

다항식 회귀분석을 이용한 마이크로 버블의 종말상승속도 모델식 구축 및 운전조건 최적화

박일건^{1*} · 김홍래¹ · 조일형^{2†}

¹(주)평화엔지니어링 연구원, ²(주)지티엔
(2018년 12월 3일 접수: 2018년 12월 21일 수정: 2018년 12월 21일 채택)

Model setup and optimization of the terminal rise velocity of microbubbles using polynomial regression analysis

Gun-Il Park¹ · Heung-Rae Kim¹ · Il Hyoung-Cho^{2†}

¹Pyunghwa Engineering Consultants Ltd. R&D Institute
²Global Top Engineering partner Ltd.

(Received December 3, 2018; Revised December 21, 2018; Accepted December 21, 2018)

요약 : 본 연구는 3개의 운전변수(압력, 공기량, 운전시간)를 실험 설계하고 마이크로 버블의 종말부상 속도(Terminal rise velocity)를 반응 값으로 하여 예측식 모델과 최적 조건을 수립하였다. 다항식 회귀분석을 통해 펌프의 압력(X_1) 4.5bar, 공기량(X_2) 3.3L/min 그리고 운전시간(X_3)이 2.2min에서 종말상승속도(Terminal rise velocity)에 대한 최적값인 5.14 cm/min (85.7 μ m/sec)을 얻었다. 또한, 레이저 입자계수 측정장치를 이용하여 2~5 μ m 및 25~50 μ m 영역에서의 가장 높은 마이크로버블 직경크기 분포를 확인하였다.

주제어 : 마이크로 버블, 종말상승속도, 예측식 모델, 최적조건, 직경크기

Abstract : In this study, three parameters (Pressure (X_1), Airflow rate (X_2), Operation time (X_3)) were experimentally designed and the predicted model and optimal conditions were established by using the terminal rise velocity of the microbubbles as the response value. The polynomial regression analysis showed that the optimum value for the terminal rise velocity at the Pressure (X_1) of 4.5 bar, Airflow rate (X_2) of 3.3 L/min and Operation time (X_3) of 2.2 min was 5.14 cm/min (85.7 μ m/sec). Also, the highest microbubble diameter size distribution in the range of 2 to 5 μ m and 25 to 50 μ m was confirmed by using a laser particle counting apparatus.

Keywords : Microbubbles, Terminal rise velocity, Polynomial regression analysis, Model, Optimization

[†]Corresponding author
(E-mail: cihyoung73@hanmail.net)

1. 서론

미세기포는 일명 마이크로 버블(Microbubbles)은 $100\mu\text{m}$ 이하 직경 크기를 갖는 작은 기포이며 시간이 경과 후 물 아래에서 사라지거나 수면 위로 서서히 상승하면서 사라진다.[1] 초미세기포인 일명 나노버블(Nanobubbles)은 $1\mu\text{m}$ 이하의 직경을 갖는 기포를 말하며 제타전위에 의해 계산될 수 있으며 음으로 하전된 표면 특성 때문에 브라운 운동으로 오랫동안 수면에 존재하면서 안정을 유지한다.[2] 이런 미세기포 혹은 초미세기포의 특성은 낮은 상승속도, 접촉면적의 증가에 따른 높은 물리화학적 반응성 및 흡수성, 미세기포 붕괴로 인한 자유 라디칼의 생성 등 다양한 특성이 있다.[3] 최근에는 마이크로 버블 및 나노 버블 기술은 광산업, 수처리 공정, 생의학 공학, 식품 가공 및 나노 재료 산업과 같이 과학 및 산업 분야에서 폭넓게 응용되고 있다. 예를 들어 광산 혹은 수처리 분야에서 나노 마이크로 버블을 부상분리 공정에서 효과적으로 사용하여 공정 성능을 향상하게 시킬 수 있다.[4] 유체 역학적 캐비테이션에 의해 생성된 나노 마이크로 버블은 고형물의 접촉각도와 면적을 증가시켜 그 결과 부착력을 증가시키고 또한 미립자(fine particles)를 결합력을 증가시킨다. 그 결과 슬러리 코팅을 최소화하고, 입자 표면의 산화층을 제거하여 응집제 혹은 폴리머와 같은 약품에 대한 소비를 감소시킨다.[5] 일반적으로 유체 역학, 음향, 광학 및 입자 캐비테이션의 원리를 이용하여 미세기포를 만들고 있다. 최근 미세 기포를 만드는 가장 비용 효율적인 방법으로 유체 역학적(Hydrodynamics)인 방법을 선호하고 있다. 즉 기체를 물리적인 운동에너지를 인가시켜 액체에 용해하는 방법이다.[6] 다양한 방법 중 가압 용해 방식, 회전 소용돌이 방식, 정적믹서 혼합방식, 이젝터 노즐, 벤츄리 노즐 등이 있다. 최근에는 가압용해 방식에 벤츄리 노즐, 회전 소용돌이 노즐 혹은 정적믹서 혼합노즐을 혼용한 하이브리드식 미세기포 발생장치들이 개발되고 있다. 그 이유는 기체의 액체에 대한 용해율을 높임으로써 밀도 있는 기포를 생성하기 때문이다. 최근 공정 최적화를 위한 통계학적 모델 구축과 최적화 조건을 수립을 위한 연구가 많이 진행되고 있다. 미세기포와 관련하여 반응 표면 방법론을 이용한 탈황 폐수에서 마그네슘 아황산염 산화를 위한 미세 기포 폭기 공정의 최적화를 연구하였다.[7]

마이크로버블 이용하여 오염된 모래에서 오일을 부상시키는 최적화 연구를 수행하였다.[8] 반응 표면 방법론을 이용한 나노 버블 생성 과정의 모델링 및 최적화에 관한 연구를 수행하였다.[9] 본 논문은 유체 역학적 현상을 기반으로 설계 및 제작된 마이크로 버블 발생장치를 이용하여 미세기포의 종말부상속도(Terminal rise velocity)를 평가하였다. 미세기포 발생장치의 다양한 운전변수 중 가장 중요한 펌프 압력, 공기량과 운전시간을 독립변수로 하여 종말부상속도에 대한 통계학적 최적화 모델과 운전조건을 수립하였다.

2. 실험

2.1. 실험 장치 및 방법

Fig. 1은 마이크로 버블 발생장치의 개략도를 나타냈다. Table 1은 마이크로버블 발생장치의 주요 부품과 사양에 대하여 설명하였다. 펌프의 실험 장치의 개략도를 도시한다. 기액 믹서펌프(Liquid-Air Mixing pump, GTN, Korea)를 이용하여 100L 수조탱크로부터 액체를 0~60 LPM (L/min) 범위의 전자 유량계(Wintech Process Co., Ltd)를 이용하여 공급하면 기액 믹서펌프로 음압(Negative pressure)에 의해 흡입되는 공기를 공기유량계(Air flowmeter, Huadong, Co., Ltd)에 의해 1~5 LPM (L/min)으로 각각 조절하여 측정하였다. 우선 감압-가압 방식에 의해 기체를 믹서 펌프 임펠러에 순간적으로 주입하여 1차 용해되도록 하였다. 기체와 액체의 1차 혼합물은 3단 Cavitation 충돌판(3rd stage cavitation impact plate, GTN)을 거치면서 용해율과 기포의 밀도를 증가시킨다. 3단 충돌판은 기포가 더 미세하게 쪼개지도록 구성하였고 특수 단수에 따라 선회 및 충돌전단이 연속적으로 이루어지도록 하였다. 마이크로 버블을 최종적으로 만들기 위해서 2단 선회류가 가능한 Vortex 노즐(2-phase Vortex nozzle)을 배치하였다. 이 노즐은 입구를 통해 유입된 혼합물이 중간부의 선회류 발생용 스피너를 통해 나선형 흐름으로 변환되어 토출측을 통해 배출되도록 설계 및 제작되었다. 펌프의 압력 차를 측정하기 위해 시험 펌프의 상류와 하류에 두 개의 압력계를 설치하였다. 또한 펌프의 전력소모량을 측정하기 위하여 제어반 내 전자식 전력량계를 설치하였다(Tascon Co., Ltd). 마이

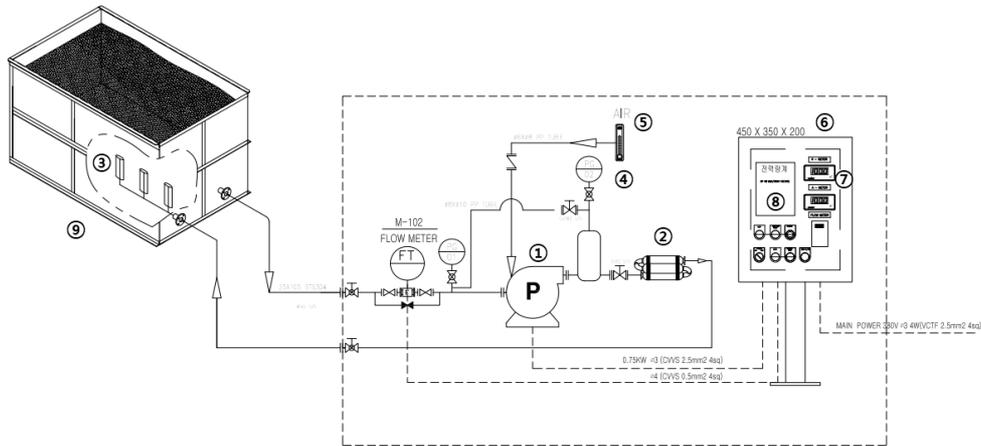


Fig. 1. Picture of a microbubble generator experimental apparatus.

Table 1. The main part and specifications of Microbubble generator

No	Part	Specifications
1	Liquid-Air Mixing pump	380V×0.75kw
2	3rd stage cavitation impact plate	Three-stage collision plate slit
3	2-phase Vortex nozzle	Two-stage spin-hole turning shear
4	Pressure	0~10bar(A Type)
5	Air flowmeter	1~5LPM(L/min)
6	Controller	380V, 4-wire, manual operation
7	Electronic flow meter	0~60LPM(L/min),
8	Electronic power meter	0~40A, 380V
9	Tank	100L

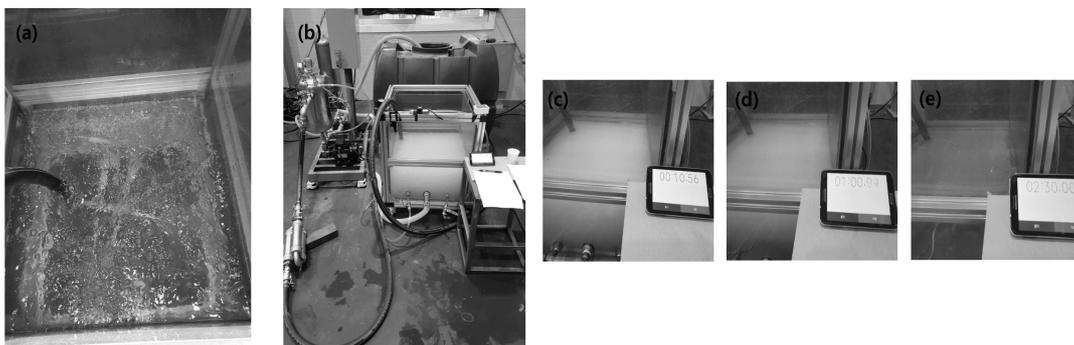


Fig. 2. (a) Schematic diagram of rise velocity measurement (a) Before micro bubbles generation (b) Stop device after micro bubbles formation (c) Measurement of micro bubbles rising velocity (d) Increase of micro bubbles rising velocity (e) Complete disappear of micro bubbles.

크로버블 발생장치의 운전시간은 타이머를 설치하여 측정하였다. 미세기포층의 깊이를 측정하기 위해 particle counter인 Laser Trac PC2400D (Chemtrac, Norcross, GA, USA)를 사용하였다.

2.2. 마이크로버블의 종말상승속도

순수한 물과 오염된 물에서 버블의 종단상승속도(Terminal rise velocity)를 결정하기 위한 상관관계를 개발했다. 버블의 등가 반경이 $100\ \mu\text{m}$ 보다 작으면 버블의 형상은 거의 구형을 유지하고 버블은 솔리드 구형처럼 운동하고, 버블의 등가 반경이 증가하면 버블 모양이 구형에서 타원형에서 구형으로 변경될 수 있다고 보고하였다[10]. 이러한 변화가 일어나는 반경은 액체의 물리 화학적 특성에 달려있다. 기포의 크기가 미크론 수준, 즉 레이놀즈수가 0에 접근할 때, 기포는 구형체로 간주될 수 있다. 따라서 마이크로 버블(U_b)의 종단상승속도(Terminal rise velocity)는 Stokes의 법칙에 따라 설명될 수 있다. Stokes [11]는 식 (1)에 따라 낮은 Reynolds 수에서 점성 액체에서 버블의 속도는 다음과 같다.

$$U_b = \frac{D_b^2 g (\rho_l - \rho_g)}{18\mu_l} \quad (1)$$

여기서 g 는 중력 가속도이며 ρ_l 과 ρ_g 는 각각 액체와 기체의 밀도를 나타낸다. D_b 는 마이크로 버블의 직경을 나타낸다. 서스펜션 내의 마이크로 기포 구름은 부력으로 인해 상승하기 시작하여 명확한 액체 계면을 남긴다고 하였다.[12] 즉 분산된 미세 기포를 함유한 액체는 짧은 시간 내에 미세기포 발생기로부터 투명 눈금 유리 실린더로 전달되어 측정할 수 있다고 하였다. 정체된 액체에서 상승하는 미세 기포의 운동은 Stokes의 법칙에 잘 설명되고 있다. 정체와 응집이 없다고 가정하면 정체된 액체에서 상승하는 미세기포의

직경(D_b)은 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$D_b = \sqrt{\frac{18\mu_l U_b}{g(\rho_l - \rho_g)}} \quad (2)$$

마이크로 버블의 상승속도(U_b)는 식 (3)에 의해 스케일상의 두 개의 거리(높이) 사이에서 마이크로 버블의 생성되어 이동되면서 사라진 거리의 걸리는 시간 간격으로부터 쉽게 계산될 수 있다.[13]

$$U_b = \frac{h_2 - h_1}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

여기서, h_1 및 h_2 는 각각 시간 t_1 및 t_2 에서 기포들의 위치이다.

2.3. 반응모델 및 통계분석

마이크로 버블 발생장치는 펌프 압력 및 흡입 공기 유량에 따라 매우 민감한 특성을 갖는다. 최적의 마이크로버블을 생성하기 위한 조건을 수립하기 위해 펌프 압력과 공기량에 따라 액기비가 결정되기 때문이다. Table 2와 같이 본 연구에서는 펌프의 압력은 3~4.5 bar, 공기량은 2~4 LPM 및 운전시간은 0.5~3 min으로 조정하였다.

통계학적 반응모델을 수립하기 위해서 마이크로 버블 발생장치의 제어변수인 압력(X_1), 공기량(X_2) 및 운전시간(X_3)을 독립변수로 놓고 마이크로 버블이 완전히 소멸하여 없어지는 시간을 측정한 종말 상승속도(Terminal rise velocity)를 반응값(Y)으로 하였다. 독립변수와 반응값을 설정하여 실험 데이터는 식 (4)와 같이 2차 다항식 모델(Second-order polynomial model)에 수립하고 회귀계수를 산출하였다.[14]

Table 2. The main part and specifications of Microbubble generator

Operation variables	Range levels
Pressure (X_1)	3~4.5bar
Airflow rate (X_2)	2~4 LPM (L/min)
Operation time (X_3)	0.5~3 min

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{i \neq j=1}^k b_{ij} x_i x_j \quad (4)$$

여기서 b_0 , b_i , b_{ii} 및 b_{ij} 는 각각 절편(intercept), 선형(linear), 이차(quadratic) 및 상호(interaction) 작용 항의 회귀계수(Regression coefficients)이고 X_i 및 X_j 는 독립변수이다. Table 2의 운전변수(X_1 , X_2 , X_3)에 따른 반응값(Y) 분석하기 위해서 식 (4)의 1차항의 주효과(Main effect) 및 2차항의 교호작용(Interaction effect)을 분석하고 모델식에 대한 적합도 및 ANOVA 분석을 통해 확인하였다. 또한 2차(2D) 등고선도와 3차(3D) 표면도를 통해 최적의 운전 조건과 반응값을 찾아 검증하였다. 통계 프로그램은 Minitab 18(Minitab Inc., State College PA, USA) 버전을 활용하여 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 예측모델 수립 및 검증

본 연구에서는 Table 2의 운전변수(X_1 , X_2 , X_3) 범위 내에서 식 (4)에 의해 측정된 반응값(Y)의 결과는 Table 3에 제시하였다. 실험은 교차 배열식으로 한 변수를 고정한 후 각 변수의 수준(Range level)을 변화시키면서 마이크로버블 종말상승속도를 총 72회 실험을 수행하였다. 독립변수인 압력(Pressure, X_1), 공기량(Airflow rate, X_2)와 운전시간(Operation time, X_3)와 반응값(Response Y)인 종말상승속도에 대한 경험적인 2차 다항식 모델(Second-order polynomial model)을 식 (5)에 나타냈다.

종말상승속도에 대한 결정계수 (R^2)는 무작위 오차보다는 모델에 기인 된 반응의 변화 비율이다. 좋은 적합 모델 (Good fit model)을 위해서

는 R^2 가 80% 이상이어야 된다고 제안되었다.[15] 적합도 그래프(Fitted plot)를 통해 얻은 결과는 (Response Y)인 종말상승속도(Terminal rise velocity, TRV)에 대한 모델이 만족스러운 R^2 가 93.3%이었고 또한 조정된 결정계수(Adjusted R^2)은 92.4%으로 나타났다(Fig. 3).

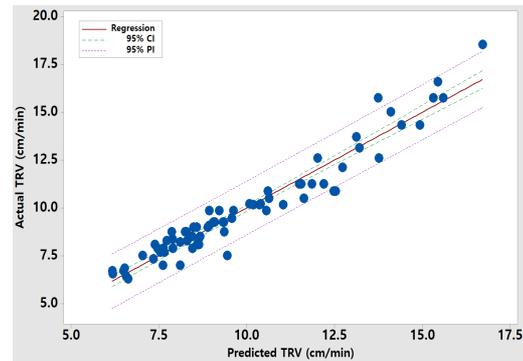


Fig. 3. Comparison between predicted and observed TRV ($R^2=93.3\%$, Adjusted $R^2=92.3\%$, Predict $R^2=90.4\%$)

T-검정과 P값은 버블 종말 상승속도 반응모델(Y)에 대한 각 변수의 효과를 확인하는 데 사용되었다(Table 4). Table 4의 다중 회귀분석에 따르면, 1차항 계수(Coefficient)에서 펌프의 압력(Pressure, X_1)와 운전시간(Operation time, X_3)은 음의 효과(Negative effect)로 마이크로버블 종말상승속도(TRV)에 영향을 미치는 주요 요인($p \leq 0.001$)으로 나타났다. 2차항 계수에서는 순수이차항 중 펌프의 압력(Pressure, X_1)을 제외한 공기량(Airflow rate, X_2^2)과 운전시간(Operation time, X_3^2)은 양의 효과(Positive effect)로 마이크로버블 종말상승속도에 매우 유의하였다($p \leq 0.001$). 또한 2차항 계수의 교호항(Interaction term)은 압력과 공기량($X_1 \times X_2$)은 양의 효과로 반응모델(TRV)에 유의하게 영향($p \leq 0.001$)을 미

$$\begin{aligned} \text{TRV (cm/min)} = & 20.64 + 1.98 \text{ Pressure (bar)} - 1.45 \text{ Airflow rate (LPM)} \\ & - 9.302 \text{ Operation time (min)} - 0.320 \text{ Pressure (bar)} \times \text{Pressure (bar)} \\ & + 0.712 \text{ Airflow rate (LPM)} \times \text{Airflow rate (LPM)} \\ & + 1.482 \text{ Operation time (min)} \times \text{Operation time (min)} \\ & - 0.740 \text{ Pressure (bar)} \times \text{Airflow rate (LPM)} \\ & + 0.508 \text{ Pressure (bar)} \times \text{Operation time (min)} \\ & - 0.087 \text{ Airflow rate (LPM)} \times \text{Operation time (min)} \end{aligned} \quad (5)$$

Table 3. The results of terminal rise velocity by operation conditions (Table 2) of microbubble generator

No	Pressure (bar)	Airflow rate (LPM)	Operation time (min)	TRV (cm/min) ^a
	X_1	X_2	X_3	Y
1	4.5	2	0.5	13.7
2	4.5	2	1	10.5
3	4.5	2	1.5	9.0
4	4.5	2	2	8.4
5	4.5	2	2.5	7.9
6	4.5	2	3	7.0
7	4.5	3	0.5	11.3
8	4.5	3	1	9.3
9	4.5	3	1.5	7.7
10	4.5	3	2	6.7
11	4.5	3	2.5	6.6
12	4.5	3	3	6.3
13	4.5	4	0.5	12.6
14	4.5	4	1	7.5
15	4.5	4	1.5	7.0
16	4.5	4	2	6.8
17	4.5	4	2.5	6.7
18	4.5	4	3	6.4
19	4	2	0.5	15.0
20	4	2	1	11.3
21	4	2	1.5	9.8
22	4	2	2	9.0
23	4	2	2.5	8.2
24	4	2	3	7.9
25	4	3	0.5	13.1
26	4	3	1	9.8
27	4	3	1.5	8.4
28	4	3	2	7.9
29	4	3	2.5	7.5
30	4	3	3	7.3
31	4	4	0.5	15.8
32	4	4	1	10.2
33	4	4	1.5	9.3
34	4	4	2	8.8
35	4	4	2.5	8.1
36	4	4	3	7.7
37	3.5	2	0.5	14.3
38	3.5	2	1	11.3
39	3.5	2	1.5	10.2
40	3.5	2	2	9.1
41	3.5	2	2.5	8.5
42	3.5	2	3	8.1
43	3.5	3	0.5	14.3
44	3.5	3	1	10.5
45	3.5	3	1.5	9.5

^a $h_2-h_1=31.5\text{cm}$

No	Pressure (bar)	Airflow rate (LPM)	Operation time (min)	TRV (cm/min)
	X_1	X_2	X_3	Y
46	3.5	3	2	8.8
47	3.5	3	2.5	8.3
48	3.5	3	3	7.9
49	3.5	4	0.5	31.5
50	3.5	4	1	10.9
51	3.5	4	1.5	10.2
52	3.5	4	2	9.3
53	3.5	4	2.5	8.5
54	3.5	4	3	8.1
55	3	2	0.5	15.8
56	3	2	1	12.1
57	3	2	1.5	10.9
58	3	2	2	9.8
59	3	2	2.5	9.0
60	3	2	3	8.5
61	3	3	0.5	16.6
62	3	3	1	10.9
63	3	3	1.5	10.2
64	3	3	2	9.8
65	3	3	2.5	8.8
66	3	3	3	8.3
67	3	4	0.5	31.5
68	3	4	1	11.7
69	3	4	1.5	11.3
70	3	4	2	10.2
71	3	4	2.5	9.3
72	3	4	3	8.8

Table 4. Estimated regression coefficients and corresponding t and P values for Eq. (5)

Coefficient	Coef	SE Coef	T-value	P-value
Constant	8.415	0.213	39.60	0.000***
Pressure (bar)	-1.317	0.117	-11.25	0.000***
Airflow rate (LPM)	-0.105	0.107	-0.98	0.329
Operation time (min)	-3.092	0.128	-24.20	0.000***
Pressure (bar)*Pressure (bar)	-0.180	0.196	-0.92	0.363
Airflow rate (LPM)*Airflow rate (LPM)	0.712	0.185	3.84	0.000***
Operation time (min)*Operation time (min)	2.316	0.219	10.59	0.000***
Pressure (bar)*Airflow rate (LPM)	-0.555	0.143	-3.87	0.000***
Pressure (bar)*Operation time (min)	0.476	0.171	2.78	0.007***
Airflow rate (LPM)*Operation time (min)	-0.109	0.156	-0.70	0.489

$R^2=93.3\%$, Adjusted $R^2=92.3\%$, Predict $R^2=90.4\%$

* T-value: (+) Positive effect. (-) Negative effect (factor effect). P-value: *** significant at 1%.

Table 5. ANOVA results for response parameters

Source	DF ^a	Adj SS ^b	Adj MS ^c	F-value	P-value ^d
Model	9	473.914	52.657	96.01	0.000***
Linear	3	391.131	130.377	237.72	0.000***
Pressure (bar)	1	69.388	69.388	126.52	0.000***
Airflow rate (LPM)	1	0.532	0.532	0.97	0.329
Operation time (min)	1	321.211	321.211	585.68	0.000***
Square	3	70.069	23.356	42.59	0.000***
Pressure (bar)*Pressure (bar)	1	0.461	0.461	0.84	0.363
Airflow rate (LPM)*Airflow rate (LPM)	1	8.108	8.108	14.78	0.000***
Operation time (min)*Operation time (min)	1	61.500	61.500	112.14	0.000***
Interaction	3	12.714	4.238	7.73	0.000***
Pressure (bar)*Airflow rate (LPM)	1	8.221	8.221	14.99	0.000***
Pressure (bar)*Operation time (min)	1	4.227	4.227	7.71	0.007***
Airflow rate (LPM)*Operation time (min)	1	0.266	0.266	0.49	0.489
Error	62	34.003	0.548		
Total	71	507.917			

^aDF, Degree of freedom; ^bSS, sum of squares; ^c MS, mean square. ^d P-value, ***significant at 1% (p-value).

으며 압력과 운전시간($X_1 \times X_3$)은 음의 효과로 종말상승속도 반응모델에 영향을 주었다($p \leq 0.007$). Table 5의 분산분석(Analysis of variance, ANOVA, 변량 분석)은 모델로부터의 변화가 잔류 오차와 관련된 것보다 현저히 변화를 주는지 아닌지를 보여 준다.[16] 모델의 평균 제곱과 잔류 오차 사이의 비율인 F 값의 비교를 통해 수행합니다.

제안된 모델이 실험 결과 좋은 예측 인자라면, 유의 수준 α 에서 모델의 특정 자유도에 대해 F 값은 F 분포의 표로 작성된 값보다 커야 한다. 높은 F 값은 운전 인자 파라미터의 변화가 버블 종말 상승속도 반응모델(Y)에 큰 변화를 일으킨다는 것을 나타낸다. Table 5의 F 값으로부터 1차항>순수 이차항>교호작용 순으로 모델에 큰 변화를 주는 것으로 나타났다. 특히 1차항에서는 펌프의 압력(X_1), 순수이차항은 운전시간(X_3^2) 그리고 교호작용에서는 펌프의 압력과 공기량

($X_1 \times X_2$)가 반응모델의 변화를 주도하였다.

3.2. 수정된 최적화 모델식 수립 및 등고선도

Table 4와 5로부터 회귀계수 평가와 분산분석을 1차항, 순수 이차항과 교호항에 대한 운전인자(X_1, X_2, X_3)의 반응모델에 대한 유의성을 검증 및 확인하였다. 식 (6)은 유의하지 않은 항을 제외시킨 최적화된 모델식을 구축하였다.

수정된 최적화된 모델식 (6)에 대한 운전변수의 주요 및 상호작용 효과를 설명하고 각 변수의 반응 수준과 실험 수준간의 관계를 시각화하기 위해 2차원 등고선도(Contour plot)를 Fig. 4에 제시되었다. 이 그래프는 나머지 두 변수를 변화시키고 한 변수의 중간 수준값을 고정시켜 반응값(TRV)을 해석하게 된다.

Fig. 4(a)은 운전시간(Operation time, X_3)을 1.75분 고정하여 펌프압력(Pressure, X_1)과 공기량(Airflow rate, X_2)을 변화시켜 얻은 마이크로

$$\begin{aligned}
 \text{TRV} &= 20.64 + 1.98 \text{ Pressure (bar)} - 9.302 \text{ Operation time (min)} \\
 (\text{cm/min}) &+ 0.712 \text{ Airflow rate (LPM)} \times \text{Airflow rate (LPM)} \\
 &+ 1.482 \text{ Operation time (min)} \times \text{Operation time (min)} \\
 &- 0.740 \text{ Pressure (bar)} \times \text{Airflow rate (LPM)} \\
 &+ 0.508 \text{ Pressure (bar)} \times \text{Operation time (min)}
 \end{aligned} \tag{6}$$

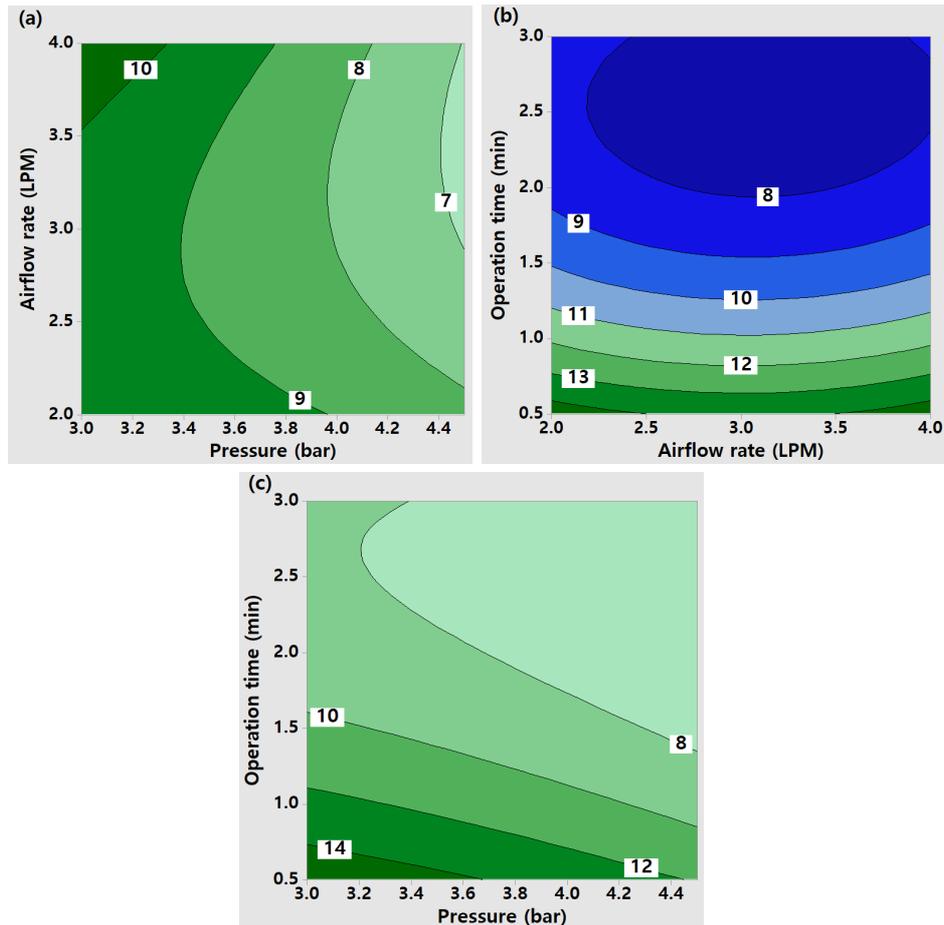


Fig. 4. 2D Contour plot of response Y (Terminal rise velocity, cm/min) showing interaction (a) between Pressure (bar)(X_1) and Airflow rate (LPM)(X_2) at fixed 1.75min of Operation time (min)(X_3). (b) between Airflow rate (LPM) and Operation time (min)(X_3) at fixed 3.75bar of Pressure (bar) (X_1), and (c) between Pressure (bar)(X_1) and Operation time (min)(X_3) at fixed 3LPM of Airflow rate (LPM)(X_2).

버블의 종말상승속도(Terminal rise velocity) 그래프이다. 초기 압력(Pressure, X_1)이 3bar에서 증가하면 할수록 공기량(Airflow rate, X_2)이 2LPM에서 증가할수록 마이크로버블의 종말 상승속도는 감소하였다. 펌프의 압력(Pressure, X_1)이 3.5bar, 공기량(Airflow rate, X_2)이 2LPM에서 액기비는 약 5.1%으로 측정되었다.

Fig. 4(a)에서 마이크로버블의 종말상승속도는 펌프압력(Pressure, X_1)이 3.5bar 보다 작거나 공기량(Airflow rate, X_2)은 3.5LPM일 경우 가장 높은 종말상승속도를 보였다. 즉 미세기포가 수중

에서 존재하는 시간이 수분 이내이다. 기포의 사멸속도는 직경과 관련이 있다고 볼 수 있고 결국 마이크로 버블의 소멸은 용해된 기체의 압력에 기인된다. 작은 기포는 더 높은 내부 압력을 가지며, 용액에서 압력을 받아 용해되는 가스는 방출하지만 용액에서 가스를 흡수함으로써 더 큰 기포가 성장한다.[17] 즉 작은 거품이 수축되고 큰 거품이 성장하여 수면으로 상승하거나 용해된다. 즉 마이크로버블의 사멸되는 시간이 작을수록 종말상승속도가 빨라지고 커질수록 감소하기 때문에 반비례 관계이다.

Fig. 4(b)은 펌프압력(Pressure, X_1)을 3.75bar 고정하여 공기량(Airflow rate, X_2)와 운전시간(Operation time, X_3)을 변화시켜 얻은 마이크로 버블의 종말상승속도(Terminal rise velocity) 그래프이다. 공기량(Airflow rate, X_2)이 증가하고 운전시간(Operation time, X_3)이 증가할수록 마이크로버블의 종말 상승속도(TRV)는 감소하였다. 본 연구에서 운전시간을 3분 이내로 설정한 이유는 전체 수조의 용량이 100L이고 펌프의 토출유량이 약 40LPM(L/min)으로 운전시간이 2.5분 정도면 수조내 미세기포의 발생량이 1cycle을 지나기 때문이다. Fig. 4(b)의 그래프 특이점은 공기량(Airflow rate, X_2)의 전범위 내에서 운전시간이 2분 이상일 경우 8cm/min으로 가장 낮은 종말 상승속도를 보였다. 결론은 공기량과 운전시간 사이에 상호작용이 거의 작용하지 않은 것으로 판단된다. 다만 Table 4와 5에서 보듯이 2차 곡선에서 공기량과 운전시간의 순수이차항은 매우 유의하였다.

Fig. 4(c)은 공기량(Airflow rate, X_2)을 3LPM 고정하고 펌프압력(Pressure, X_1)과 운전시간(Operation time, X_3)을 변화시켜 얻은 마이크로 버블의 종말상승속도(Terminal rise velocity) 그래프이다. 공기량(Airflow rate, X_2)이 증가하고 운전시간(Operation time, X_3)이 증가할수록 마이크로버블의 종말 상승속도(TRV)는 감소하였다. 하지만 운전시간(Operation time, X_3)이 1.5분 이상부터는 큰 변화가 나타나지 않았다.

3.3. 최적조건 수립

반응값(Y)을 최적화할 때는 최소화 및 최대값이 목표인지를 확인할 필요가 있다. 본 연구는 마이크로 버블의 종말상승속도(Terminal rise velocity)가 낮을수록 좋은 미세기포의 형성으로 보기 때문에 최적 반응이 낮을 때를 목표치 반응으로 하였다. 만족도 함수(Desirability function)는 매개 변수 최적화를 위해 가장 널리 사용되는 공학적인 응용 프로그램 중 하나이다.[18] 이 함수에 따라 모든 예측된 반응값을 측정된 성능 특

성이 무차원 만족도 값으로 변환시켜 최적조건을 산출할 수 있다. 반응에 대한 개인의 만족도(individual desirability)는 일변 변환 방법인 식 (7)에 의해 계산되고, 단변량 기술인 식 (8)을 사용하여 종합만족도 (overall desirability)로 정의 될 수 있다.

$$d_i = \begin{cases} 0 & Y_i \leq Y_{i-min} \\ \left[\frac{Y_i - Y_{i-min}}{Y_{i-max} - Y_{i-min}} \right]^r & Y_{i-min} < Y_i < Y_{i-max} \\ 0 & Y_i \geq Y_{i-max} \end{cases} \quad (7)$$

$$D = (d_1^{w_1} d_2^{w_2} d_3^{w_3} d_4^{w_4} d_5^{w_5})^{1/\sum w_i} \quad (8)$$

식 (7)와 (8)에 의해 Table 6와 같이 최적화 조건에서 목표치를 얻었다. Table 6에서 펌프압력(Pressure, X_1)이 4.5bar, 공기량(Airflow rate, X_2)이 3.3LPM 그리고 운전시간(Operation time, X_3)이 2.2분에서 최적의 마이크로버블의 종말상승속도(Terminal rise velocity)는 5.14 cm/min (85.7 μ m/sec)으로 나타났다. 종합만족도는 1이므로 매우 바람직한 최적화 조건을 얻을 수 있었다. Table 6의 결과는 입자를 띄우기 위한 부상 분리의 운전 및 설계 지표로 활용될 것으로 판단 된다.

3.4. 기포크기 측정 및 고찰

기포 크기와 농도를 연구를 보면 20~30 μ m의 범위에서 마이크로 버블을 가장 효율적으로 생성할 수 있는 작동 조건은 운전압력이 5bar으로 제시하였다.[19] 직경 2.5 μ m의 기포(약 0.2 mm/min)는 직경 25 μ m의 기포 (약 2.3 cm/min)보다 100배 더 느리게 상승한다고 보고하였다.[20] Table 6의 최적화된 마이크로버블의 종단속도 값을 Stokes 방정식에 단순 대입하여 계산하면 약 40 μ m 정도로 된다. 하지만 전부 40 μ m 크기를 대표하는 것이 아니다. 그 이유는 기포 직경 크기가 <25~50 μ m인 경우 버블은 부력 효과에 더하여 경쟁하기도 하고 작은 거품은 측

Table 6. Optimization conditions for response Y(Terminal rise velocity)

Pressure (bar)	Airflow rate (LPM)	Operation time (min)	Predicted TRV (cm/min)	Overall desirability
4.5	3.3	2.2	5.14	1

소되기 때문에 복잡한 마이크로 기포를 전체를 스캔하는 것이 어렵다.[21] 이런 복잡한 마이크로 버블의 영역에서 분포가 높은 대표적인 기포 직경을 측정하는 것이 중요하다. Fig. 5은 미세기포층의 깊이를 측정하기 위해 particle counter인 Laser Trac PC2400D(Chemtrac社, USA)를 사용하였다.

이 방법은 기포층과 물의 경계면에서 기포의 수가 급격히 줄어든다는 점에 착안하여 고안된 방법으로 육안으로 관찰되는 기포층의 경계면을 중심으로 particle counter를 상하로 이동하며 기포수를 측정하였다. 시료를 정량펌프로 분당 5ml를 채취하여 particle counter의 측정부로 주입한 후 레이저를 통해 빛이 입자에 부딪힐 때 빛은 회절되거나 산란하며 회절/산란의 강도 패턴은 입자 크기에 따라 분리하였다. 이 방법은 3회 측정값에 대한 평균치로 산출되었다. Fig. 5의 결과로부터 마이크로 버블의 직경분포도를 보면 2~5 μm 은 40%, 5~10 μm 은 5.8%, 10~15 μm 은 2.5%,

15~25 μm 은 7.9%, 25~50 μm 은 28.7%, 50~75 μm 은 11.9%, 75~100 μm 1.9%으로 나타났다. 마이크로버블 영역대에서는 2~5 μm 을 제외한 25~50 μm 분포가 가장 높았다.

마이크로 버블은 밀크(Milk) 형태로 눈으로 확인할 수 있으나 나노버블(Nano bubbles)은 눈으로 확인이 불가능하다. 하지만 Fig. 6와 같이 광산란 원리에 의해 측정되는 레이저 포인트를 활용하여 벌크 상태의 브라운 운동을 하는 나노버블을 쉽게 감지할 수 있다.[22] 본 연구에서는 밀크 타입의 마이크로버블이 완전히 사라진 뒤 10분 정지 후 조명을 완전히 불 끈 후 붉은색의 레이저 포인트로 나노버블의 산란된 상태를 측정하였다. Fig. 5(b)에서 Particle counter을 통해 1 μm 나노버블에 근접한 2-5 μm 기포 크기를 확인할 수 있었다. 나노크기의 측정은 입자추적 방법(Brownian motion tracking analysis method)과 나노와 마이크로 중간지점을 측정하는 전기적 감지측정(Electrical sensing zone method)을 이용할

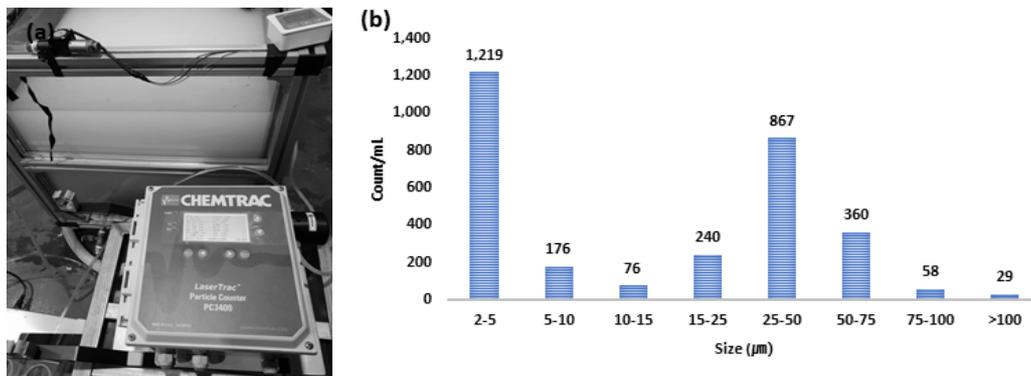


Fig. 5. Microbubbles size measurement using Laser Trac particle counter.



Fig. 6. Indirect Nanobubble measurement using Laser point.



Fig. 7. Dissolved oxygen measurement (a) DO meter in water tank (b) DO in injection with Air (b) DO in injection with pure oxygen.

수 있다. 따라서 Fig. 6의 간접측정 방법에 의해 확인된 나노버블은 향후 고성능 버블크기 측정장비를 이용하여 크기 분포와 거동 특성을 분석할 필요가 있다.

마이크로버블의 생성을 확인하는 중요한 특징 중 하나는 기체가 물에 얼마는 용해되어 용존되는 것이다. 많은 연구자가 다양한 마이크로버블 발생장치를 이용하여 물에서의 산소 전달 효율을 평가 하였다[23, 24]. 실험조건은 토출압력 4.5bar, 공기량 3.3LPM 및 운전시간 30분간 조건에서 용존산소량(Elmeiron, Co., Ltd)을 측정하였다. Fig. 7의 결과에서 산소를 공급한 O₂ 마이크로버블이 Air 마이크로버블 보다 용존된 산소 농도가 4.6배 증가하는 것으로 나타났다. 초기에 수도수의 4.5mg/L DO 농도에서 순산소를 마이크로버블 발생장치에 주입하여 측정한 결과 용존 산소농도가 과포되어 급속도로 40mg/L 이상으로 초과하였다. 산소와 공기의 용존산소농도는 최대 값까지 상승한 후에도 일정하게 유지되는 것을 관찰되었다. 이런 결과는 미세기포를 생성시 대기 중의 공기나 산소가 액체에 용존되면서 과포화되는 현상으로 판단된다[23, 24]

4. 결론

본 연구는 마이크로버블 종말상승속도(Terminal rise velocity)를 평가하기 위해 마이크로버블 발생장치의 3가지 운전인자(압력(Pressure, X₁), 공기량(Airflow rate, X₂), 운전시간(Operation time, X₃))을 실험 설계하여 경험적인 2차 다항식

모델을 구축하였다. 예측모델에 대한 적합도 분석을 통해 92.4%의 높은 결정계수(Adjusted R²) 값을 얻었다. 다중 회귀분석을 통해 1차항, 2차항의 순수이차와 교호작용에 대한 유의한 계수를 분석 평가하였다. 운전변수간의 교호작용 중 압력과 공기량(X₁×X₂) 그리고 압력과 운전시간(X₁×X₃)은 각각 양(Positive)과 음(Negative)의 효과로 반응모델에 영향을 주었다(p≤0.001, p≤0.007). 분산분석(ANOVA)을 통해 유의하지 않은 계수항을 제외한 최적화된 예측모델을 구축하였다. Desirability function 기술을 적용하여 마이크로버블의 종말상승속도의 최소값을 목표로 하는 최적화 조건을 수립하였다. 펌프압력(Pressure, X₁)이 4.5bar, 공기량(Airflow rate, X₂)이 3.3LPM 그리고 운전시간(Operation time, X₃)이 2.2분에서 최적의 마이크로버블의 종말상승속도는 5.14 cm/min (85.7μm/sec)을 얻었다. 종말상승속도는 5.14 cm/min을 Stokes 방정식에 의해 약 40μm 기포 직경을 얻을 수 있었고 particle counter를 통해 기포 직경크기 2~5μm와 25~50μm 분포가 가장 많았다. 또한 나노버블의 간접측정 방법인 레이저 포인터를 이용하여 나노크기를 확인하였다. 공기와 산소를 마이크로버블 발생장치에 주입한 결과 용존산소가 과포화되는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업(과제번호 : 18CTAP-C143623-01-000000)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1. R. Parmar, S. K. Majumder, "Microbubble generation and microbubble-aided transport process intensification—A state-of-the-art report", *Chemical Engineering and Processing*, Vol.64, pp. 79–97, (2013).
2. M. Alheshibri, J. Qian, M. Jehannin, V. S. J. Craig, "A history of nanobubbles", *Langmuir*, Vol.32, pp. 11,086–11,100, (2016).
3. N. Matsuki, T. Ishikawa, S. Ichiba, N. Shiba, Y. Ujike, T. Yamaguchi. "Oxygen supersaturated fluid using fine micro/nanobubbles". *Int J Nanomedicine*, Vol.9, pp. 4495–4505, (2014).
4. A. Agarwal, WJ. Ng, Y. Liu, "Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for watertreatment", *Chemosphere*, Vol.84, pp. 1175–80, (2011).
5. Z. Zhou, Xu, Zhenghe, J. A. Finch, J. H. Masliyah, R. S. Chow, "On the Role of Cavitation in Particle Collection in Flotation—A Critical Review II", *Miner. Eng.*, Vol.22, pp. 419–433, (2009).
6. K. Terasaka, A. Hirabayashi, T. Nishino, S. Fujioka, D. Kobayashi. "Development of microbubble aerator for waste water treatment using aerobic activated sludge". *Chem Eng Sci*, Vol.66, pp. 3172–3179, (2011).
7. T. Li, L. Guo, J. Zhao, X. Tang, Y. Zhu, "Optimization of micro-bubble aeration process for magnesium sulfite oxidation in desulphurization wastewater with response surface methodology", *Desalination and Water Treatment*, Vol.82, pp. 308–314, (2017).
8. M. W. Lim, E. V. Lau, P. E. Poh, "Optimization studies for the flotatation of bunker oil from contaminated sand using microbubbles", *J. Eng. Sci & Tech*, Vol.12, pp. 2046–2063, (2017).
9. R. Ahmadi, A. Khodadadi Darban, "Modeling and Optimization of Nano-bubble Generation Process Using Response Surface Methodology", *Int. J. Nanosci. Nanotechnol*, Vol.9, pp. 151–162, (2013).
10. A. Smolianski, H. Haario, P. Luukka, "Numerical study of dynamics of single bubbles and bubble swarms", *Applied Mathematical Modelling*, Vol.32, pp. 641–659, (2008).
11. M. Takahashi, "ζ potential of microbubbles in aqueous solutions: electrical properties of the gas-water interface", *J. Phys. Chem. B*, Vol.109, pp. 21858–21864, (2005).
12. R. Parmar, S. K. Majumder, "Microbubble generation and microbubble-aided transport process intensification – a state of-the-art report", *Chem. Eng. Process. Process Intensif*, Vol.64, 79–97, (2013).
13. Tsuge H. *Micro and Nanobubbles: Fundamentals and Applications*. P. 45–77, Pan Stanford Publishing, (2014).
14. A.Y Kim, S. K. Yoo, "Process Optimization of Meat Protein Hydrolysate of Ogae Wings by Response Surface Methodology and Its Characteristics Analysis", *J. of Korean Oil Chemists' Soc*, Vol.15. pp. 63–70, (2010).
15. Z. Pourkarimi, B. Rezai, M. Noaparast, "Effective parameters on generation of nanobubbles by cavitation method for froth flotation applications". *Physicochem. Probl. Miner. Process*, Vol.53, pp. 920–942, (2017).
16. I. H. Cho, K. D. Zoh, "Photocatalytic degradation of azo dye (Reactive Red 120) in TiO₂/UV system: Optimization and modeling using a response surface methodology (RSM) based on the central composite design", *Dyes and Pigments*, Vol.75, pp.533–543, (2007).
17. M. Takahashi, K. Chiba, P. Li, "Free-radical generation from collapsing microbubbles in the absence of a dynamic stimulus", *Japan Journal of Physical Chemistry B*, Vol.111, pp.1343–1347, (2007).

18. T. K. Trinh, L. S. Kang, “ Application of Response Surface Method as an Experimental Design to Optimize Coagulation Tests”, *Environ. Eng. Res*, Vol.15, pp. 63-70, (2010).
19. S. M. Lee, C. M. Jang. “Evaluation for the Numerical Model of a Micro-Bubble Pump”, *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol.27, pp. 121~126, (2016).
20. S. M. Walke and V. S. Sathe. “ Experimental study on comparison of rising velocity of bubbles and light weight particles in the bubble column”, *International Journal of Chem. Eng. Appl*, Vol.3, pp. 25-30, (2012).
21. E. Ruckenstein, “Nano dispersions of bubbles and oil drops in water”, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol.423, pp. 112-114, (2013).
22. M. Takahashi, K. Chiba, P. Li, “Free-radical generation from collapsing microbubbles in the absence of a dynamic stimulus”, *Japan Journal of Physical Chemistry B*, Vol.111, pp. 1343-1347, (2007).
23. T. Andinet, I. H. Kim, J. Y. Lee, “ Effect of microbubble generator operating parameters on oxygen transfer efficiency in water”, *Desalination and water treatment*, Vol.57, pp. 1-9, (2016).
24. H. Ikeura, H. Takahashi, F. Kobayashi, M. Sato, “Effects of microbubble generation methods and dissolved oxygen concentrations on growth of Japanese mustard spinach in hydroponic culture”. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, Vol.93, pp. 1-8, (2017).