

< 학술논문 >

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2015.39.10.817>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

오리피스 노즐 수직 2상 유동의 물질전달 특성[§]

김 동 준* · 양 희 천**†

* 전남대학교 자동차시스템공학과, ** 전남대학교 기계설계공학부

Mass Transfer Characteristics of Vertical Two-Phase Flows with Orifice Nozzle

Dong Jun Kim* and Hei Cheon Yang**†

* Dept. of Automotive System Engineering, Chonnam Nat'l Univ.,

** School of Mechanical Design Engineering, Chonnam Nat'l Univ.

(Received April 24, 2015 ; Revised July 10, 2015 ; Accepted July 27, 2015)

Key Words: Mass Transfer(물질전달), Orifice Nozzle(오리피스 노즐), Mass Ratio(질량비), Dissolved Oxygen(용존산소), Volumetric Oxygen Transfer Coefficient(총괄 산소전달 계수), Visualization Image(가시화 이미지)

초록: 본 논문은 수직 오리피스 노즐의 유동 및 물질전달 특성에 대한 실험적 연구를 목적으로 한다. 구동유체 및 부유체의 유량, 용존산소 농도 그리고 소비 전력을 측정하였으며, 고속 카메라를 이용한 직접 촬영 기법으로 수직 혼합유동의 가시화 이미지를 획득하였다. 측정자료를 이용하여 질량비, 총괄 산소전달 계수 그리고 물질전달 성능계수를 도출하였다. 구동압력이 증가하면 질량비는 약간 감소하는 반면에, 산소전달 계수와 소비전력은 증가하였다. 구동압력이 증가하고 질량비가 작아지면, 기포의 미세화가 촉진되고 확산도가 증대되기 때문에 산소 전달율이 증가하였다.

Abstract: Experiments were carried out to investigate the flow and mass transfer characteristics of an orifice nozzle. Measurements of primary and suction flow rates, dissolved oxygen concentration, and electric power were obtained. Vertically injected mixed-jet images were captured by a direct visualization technique with a high speed camera unit. The mass ratio, volumetric mass transfer coefficient, and mass transfer performance were calculated using the measured data. As the primary flow pressure increases, the mass ratio decreases slightly, while the volumetric mass transfer coefficient and electric power increase. As the primary flow pressure increases and the mass ratio decreases, the mass transfer rate increases because of the fine bubbles and wider distribution of the bubbles.

1. 서 론

미세기포 혼합유동의 활용기술은 수중 용존 농도를 높이기 위한 공정뿐만 아니라 부유 입자 형태의 이물질 제거를 위한 탁도제거 및 수질정화 공정에 이용된다. 수중 용존 산소를 향상은 각종 수생 동식물의 생존을 극대화 및 성장을 촉진에 따른 생산기간 단축으로 양식 및

수산업의 생산성을 높이는 데 기여할 수 있다. 또한 수질정화에 따른 수자원 이용효율 향상과 수처리 공정의 비용 절감이 가능하므로 미세기포 혼합유동 활용기술은 수환경 정화뿐만 아니라 건강 및 각종 세정분야까지 적용범위가 확대되고 있다.

미세기포를 이용한 수질정화 기술인 부상분리는 침전이 어렵거나 침전 시 2차 오염을 유발할 수 있는 물질을 분리하여 폐수를 정화하기 위한 공정에 사용되며, 해수담수화 공정과 같은 분야에서는 다양한 부유물질의 제거를 통해 후속 공정의 운전효율 향상과 운전시간 증대를 통해 전체 설비의 효율증대를 목적으로 이용된다^{(1,2)}}.

§ 이 논문은 2015년도 대한기계학회 열공학부문 춘계학술대회(2015. 4. 22-24., 부산과라다이스호텔) 발표논문임

† Corresponding Author, heyang@jnu.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

기포의 생성과 적용원리에 따라 다양하게 분류되는 부상분리 공정은 수처리 목적으로 가장 많이 응용되고 있으며, 2000년대 이후에는 건강 및 의약분야 등으로 활용범위가 다양해지고 있다.⁽²⁻⁴⁾

그러나 수처리 목적의 부상분리 공정에서 이용되고 있는 미세기포 발생기술들은 경제성 및 효율적인 측면의 고려가 필요하고, 건강 및 생명의료 분야에서는 미세기포가 미생물의 활성을 억제한다는 가설에 대한 검증이 필요한 것으로 지적되고 있다.⁽⁵⁾ 따라서 미세기포 활용 공정의 핵심기술인 미세기포 발생기술의 진보뿐만 아니라 미세기포 혼합유동의 유체역학적 특성 및 현상학적 거동에 대한 연구도 필요하다. 특히 수처리와 관련된 환경분야에서 용존산소의 제어를 위해 공기를 물속에 주입하는 폭기(aeration) 장치의 설계 및 운용에 지대한 영향을 미칠 수 있는 변수의 최적화를 위해서는 미세기포 혼합유동의 수력학적 특성과 물질전달 현상에 대한 연구가 필요하다.^(2,6)

수직 2상 유동은 혼합 및 물질전달 성능향상과 관련되어 산업계 및 환경분야에서 중요성이 지속적으로 증가하고 있으며, 오리피스 노즐뿐만 아니라 유사한 구동원리를 갖는 이젝터를 이용하여 2상간의 물질전달과 수력학적 특성에 대한 다양한 연구결과들이 발표되고 있다.⁽⁷⁻¹¹⁾ Zang 과 Zhu⁽⁷⁾는 환형 노즐에 의해 수직으로 분사되는 공기와 물 혼합유동의 기포 거동에 대해 음파도플러유속계 (Acoustic Doppler Velocimeter)를 이용한 실험적 연구를 수행하였으며, 정지 상태의 물에 분사되는 공기와 물 혼합유동의 기포거동 및 산소전달 특성에 대한 다양한 연구들에 대해 고찰하였다. Lima Neto 등⁽⁸⁾은 비교적 큰 물 탱크에 수직으로 분사되는 공기기포의 거동과 분사로 야기되는 유동구조에 미치는 노즐 형상의 영향을 규명하기 위한 연구를 수행하였으며, Lima Neto 등⁽⁹⁾은 기포의 체적분율과 레이놀드 수에 따른 기포 분류의 거동에 대한 연구를 수행하였다. Socolofsky 와 Adams⁽¹⁰⁾는 횡단유동에 수직으로 분사되는 다상 혼합유동에 가시화 기법을 적용하여 각 상의 분리거동에 대한 현상학적 특성과 실험관계식을 제시하는 연구결과를 발표하였다. Ashley 등⁽¹¹⁾은 산소 전달율에 미치는 오리피스 크기의 영향에 대한 실험적 연구를 통해 오리피스의 직경이 감소할수록 산소 전달율과 에너지 이용효율이 증가한다는 결과를 발표하였다.

그러나 혼합유동의 기포밀도가 커지면 측정 및 정량적 분석이 용이하지 않기 때문에 기존의 연구들은 혼합유동의 기포밀도가 크지 않은 경우가 대부분인 것으로 지적되고 있다.⁽¹²⁾ 또한 수처리 과정에서 기포 생성을 위한 폭기공정의 에너지 소비량이 전체 공정의 약 60~80% 정도에 이른다는 연구결과가 발표된바 있지만,⁽¹³⁾ 폭기공정의 에너지 소비율에 대한 정량적 연구는 많지 않은 실정이다.^(11,14,15) 따라서 본 연구는 상대적으로 기포밀도가 큰 수직 혼합유동의 유체역학적 거동과 물질전달 특성에 대한 실험적 연구를 목적으로 한다. 이와 같은 목적을 위해 오리피스 노즐의 설계사양과 유동변수에 따른 유동 및 가시화 거동과 산소전달 및 소비전력 특성을 규명하였다.

Table 1 Geometric specifications of orifice nozzles

	d_p	d_s	d_o	d_d	L_p	L_d	R_o	α
OE2	13	2	4.5	13	42	36	0.12	13.5
OE3	13	3	7.4	13	61	68	0.32	4.7
OE4	20	3	9	21	95	109	0.20	5.2
OE5	28	3	14	29	135	111	0.25	6.5

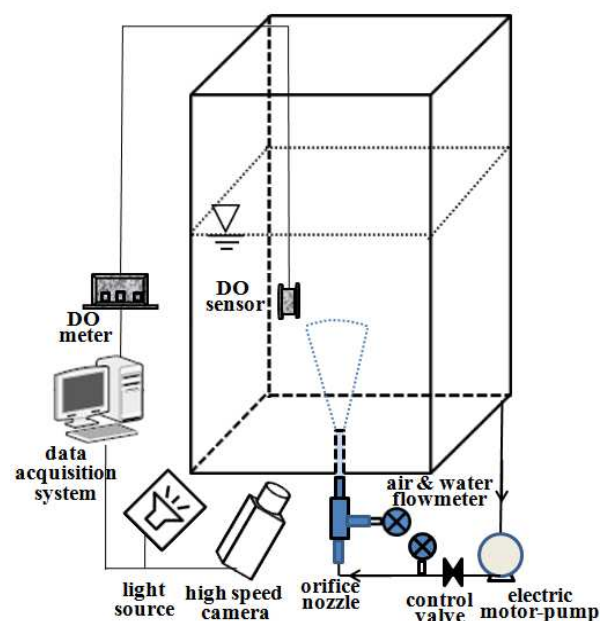


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

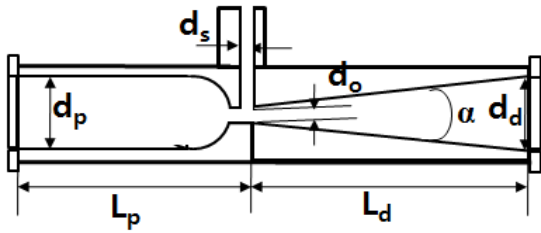


Fig. 2 Schematic diagram of an orifice nozzle

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1의 개략도에 나타난 실험장치는 전동 모터-펌프, 오리피스 노즐, 고속 카메라, 폭기 수조, 유량계 등으로 구성하였다.^(2,16) 5.5kW 용량의 3상 유동전동기(Wilo, H5504K1)와 일체화된 수직 다단펌프에 의해서 가압되는 구동유체인 물의 유량은 전동기의 회전수 제어를 통해 조절하며, 전자제어 유량계(Kometer, KTM-800)를 이용하여 측정하였다. 또한 대기중에 노출되어 부압부에서 발생하는 부압의 크기에 따라 자연 유입되는 공기량은 오리피스 공기유량계(Kometer, PPE-S)로 측정하였다. 전자제어 및 오리피스 유량계 정확도는 각각 $\pm 1.0\%$ 와 $\pm 2.0\%$ 이다. 약 0.45m^3 용량으로 순환, 폭기되는 구동유체인 물의 평균 온도는 약 12.0°C 이며, 오차범위는 $\pm 2.0^\circ\text{C}$ 정도로 측정되었다.

Fig. 2는 구동 및 부유체 유입부, 오리피스 목 그리고 디퓨저로 구성된 오리피스 노즐의 개략도를 나타내며,^(2,16) Table 1은 4가지 오리피스 노즐의 사양을 나타낸다. 여기서 식 (1)과 같이 정의되는 오리피스 목의 무차원 면적비(R_o)는 각각 0.12, 0.32, 0.2, 0.25이며, 디퓨저 출구각(α)은 각각 13.5° , 4.7° , 5.2° , 6.5° 의 사양을 갖는다. 오리피스 목의 면적비는 유량비에 영향을 미치는 중요한 설계변수이며, 디퓨저의 확대각은 2상 유동의 물질전달 특성에 대한 중요한 영향변수이다. 따라서 본 연구에서는 무차원 면적비와 디퓨저 출구각의 크기에 따른 유량비 차이를 고려하여 노즐 사양을 선정하였다.

$$R_o = \frac{d_o^2}{d_p^2} \quad (1)$$

2.2 실험방법

유동실험은 전동기와 일체화된 펌프를 가동하여

정상상태의 유동조건에 도달한 후에 실험변수에 따라 구동유체인 물과 부유체인 공기의 유량을 측정하는 과정으로 진행하였다.^(2,16) 측정된 구동유체와 부유체의 유량을 이용하여 이젝터의 중요한 성능변수로 식 (2)와 같이 정의되는 질량비(mass ratio)를 도출하였다.

$$M = \frac{Q_s}{Q_p} \quad (2)$$

여기서 Q_s 는 부유체의 체적유량, Q_p 는 구동유체의 체적유량을 나타낸다. 또한 구동유체의 가압에 소비되는 전력량은 제어 판넬에 도시되는 전압과 전류를 측정하여 식 (3)과 같이 도출하였다.

$$E_p [kW] = \eta_M \cdot V \cdot I \quad (3)$$

여기서 η_M 은 전동기 효율, V 는 전압 그리고 I 는 전류를 나타낸다.

아크릴로 제작된 수조에 분출된 혼합유동의 정성적 거동을 조사하기 위하여 수조의 밑면 중앙부에 위치한 오리피스 노즐 출구에서 분출되는 혼합유동의 가시화 이미지를 획득하였다. 정성적 가시화 이미지는 고속 카메라(Phantom Miro eX2)와 조명장치(ARRI)를 이용하여 초당 120프레임 (120fps)의 속도로 촬영하였으며,^(2,16) 이미지 분석시스템⁽¹⁷⁾의 영상 이원화(binartization) 기법⁽¹⁸⁾을 적용하여 분석하였다.

수직 혼합유동의 산소전달 특성의 검증을 위해 수조 밑면으로부터 30cm, 측벽 중앙으로부터 20cm 떨어진 지점에 위치한 용존산소 측정기를 이용하여 10 초 간격으로 용존산소 농도를 측정하였다. 실험에서는 수조에 순수한 수돗물을 채우고, 이론적인 반응식으로 계산된 아황산나트륨과 촉매를 첨가하여 탈산소화시키는 비정상 재폭기 방법을 이용하였으며,^(2,16,19,20) 산소 전달율은 총괄 산소 전달 계수와 산소 부족량의 함수로 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dC_t}{dt} = K_L a \cdot (C_{st} - C_t) \quad (4)$$

여기서 C_t 는 임의의 시간 t 에서 순간 용존산소 농도, C_{st} 는 포화 용존산소 농도이며, $K_L a$ 는 총괄 산소전달 계수를 나타낸다. 총괄 산소전달 계수는 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$K_L a [1/h] = \ln\left(\frac{C_{st} - C_o}{C_{st} - C_t}\right) / t \quad (5)$$

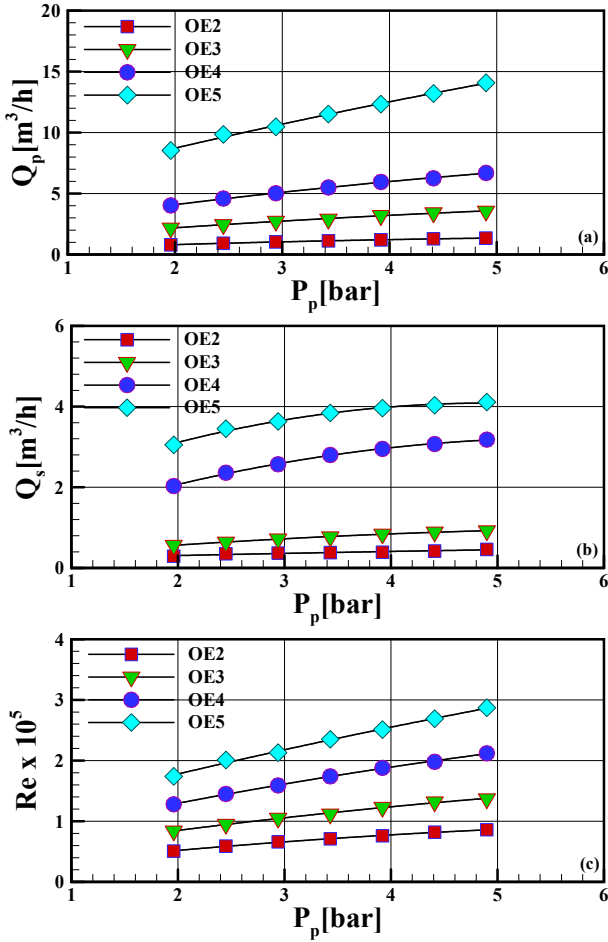


Fig. 3 Primary water flowrate(a), suction air flowrate(b) and Reynolds number(c) of OE2, OE3, OE4 and OE5 nozzles with primary flow pressure

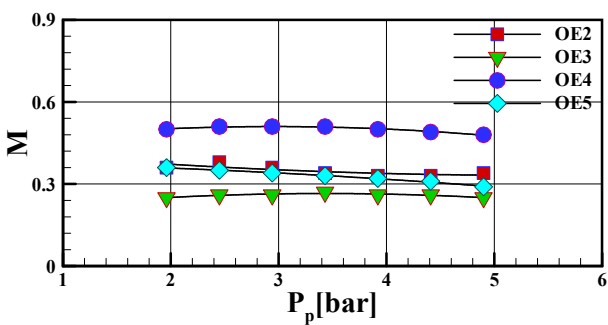


Fig. 4 Mass ratio of OE2, OE3, OE4 and OE5 nozzles with primary flow pressure

여기서 C_0 는 초기 조건에서의 용존산소 농도를 나타낸다. 한편 물질전달 성능계수(coefficient of mass transfer performance)는 식 (3)과 식 (5)를 이용하여 다음과 같이 계산된다.^(11,14)

$$E_m [1/kWh] = \frac{K_L a}{E_p} \quad (6)$$

3. 결과 및 고찰

Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)는 구동압력 변화에 따른 구동유체인 물과 부유체인 공기의 체적유량 변화를 나타낸다.⁽²⁾ 구동압력이 증가하면, 구동유체에 전달되는 에너지가 커지기 때문에 구동유체의 유량은 증가하며, 동일한 압력에서 구동유체 유입부 직경과 오리피스 목의 직경이 커지면, 유동저항 감소로 구동유체의 유량은 증가하게 된다. 또한 구동유체의 유량이 증가하면 오리피스 목에서 유속은 커지지만, 베르누이 원리에 의해 압력은 감소하게 된다. 즉, 부압이 커지기 때문에 유입되는 공기량이 증가하게 된다.⁽¹⁶⁾ 오리피스 목의 직경과 Fig. 3(a)의 구동유량 측정결과를 이용하여 산출한 Fig. 3(c)의 레이놀드 수는 각각의 노즐에서 $0.51\sim 0.86 \times 10^5$, $0.84\sim 1.37 \times 10^5$, $1.28\sim 2.12 \times 10^5$, $1.74\sim 2.87 \times 10^5$ 범위이며, 구동유체의 유량특성과 유사한 경향을 보이고 있다.

Fig. 4는 Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)의 결과를 이용하여 식 (2)에 의해 산출한 질량비 변화를 나타낸다. 구동압력이 증가하면, 구동유체와 부유체의 유량은 증가하지만 질량비는 약간 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 비압축성 구동유체인 물과 압축성 부유체인 공기의 유입특성 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 각각의 노즐에서 구동압력 증가에 따라 비압축성 유체인 물의 증가량에 비해서 압축성 유체인 공기의 증가량이 작고, 구동압력이 높아질수록 물의 증가율에 비해 공기의 증가율이 낮기 때문이다. 한편 구동유체 유입부와 오리피스 목의 직경이 커지면, 구동유체와 부유체의 유입량은 증가하지만 질량비는 오리피스 목의 무차원 면적비와 디퓨저 출구각의 크기에 따라 변하는 것을 알 수 있다. 오리피스 목의 면적비가 작아지면, 오리피스 목에서 구동유체의 출구속도 증가로 부압이 커지고, 디퓨저 출구각이 작아지면, 디퓨저 출구의 압력 회복을 감소로 부유체에 대한 견인력이 커지기 때문에 부유체의 유입량이 증가하게 된다. 따라서 본 연구결과에서는 면적비와 출구각이 두번째로 작은 OE4 노즐의 질량비가 평균적으로 약 0.5 정도로 가장 크게 나타났다. 이러한 결과는 Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)의 OE4와 OE5 노즐의 구동유체 유량에 대한 부유체의 유입을 비교를 통해서 확인할 수 있다. 즉, 면적비와 출구각이 상대적으로 큰 OE5 노즐의 구동유체 유입량은 OE4 노즐에 비해서 평균적으로 약 2.1배 정도 많지만 부유체인 공기의 유입량은 평균적으로 약 1.4배 정도 많아서 상대적으로 OE4 노즐의 공기 유입율이

크다는 것을 알 수 있다. 한편 확대각은 가장 작지만 면적비가 가장 큰 OE3 노즐의 질량비가 평균적으로 약 0.25 정도로 가장 낮고, 면적비 및 확대각의 증감비가 OE2 노즐과 거의 동일한 OE5 노즐의 질량비가 OE2 노즐에 비해 약 6% 정도 낮게 나타났다.

Fig. 5는 질량비가 가장 큰 OE4 노즐의 4가지 구동압력 조건에서 시간에 따른 백분율 용존산소 농도를 나타낸다. 구동유체인 물의 평균온도는 약 12.0℃이며, 이 온도에서 포화 용존산소 농도는 10.77mg/L이다. 구동유체의 압력이 증가하거나 폭기 시간이 길어지면, 용존산소 농도가 증가하는 것을 알 수 있다. 구동압력이 커지면, Fig. 3(c)와 Fig. 4에 나타난 것과 같이 레이놀드 수는 증가하고

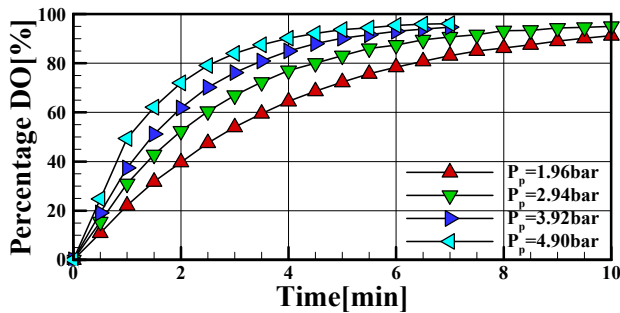


Fig. 5 Percentage dissolved oxygen concentration for primary flow pressure of OE4 nozzle with aeration time

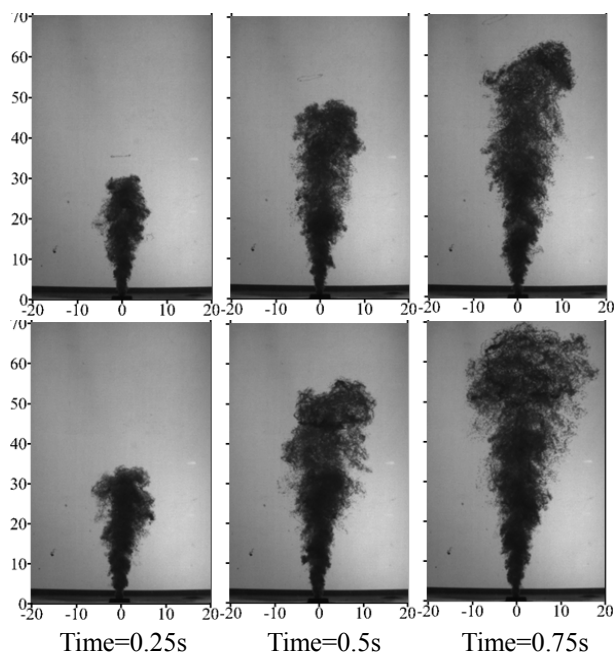


Fig. 6 Typical mixed flow images of OE4 nozzle at primary flow pressures 2.94 and 4.90bar with aeration times 0.25, 0.5 and 0.75s

질량비는 약간 감소하게 된다. 레이놀드 수가 커지면, Fig. 6의 가시화 이미지에서 확인할 수 있는 것과 같이 혼합유동 선단의 도달거리가 길어지게 된다. 질량비는 감소하고 레이놀드 수가 커지면, 구동유체로부터 유입 공기에 전달되는 전달력과 난류혼합의 효과가 커져서 공기기포의 미립화가 촉진되고 확산도가 증대된다. 선단의 도달거리가 길어지고 미립화 및 확산도가 증대되면, 구동유체와 기포의 접촉빈도가 증가하고 접촉면적이 넓어지기 때문에 용존산소 농도가 증가하는 것으로 판단된다. 또한 폭기 시간이 길어지면, 물과 공기기포의 접촉시간이 길어지기 때문에 용존산소 농도가 증가하게 된다.^(16,20,21) 폭기 시간에 따른 용존산소의 포화도를 정량적으로 고찰하면, 구동압력 증가에 따라 2분 경과 시에 약 40~70%, 4분 경과 시에는 약 65~90%의 포화도를 나타내었으며, 약 3분의 폭기 시간 동안 포화 용존산소량의 50% 이상이 용해되는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 용존산소 농도 측정결과를 이용하여 식 (5)에 의해 산출한 총괄 산소전달 계수를 나타낸다. 본 연구의 구동압력 범위에서 평균적인 레이놀드 수가 2.31×10^5 로 가장 크고, 평균적인 질량비는 약 0.33 정도로 상대적으로 낮은 OE5 노즐의 산소전달 계수가 평균적으로 약 15.1h^{-1} 로 가장 크게 나타났다. 이는 평균적인 산소전달 계수가 약 10.5h^{-1} 이고 질량비가 가장 큰 OE4 노즐에 비해 약 44% 정도 증가한 결과임을 알 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 8의 가시화 결과에서 유추할 수 있는 바와 같이 상대적으로 질량비는 낮고 레이놀드 수가 큰 OE5 노즐에서 전단작용과 난류혼합 효과가 크기 때문에 기포의 미세화가 촉진되고, 혼합유동의 확산도가 커지는 것에 기인한다. 미세화와 확산도가 증대되면, 부력이 작은 기포의 체류시간이 길어지고 접촉면적이

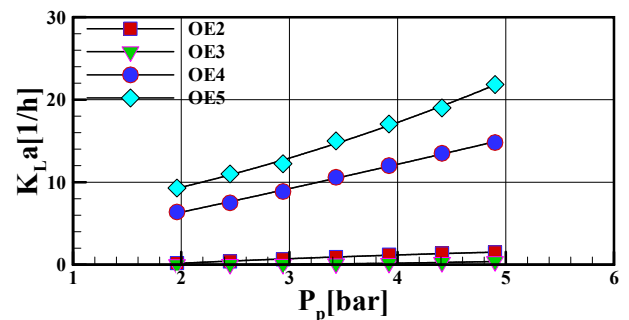


Fig. 7 Volumetric oxygen transfer coefficient of OE2, OE3, OE4 and OE5 nozzles with primary flow pressure

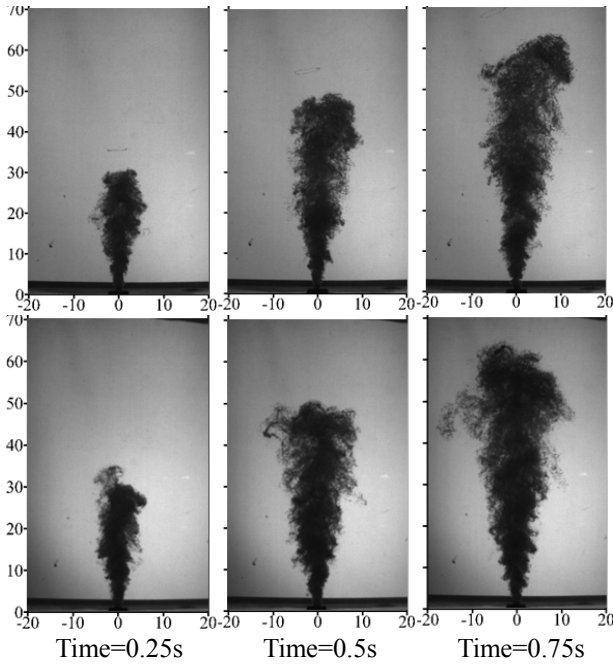


Fig. 8 Typical mixed flow images of OE4 and OE5 nozzles at primary flow pressure 2.94bar with aeration times 0.25, 0.5 and 0.75s

커지기 때문에 산소 전달율이 증가하게 된다. 또한 확산도 증가로 중심영역에서 이탈하는 미세기포는 상대적으로 용존산소 농도가 낮은 외주 영역의 구동유체와의 접촉빈도가 커지기 때문에 산소 전달율이 증대되는 것으로 사료된다. 한편 질량비도 낮고 레이놀드 수도 작은 OE2와 OE3 노즐의 산소전달 계수는 OE5 노즐의 약 6% 이하로 매우 낮게 나타났다.

Fig. 9는 측정된 전압 및 전류값을 이용하여 식 (3)에 의해 도출한 소비전력 변화를 나타낸다. 폭기 공정의 소비 에너지를 산출하기 위해 기존의 연구들^(14,15)에서는 베르누이 정리를 응용하는 간접적인 방법을 적용하였지만, 본 연구에서는 전동기 효율과 구동유체 유입에 소요되는 전압 및 전류를 직접 측정하여 산출하였다. 질량비는 상대적으로 낮지만 레이놀드 수가 가장 큰 OE5 노즐의 소비전력이 평균적으로 약 2.3kW로 가장 크고, 질량비가 가장 낮고 레이놀드 수가 상대적으로 낮은 OE3 노즐의 소비전력이 가장 낮게 나타났다. 산소 전달계수와 소비되는 전력을 정량적으로 비교하면, OE5 노즐의 산소 전달계수는 OE4 노즐에 비해서 약 44% 정도 높지만 소비전력은 약 96% 정도 커서 소비전력 증가율이 상대적으로 크게 나타났다. 반면에 OE2 노즐의 산소 전달계수는 OE4 노즐에 비해 약 92% 정도 낮지만 소비전력은 약 14% 정도 작아

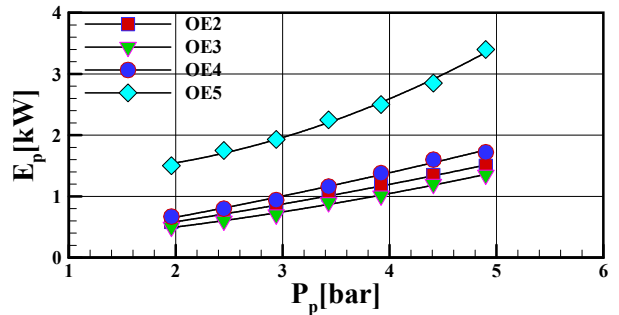


Fig. 9 Electric power of OE2, OE3, OE4 and OE5 nozzles with primary flow pressure

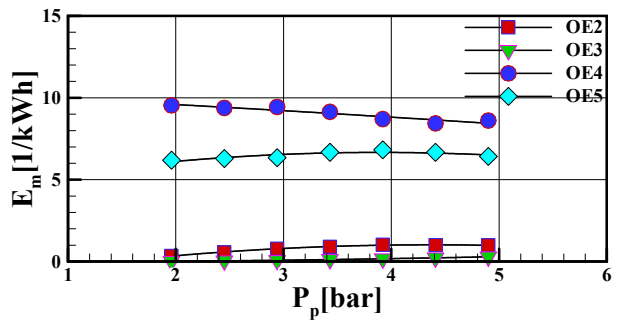


Fig. 10 Coefficient of mass transfer performance of OE2, OE3, OE4 and OE5 nozzles with primary flow pressure

서 소비전력 감소율이 상대적으로 적다는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 식 (6)과 같이 소비전력에 대한 산소전달 계수의 비로 정의되는 물질전달 성능계수를 나타낸다. 질량비가 가장 크고 레이놀드 수는 두 번째로 큰 OE4 노즐의 물질전달 성능계수가 평균적으로 약 9kW⁻¹h⁻¹로 가장 높게 나타났다. 반면에 평균적인 성능계수가 약 6.5kW⁻¹h⁻¹인 OE5 노즐은 질량비는 상대적으로 작고 레이놀드 수가 크기 때문에 산소 전달율은 가장 높지만, 구동유량이 많아서 전력 소비율이 많아지기 때문에 OE4 노즐에 비해서 물질전달 성능계수가 28% 정도 낮게 나타났다. 또한 OE2와 OE3 노즐은 OE4 노즐의 약 9% 이하로 성능계수가 매우 작다는 것을 알 수 있다. 결론적으로 고찰하면, 구동유량에 의해 산출된 레이놀드수가 크고 오리피스 목의 면적비와 디퓨저 출구각이 상대적으로 작은 사양의 물질전달 성능계수가 높게 나타났다. 이는 레이놀드수 증대에 따른 소비전력 증가율에 비해서 전단작용과 난류혼합 효과에 기인한 물질전달 증가율이 더 커지기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결 론

오리피스 노즐의 설계사양과 구동압력을 변수로 수직 혼합유동의 유동 및 가시화 거동과 물질전달 및 소비전력 특성에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 실험변수인 구동압력이 증가하면, 구동 및 부유체의 유량은 증가하지만 비압축성 구동유체와 압축성 부유체의 유입특성 차이에 기인하여 질량비는 약간 감소하였다. 구동유체 유입부와 오리피스 목의 직경이 커지면, 구동유체와 부유체의 유입량은 증가하지만 질량비는 오리피스 목의 면적비와 디퓨저 출구각의 크기에 따라 변하는데, 면적비와 출구각이 작은 설계사양에서 질량비가 커지는 것을 알 수 있다. 구동압력 증가로 레이놀드 수는 커지고 질량비가 작아지면, 2상 사이의 전단작용과 난류혼합 효과가 커져서 기포의 미세화가 촉진되고 확산도가 증대되기 때문에 산소 전달율이 증가하였다. 그러나 구동압력 증가에 따른 소비전력 증가율이 산소 전달율 증가량보다 커지면 물질전달 성능계수는 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 레이놀드수가 크고 오리피스 목의 면적비와 디퓨저 출구각이 상대적으로 작은 사양의 물질전달 성능계수가 높게 나타났다.

후 기

본 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2013R1A1A4A01010854).

참고문헌 (References)

- (1) Park, B., Woo, S., Park, S., Min, J., Lee, W., You, S. and Jun, G., 2013, "Simulation Study of DAF Flotation Basin Using CFD," *J. of KSWW*, Vol. 27, No. 2, pp. 261~272.
- (2) Kim, D. J., Park, S. K. and Yang, H. C., 2014, "A Visual Investigation on Vertical Mixed Flow with Orifice Nozzle," *Proceedings of 2014 KSME Fall Meeting*, KSME 14F-Tu01C004.
- (3) Rodrigues, R. T. and Rubio, J., 2007, "DAF-Dissolved Air Flotation: Potential Applications in the Mining and Mineral Processing Industry," *Int. J. Mineral Processing*, Vol. 82, No. 1, pp. 1~13.
- (4) Marui, T., 2013, "An Introduction to Micro/Nano-Bubbles and Their Applications," *Systemics, Cybernetics and Informatics*, Vol. 11, No. 4, pp. 68~73.
- (5) Kim, D. H., 2011, "Generation Mechanism and Application of Nano Bubble," *Weekly Construction Technology Trend, Lotte E & C Research Institute*, Vol. 134, EEEP-PL-7C-1110-646.
- (6) Lee, S. J., Ko, K. H., Ko, M. H., Yang, J. K. and Kim, Y. G., 2012, "Oxygen Transfer and Hydraulic Characteristics in Bubble Column Bioreactor Applied Fine Bubble Air Diffusing System," *J. Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 34, No. 11, pp. 772~779.
- (7) Zhang, W. and Zhu, D. Z., 2013, "Bubble Characteristics of Air-Water Bubbly Jets in Crossflow," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 55, pp. 156~171.
- (8) Lima Neto, I. E., Zhu, D. Z. and Rajaratnam, N., 2008, "Air Injection in Water with Different Nozzles," *J. Hydraulic Research*, Vol. 134, No. 4, pp. 283~294.
- (9) Lima Neto, I. E., Zhu D. Z. and Rajaratnam, N., 2008, "Bubbly Jets in Stagnant Water," *I. J. Multiphase Flow*, Vol. 34, pp. 1130~1141.
- (10) Socolofsky, S. A. and Adams, E. E., 2002, "Multi-Phase Plumes in Uniform and Stratified Crossflow," *J. Hydraulic Research*, Vol. 40, No. 6, pp. 661~672.
- (11) Ashley, K. I., Mavinic, D. S. and Hall, K. J., 1990, "Effects of Orifice Size and Surface Conditions on Oxygen Transfer in a Bench Scale Diffused Aeration System," *Environmental Technology*, Vol. 11, pp. 609~618.
- (12) Lima Neto, I. E., Zhu, D. Z. and Rajaratnam, N., 2008, "Horizontal Injection of Gas-Liquid Mixtures in a Tank," *J. Hydraulic Research*, Vol. 134, No. 12, pp. 1722~1731.
- (13) Levitsky, S. P., Grinis, L. N., Haddad, J. and Levitsky, M. P., 2005, "Water Oxygenation in an Experimental Aerator with Different Air/Water Interaction Patterns," *HAIT J. Science and Engineering B*, Vol. 2, pp. 242~253.
- (14) Fadavi, A. and Chisti, Y., 2005, "Gas-Liquid Mass Transfer in a Novel Forced Circulation Loop Reactor," *Chemical Engineering J.*, Vol. 112, pp. 73~80.
- (15) Gourich, B., Vial, C., Belhaj Soulami, M., Zoulalian, A. and Ziyad, M., 2008, "Comparison of Hydrodynamic and Mass Transfer Performances of an Emulsion Loop-Venturi Reactor in Cocurrent Downflow and Upflow Configuration," *Chemical Engineering J.*, Vol. 140, pp. 439~447.
- (16) Kim, D. J., Park, S. K. and Yang, H. C., 2015, "Mixed Flow and Oxygen Transfer Characteristics of Vertical Orifice Ejector," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 39, No. 1, pp. 61~69.
- (17) iworks FX User Guide, 2010, Nahwoo Trading Co..
- (18) Klein-Douwel, R. J. H., Frijters, P. J. M., Somers, L. M. T., de Boer, W. A. and Baert, R. S. G., 2007,

- "Macroscopic Diesel Fuel Spray Shadowgraphy Using High Speed Digital Imaging in a High Pressure Cell," *Fuel*, Vol. 86, pp. 1994~2007.
- (19) Chern, J.M. and Yang, S.P., 2003, "Oxygen Transfer Rate in a Coarse-Bubble Diffused Aeration System," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 42, pp. 6653~6660.
- (20) Park, S. K. and Yang, H. C., 2013, "Flow and Oxygen Transfer Characteristics in an Aeration System Using an Annular Nozzle Ejectors," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 52, pp. 1756~1763.
- (21) Park, S. K. and Yang, H. C., 2013, "Mixed Flow Characteristics of Aeration Process for Recirculation Aquaculture System Using Ejector," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 37, No. 9, pp. 847~854.