gg \frac{Q_0}{A} \quad (17)$$

2.3. 차원해석을 통한 무차원 변수의 도출

차원해석을 위해 기존의 연구와 같이 성층강도와 관련된 변수와 기포의 부력 플럭스를 나타내는 변수군을 각각 도출하였다. 먼저 기포의 부력에너지와 기포에 의해 하층에서부터 수표면까지 상승하는데 이용되는 위치에너지의 비를 고려하기 위하여 먼저 차원해석을 위한 변수를 Q, N, g, p, ρ, D 로 선정하고, 길이, 시간, 질량 차원을 각각 포함하는 N, D, g 를 반복변수로 택하였다. 이때, Buckingham의 π 정리에 따라 3개의 독립무차원 변수가 도출되었으며, 이를 대수 연산하여 다음의 식 (18)로 정리하였다. 여기서, 압력항은 Fig. 1에서의 h 를 포함하는 식으로 변환하였다.

$$\frac{ND^2p}{Qgp} \sim \frac{Nb}{Q} D^2 \Rightarrow Q_1^* = \frac{Q}{NbD^2} \quad (18)$$

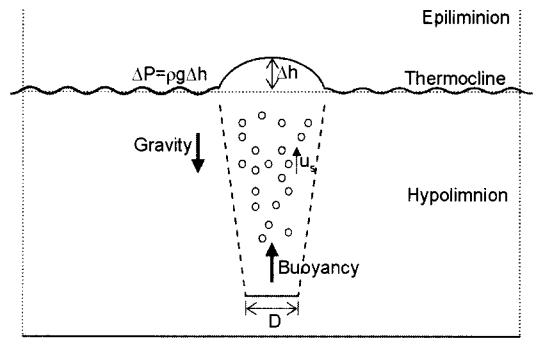


Fig. 1. Schematic of bubble plume structure.

다음으로 수체내의 부력 플럭스를 나타내기 위한 차원해석 변수는 Q, d_b, u_s 를 택하였다. 이 경우, π 정리에 의해 도출되는 변수는 다음의 식 (19)와 같다.

$$Q_2^* = \frac{Q}{u_s d_b^2} \quad (19)$$

Asaeda와 Imberger(1993)는 무차원 변수 P_N 로부터 탈성층 효율이 높게 나타날 것으로 예상되는 범위를 $300 < P_N < 3000$ (Type 2 Plume)으로 제시한 바 있다. 본 연구는 이러한 범위가 만족되는 조건하에서 효율의 변화는 부력플럭스의 보다 다른 요인에 지배된다는 가정 아래 있다. 따라서, 본 연구에서의 효율관련 무차원수는 식 (18)과 식 (19)를 결합한 형태로 다음과 같이 도출되며, 이는 다음의 식과 같이 Kim 등(2005)이 제시한 무차원 변수(Fr_N)를 기포경과 기포의 유입 반경 스케일을 고려하여 변형한 형태라고 할 수 있다. 이를 Bubble efficiency number(Be)라고 부르기로 한다.

$$\frac{Q_2^*}{Q_1^*} = \frac{Nb}{u_s} \left(\frac{D}{d_b} \right)^2 \sim \frac{1}{Fr_N} \left(\frac{D}{d_b} \right)^2 \quad (20)$$

2.4. 무차원 변수의 적용

여러 가지 조건에서의 탈성층 효율 실험을 위해 수위 1m 이하에서 조절이 가능한 아크릴 수조(길이와 폭 각 2m, 0.5m) 및 수위 5m 이하의 콘크리트 수조(길이와 폭 각 6m, 4m)가 사용되었다. 실험 조건 및 결과는 Table 3에 나타내었다. 이와 관련한 사항들은 Kim 등(2005)의 논문에서 보다 자세히 기술되어 있다.

Table 3. Summary of experimental results

Case	Water depth, H (m)	Tank area, A(m ²)	Total airflow rate, Q0 (m ³ /s) ×10 ⁻⁶	NE(s ⁻¹)	Mean bubble diameter (mm)	Plume Number, P _N ^d	M _H ^d	U _N	Bubble spreading ratio, λ	Plume horizontal length scale, D(m)	h ₀ (m)	Q ₁ [*]	Q ₂ [*]	Destratification efficiency (%)
(LTL ^a -1)	0.6	1.0	5.0	0.311	2.2	84	0.073	3.7	0.58	0.028	0.3	0.21	4.4	2.60
(LTL ^a -2)	0.6	1.0	1.67	0.340	1.7	660	0.012	5.7	0.45	0.040	0.3	0.05	2.4	5.80
(LTL ^a -3)	0.8	1.0	3.33	0.426	1.9	2082	0.018	4.6	0.52	0.040	0.4	0.05	4.0	6.28
(LTL ^a -4)	0.8	1.0	3.33	0.338	1.9	1039	0.018	4.8	0.50	0.040	0.4	0.06	4.0	4.45
(LTL ^a -5)	0.4	1.0	1.33	0.799	1.5	2072	0.015	4.9	0.50	0.040	0.25	0.02	2.6	7.30
(LTL ^a -6)	0.6	1.0	5.0	0.261	2.2	50	0.073	3.9	0.56	0.028	0.3	0.26	4.4	2.57
(LTL ^a -7)	0.6	1.0	5.0	0.272	2.0	113	0.037	4.6	0.52	0.040	0.3	0.15	5.3	3.91
(LTL ^a -8)	0.6	1.0	5.0	0.266	1.9	157	0.024	5.1	0.49	0.049	0.3	0.11	5.9	4.60
(LTL ^a -9)	0.6	1.0	5.0	0.294	1.8	285	0.018	5.4	0.47	0.056	0.3	0.08	6.5	5.33
(LTL ^a -10)	0.6	1.0	5.0	0.324	1.8	477	0.015	5.5	0.46	0.063	0.3	0.06	7.1	5.41
(LTS ^{a,b} -1)	0.6	0.125	10.0	0.310	2.4	42	0.147	3.1	0.62	0.028	0.35	0.29	7.37	3.66
(LTS ^{a,b} -2)	0.6	0.125	2.0	0.301	2.0	190	0.029	4.7	0.51	0.028	0.35	0.09	1.97	4.96
(LTS ^{a,b} -3)	0.6	0.125	1.0	0.292	1.8	350	0.015	5.6	0.46	0.028	0.35	0.06	1.34	5.04
(LTS ^{a,b} -4)	0.6	0.125	0.5	0.289	1.7	676	0.007	6.7	0.40	0.028	0.35	0.04	0.75	5.08
(LTS ^{a,b} -5)	0.6	0.125	0.33	0.301	1.4	1144	0.005	7.3	0.36	0.028	0.35	0.03	0.71	4.72
(LTS ^{a,b} -6)	0.6	0.125	10.0	0.317	2.5	45	0.147	3.1	0.62	0.028	0.35	0.28	6.52	2.99
(LTS ^{a,b} -7)	0.6	0.125	2.0	0.301	2.1	190	0.029	4.7	0.51	0.028	0.35	0.09	1.81	5.37
(LTS ^{a,b} -8)	0.6	0.125	1.0	0.304	1.9	392	0.015	5.5	0.46	0.028	0.35	0.05	1.11	4.92
(LTS ^{a,b} -9)	0.6	0.125	0.5	0.299	1.8	749	0.007	6.6	0.40	0.028	0.35	0.04	0.63	3.96
(LTS ^{a,b} -10)	0.6	0.125	0.33	0.300	1.8	1129	0.005	7.3	0.36	0.028	0.35	0.03	0.49	3.61
(PT ^c -1)	4.0	24.0	8.33	0.053	3.0	1036	0.012	5.5	0.46	0.146	1.2	0.02	2.89	4.08
(PT ^c -2)	4.0	24.0	33.33	0.045	3.1	160	0.050	4.0	0.56	0.146	1.2	0.07	10.83	3.81
(PT ^c -3)	4.0	24.0	16.67	0.067	3.0	1070	0.025	4.3	0.54	0.146	1.2	0.02	5.65	5.01
(PT ^c -4)	4.0	24.0	33.33	0.035	3.1	75	0.050	4.3	0.54	0.146	1.2	0.09	10.83	3.32
(PT ^c -5)	4.5	24.0	33.33	0.059	3.1	372	0.048	3.8	0.57	0.146	1.7	0.033	10.48	5.43
(PT ^c -6)	4.5	24.0	33.33	0.059	3.0	744	0.024	4.5	0.52	0.207	1.7	0.020	10.91	6.26
(PT ^c -7)	4.4	24.0	33.33	0.061	3.0	1607	0.012	5.3	0.47	0.293	1.6	0.013	11.13	7.17
(PT ^c -8)	4.4	24.0	33.33	0.057	2.9	2960	0.005	6.4	0.40	0.439	1.6	0.008	11.96	9.46

Note: ^aLTL and LTS represent laboratory-scale experiments while ^cPT represents pilot-scale experiment.

^bData from Ahn et al.(2004).

^dPlume numbers were calculated for each plume.

변수의 적용을 위해서 우선 선형성층에서 정의되는 성층주파수 N 을 2단 성층에서 적용하기 위하여 Lemckert와 Imberger(1993)에 의해 제안된 등가성층 주파수 N_E 를 다음의 식 (21)로부터 구하였으며, 본 연구의 결과에는 이 값이 적용되었다. 식 (20)에서 PE_A 는 초기 수체의 위치에너지지를 의미한다.

$$N_E = \left(\frac{\frac{1}{2} \rho_0 g H^2 - PE_A}{\frac{1}{3} \rho_0 H^3} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

다음으로, 버블플룸의 수평적 길이 스케일인 $D(=$

2b)의 경우 산기면적에 대하여 등가의 길이를 다음의 식 (22)를 통해 계산하여 적용하였으며, 여러 대의 폭기장치를 적용한 경우 장치의 대수 n 을 고려하였다. 이때, 효율과 관련된기 위해서 운동량 플럭스의 너비에 대한 부력 플럭스의 너비, bubble spreading ratio(λ)를 고려하였다. λ 의 값을 계산하기 위해 Socolofsky와 Adams(2005)가 제시한 관계식(식 22)를 이용하였다.

$$\lambda = 1 - 0.19 \left[\frac{u_s}{(Q_B g N)^{1/4}} \right]^{0.61} \quad (22)$$

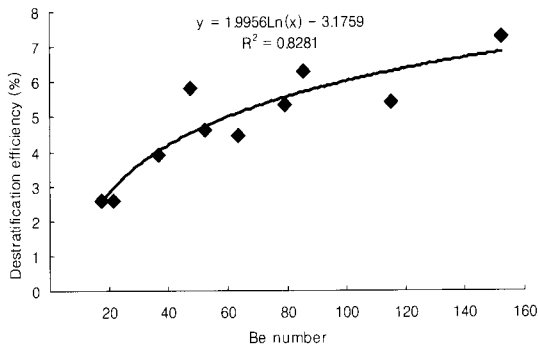


Fig. 2. Destratification efficiency versus Be number (Case LTL; Tank area=1.0m²).

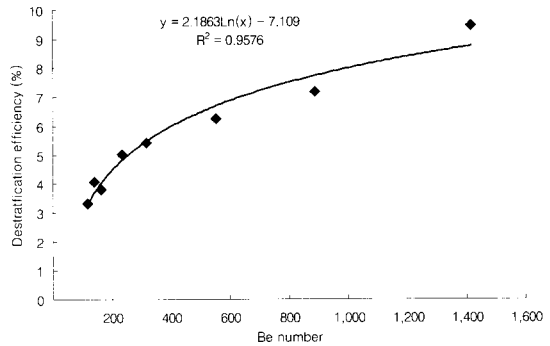


Fig. 4. Destratification efficiency versus Be number (Case PT; Tank area=24.0m²).

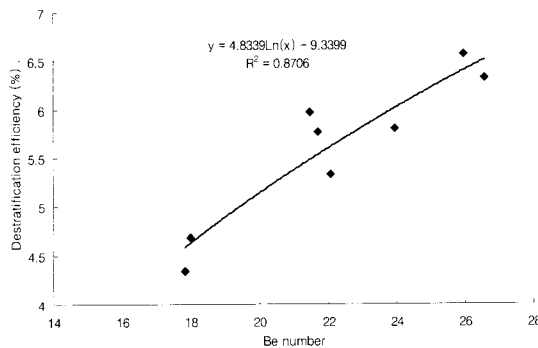


Fig. 3. Destratification efficiency versus Be number (Case LTS; Tank area=0.125m²).

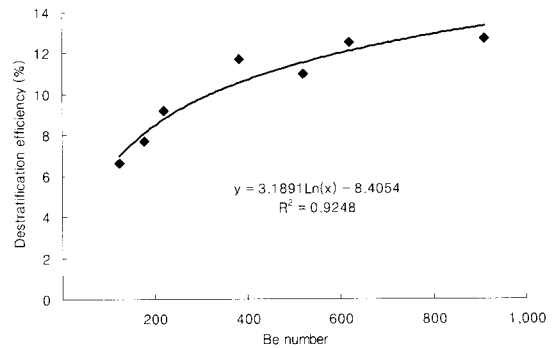


Fig. 5. Destratification efficiency versus Be number (Asaeda and Imberger, 1993; Ceramic diffuser case; Tank area=1.0m²).

기포의 슬립속도는 Wüest 등(1992)이 적용한 기포 반지름-슬립속도 관계식을 이용하였다. 마지막으로 h의 경우, 전체수위가 아닌 Fig. 1에서의 경계층 상부에 해당하는 수두인 h_u 를 적용하였다.

Fig. 2에서부터 4까지는 각각의 실험조 크기에 따른 Be와 효율과의 관계를 나타내고 있다. Fig. 5는 Asaeda와 Imberger(1993)의 결과를 인용한 것으로서, 실험조의 규모로 보았을 때, 본 연구의 실험실 규모 실험(Case LTL)에 대응한다. 다만 본 연구의 실험과 다른 점은 폭기장치의 면적이라고 볼 수 있는데, Asaeda와 Imberger(1993)의 경우 매우 작은 면적의 폭기기를 사용하였기 때문에 Be를 이용한 직접적인 평가는 어려웠다. 따라서 Fig. 5는 버블 플룸의 수평적 길이 스케일을 고려하기 위해서 플룸 내의 상 체유량(ϵ)을 1%로 가정하였다. 이 경우, D는 다음과 같이 구하였다.

$$u_B D^2 \times \epsilon = Q_B \Rightarrow D = \sqrt{\frac{Q_B}{\epsilon u_B}} \quad (23)$$

결과는 단일화된 지표인 Be와 전체 탈성층 효율과의 관계가 $R^2 = 0.82$ 이상으로 높게 나타났다. 따라서, 성층 프라우드 수 (Fr_N)이 탈성층 효율에 관계된다는 본 연구의 가정을 만족시키며, 만약 버블 플룸이 단일한 크기의 기포로 이루어진다면, 적절한 부력 플럭스 조건이 갖추어진 조건하에서 탈성층 효율은 슬립 속도가 같다고 할지라도 버블 플룸의 코어에서의 운동량을 전달하는 영향범위를 가능한 한 크게 할 수 있도록 기포의 크기를 작게 하고 산기 면적을 증가시켜야 한다는 가정을 뒷받침 할 수 있다. 따라서 본 연구의 결과는 기존의 무차원수들로는 설명할 수 없었던 경우들, 즉, 나머지 조건은 동일한 탈성층 실험에서 기포의 지름을 바꾼 경우(Case LTS-3과 LTS-8, LTS-4와 LTS-9, 그리고 LTS-5과 LTS-10)의 효율

차이를 설명할 수 있었으며, 파일럿 실험에서 폭기 장치의 수를 분산시켰을 경우(Case PT-5에서 PT-8) 효율이 증가하는 결과와 잘 반영시킬 수 있었다. 결론적으로, 기포의 슬립속도가 동일한 것으로 알려진 기포의 지름이 1.4mm 이상인 경우(10.4mm 이하까지)에도 기포의 지름이 작을수록 탈성층 효율 면에서 유리하므로 가능한 한 작은 기포를 생성하는 폭기 장치를 이용하는 것이 좋다. 다만, 본 연구의 결과는 기존의 탈성층 효율 평가관련 연구와 마찬가지로 기포 생성에 있어 폭기 장치에서의 손실수두는 고려하지 않고 있으므로 이에 대한 평가방안은 더 연구되어야 한다.

또한, 파일럿 실험의 결과 및 무차원변수의 적용을 통해 $Re > 500$ 이상인 범위에서도 일정수준이상의 부력 플럭스를 수체에 공급할 수 있다면 가능한 한 버블 플룸을 분산시키는 것이 탈성층 효율면에서 낫다고 할 수 있다. 그러나 Fig. 2와 Fig. 4, 5에서 관찰되는 바와 같이 효율의 증가는 비선형적으로 증가하며, 뚜렷한 감소추세를 가지고 있다. 이것은 비록 위의 결과가 버블 플룸의 최대효율을 정해주는 않으나 최대 탈성층 효율이 15% 이상은 보고되고 있지 않은 버블 플룸의 특성을 반영하는 것이라고 볼 수 있다. 따라서 탈성층 효율을 증가시키기 위한 버블 플룸의 분산은 장치의 설치대수 증가에 따른 비용효율적인 측면과 본 연구에서는 다루어지지 않는 간격이 고려되어야 한다.

2.5. 결과의 설계 적용 방법

위의 결과들을 대수(log) 그래프로 나타낸 결과를 다음의 Fig. 6에 나타내었다. 비록 Asaeda와 Imberger (1993)의 실험결과 해석에 상체유량 가정이 포함되어 있으나, 그들의 실험조건과 연구의 LTL의 경우는 실험조의 면적에 대해서 동일하다. Yum 등(2005), 박 등(2005)의 연구에 따르면, 버블 플룸간의 간격이 멀어질수록 효율은 감소하는 추세를 나타낸다고 하였다. 이러한 관계를 고려할 때, 본 연구의 결과는 실험조의 면적과 관련지어 해석할 수 있다. 따라서, 결과의 적용을 위하여 Be와 면적(A)에 대한 다중회귀 분석을 수행하였다. 이를 위해 간단한 power law를 적용하였으며, LTS의 경우에는 조의 크기가 매우 작아 (0.125m²) 제외하였다.

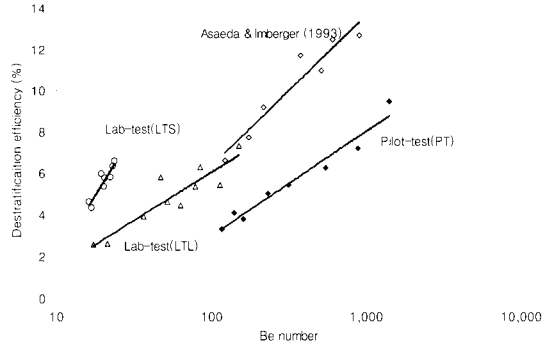


Fig. 6. Destratification efficiency versus Be number (Log-plot).

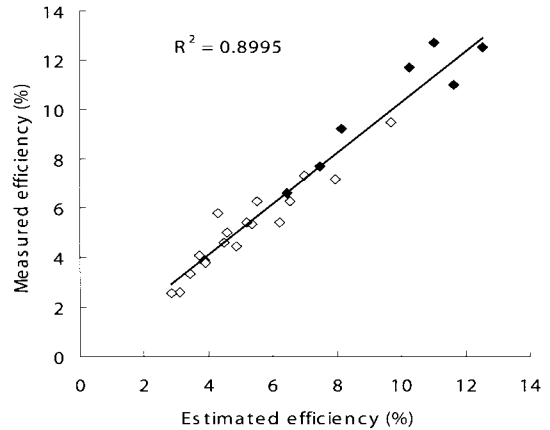


Fig. 7. Comparison between the measured and estimated destratification efficiencies (filled diamonds represent Asaeda and Imberger's experimental results).

회귀분석의 결과 다음의 식을 도출할 수 있었다($p < 0.001$ for Be and A).

$$\eta = 0.747(Be)^{0.43}(A)^{-0.18} \tag{24}$$

$$= 0.747 \left(\frac{N_E b_u (\lambda D)^2}{u_s d_b^2} \right)^{0.43} A^{-0.18}$$

Fig. 7은 식(24)에 의한 실험결과의 분석시 평균 오차범위 0.078(7.8%) 정도로 적용에 무리가 없을 정도로 잘 일치하는 결과를 보여주고 있다. 이를 통하여 간략한 탈성층 설비 설계방안을 제시하면 다음과 같다.

- (1) 저수지의 성층 특성을 고려하는 인자들(A, N_E, b_u)을 계산한다.

(2) 저수지 특성에 따라 폭기 유량(Q)은 Asaeda와 Imberger(1993)의 제안에 따라 최소한 플룸넘버(P_N)가 500 이상이 되도록 설정한다.

(3) 폭기 장치의 특성에 관련된 인자들(D_{mit} , d_b , u_c)을 결정한다.

(4) Q 에 따른 값을 계산한다.

(5) 요구되는 효율에 해당하는 총 폭기 면적 D 를 구한다.

(6) 위에서 구해진 D 를 단위 폭기당 D_{mit} 으로 나누어 전체 폭기 장치의 수를 결정한다.

본 연구에서의 설계 제안은 기존의 설계방법론들이 단위 폭기당 최적 폭기 유량을 결정하고 이를 전체 요구되는 폭기 유량에 대하여 나누어 결정하는 것과는 달리 적정한 유량범위 하에서 산기면적과 기포의 크기를 고려하게 된다. 따라서, 최소한의 유량이 공급된다면 폭기장치 제작회사들이 제공하는 폭기 장치의 특성(공칭 유량 등)을 직접적으로 반영할 수 있다는 장점이 있다. 실제 저수지 규모에서의 결과와 비교자료를 통해 적용타당성은 반드시 검증되어야 할 것이다. 또한, 본 연구에서 적용한 Socolofsky와 Adams(2005)의 λ 계산방법도 보다 많은 자료의 축적 및 검증이 필요할 것으로 판단된다.

3. 결 론

본 연구의 결과를 다음과 같이 정리할 수 있다.

(1) 투입되는 운동에너지 대비 변환되는 위치에너지를 정의하는 탈성층 효율에 대한 간단한 고찰을 통해 효율이 성층 프라우드 수(Fr_N)에 관련되어 있다고 판단하였다. 또한, 탈성층 효율에 대한 기하학적 요소들(기포의 크기, 폭기 면적)을 고려하여 Buckingham's pi theorem을 통한 새로운 무차원 변수들을 도출하였다. 이를 Fr_N 과 연관시켜 변형된 형태인 Bubble efficiency number(Be)를 제안하였다.

(2) 실험실 규모 및 파일럿 규모의 탈성층 효율 평가 결과(안 등, 2004; Kim 등, 2005)를 제안된 Be와 비교한 결과, 각각의 경우에 있어 Be의 증가에 따라 탈성층 효율도 증가하는 경향을 나타내었으며(상관계수 $R^2 \geq 0.82$), 그 증가추세는 대수선형적인 추세로 나타났다. 이는 일반적인 탈성층 조건에서 각각의 변

수는 한계점을 가지므로 Be의 증가에 따르는 효율의 증가가 계속적으로 나타날 수 없는 탈성층 효율의 최고점이 있다는 사실을 시사한다. 그러나 본 연구의 결과만으로 그 위치를 정확히 파악할 수는 없었다. 또한, 이 러한 Be와 효율의 상관관계 분석을 통해 기존의 무차원수들로는 설명할 수 없었던 기포의 크기에 따른 효율 차이와 동일 폭기유량에 대하여 폭기 장치의 수를 증가시켰을 경우 효율이 늘어나는 결과를 설명할 수 있었다.

(3) 제안된 지수인 Be를 설계에 반영하기 위하여 실험조의 면적(A)을 추가로 고려하여 power law 가정을 통해 실험결과를 다중 회귀 분석 하였다. 그 결과 상관계수가 큰 결과를 얻었으며, 탈성층 효율은 Be의 0.43제곱에 비례하고 수체 면적의 0.18제곱에 반비례하는 결과(탈성층 효율 $\eta = 0.747(Be)^{0.43} (A)^{-0.18}$)를 도출하였으며, 이 관계식을 실제 탈성층 설비의 설계에 반영할 수 있도록 새로운 설계 방안을 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비지원(과제번호: 1-6-2)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 김성훈, 김재운, 박성혁, 박희경 (2004) 댐저수지에서 인공 폭기시스템 설계를 위한 CFD의 적용, 대한상하수도학회 한국물환경학회 공동추계학술발표회논문집.
- 박성혁, 김재운, 김성훈, 박희경 (2005) 수중폭기에 의한 탈성층시 산기관의 배치간격과 배치대수의 수리 및 수질 영향 평가, 대한환경공학회 추계학술연구발표회.
- 안제영, 김재운, 박희경 (2004) 비선형성층에서 수중폭기에 의한 탈성층시 공기직경이 탈성층 효율에 미치는 영향 연구, 한국물환경학회·대한상하수도학회 공동추계학술발표회.
- 염경택, 박희경, 박노석, 김종섭 (2004) 성층유체의 밀도분포 변화 및 유동장 분석을 통한 Bubble Plume의 수리동역학적 거동평가, 대한토목학회지, 24(4B), pp. 347-355.
- 염경택, 박희경, 안제영 (2004) Bubble plume의 중첩효과가 저수지 성층과 효율에 미치는 영향에 대한 수리동역학적 2상-3차원 평가, 한국수자원학회지, 37(2), pp. 219-231.

- Asaeda, T., Imberger, J. (1989) Behaviors of bubble plumes in a linear stratification. *Proc. JSCCE*, **411**, pp. 55-62.
- Asaeda, T., Imberger, J. (1993) Structure of bubble plumes in linearly stratified environments. *J. Fluid Mech.*, **249**, pp. 35-57.
- Baines, W.D., Leitch, A.M. (1992) Destruction of stratification by bubble plume. *J. Hydraul. Eng. ASCE*, **118**(4), pp. 559-577.
- Chen, M.H. and Cardoso, S.S.S. (2000) The mixing of liquids by a plume of low Reynolds number bubbles. *Chem. Eng. Sci.*, **55**, pp. 2585-2594.
- Kim, S., Park, H., Ahn, J., and Yum K. (2005) Destratification and water quality improvement in reservoirs: effect of bubble size on destratification. *Proc. USA-Korea Conference ACETS*, August 11-13, UCI, USA.
- Lemckert, C.J. and Imberger, J. (1993) Energetic bubble plumes in arbitrary stratification, *J. Hydraul. Eng.*, **119**(6), pp. 680-703
- Rensen, J. and Roig, V. (2001) Experimental study of the unsteady structure of a confined bubble plume. *Int. J. Multiphas. Flow*, **27**, pp. 1431-1449.
- Sahoo, G.B. and Luketina, D. (2003) Modeling of bubble plume design and oxygen transfer for reservoir restoration. *Wat. Res.* **37**, pp. 393-401.
- Sahoo, G.B. and Luketina, D. (2005) Gas transfer during bubbler destratification of reservoir. *J. Environ. Eng., ASCE*, **131**(5), pp. 441-449.
- Sato, K. and Sato, T. (2001) A study on bubble plume behavior in stratified water, *J. Mar. Sci. Technol.* **6**(2), pp. 59-69.
- Sato, T., Sato, K., and Ishikawa, A. (2002) Numerical simulation of direct injection of carbon dioxide in the ocean. *Proc., FEDSM'02, Montreal*, ASME, New York.
- Schladow, S.G. (1993) Lake Destratification by bubble plume systems: Design methodology, *J. Hydraul. Eng. ASCE*, **119**(3), pp. 350-368.
- Socolofsky, S.A., and Adams, E.E. (2003) Liquid volume fluxes in stratified multiphase plumes, *J. Hydraul. Eng. ASCE*, **129**(11), pp. 905-914.
- Socolofsky, S.A., and Adams, E.E. (2005) Role of slip velocity in the behavior of stratified multiphase plumes, *J. Hydraul. Eng. ASCE*, **131**(4), pp. 273-282.
- Wüest, A., Brooks N.H. and Imboden, D.M. (1992) Bubble plume modeling for lake restoration. *Water Resour. Res.*, **28**(12), pp. 3235-3250
- Yum, K., Ahn, J., H. Park., and Ko, I.H. (2005) Two-Phase Computational Fluid Dynamics Assessment of Bubble Plume in Air-Diffuser Destratification, *Environ. Technol.*, **26**(9), pp. 1043-1054.
- Zic, K., Stefan, H.G., and Ellis C. (1992) Laboratory study of water destratification by a bubble plume, *J. Hydraul. Res. ASCE*, **30**(1), pp. 7-27.