

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2016.40.4.237>

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

2 상 유동 및 물질전달 특성에 미치는 오리피스 노즐형상과 소요동력의 영향

양 희 천^{*†}

* 전남대학교 기계설계공학부

Effect of Orifice Nozzle Design and Input Power on Two-Phase Flow and Mass Transfer Characteristics

Hei Cheon Yang^{*†}

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

(Received October 31, 2015 ; Revised January 13, 2016 ; Accepted January 14, 2016)

Key Words: Two-Phase Flow(2상 유동), Mass Transfer(물질전달), Orifice Nozzle(오리피스 노즐), Input Power(소요동력), Aeration(폭기), Mass Ratio(유량비), Froude Number(프라우드 수)

초록: 호기성 수처리 과정의 폭기에 소요되는 에너지의 이용효율을 높이기 위해서는 물질전달 특성뿐만 아니라 소요동력에 대한 연구가 필요하다. 본 논문은 수직 2 상 유동 및 물질전달 특성에 미치는 오리피스 노즐형상과 소요동력의 영향에 대한 실험적 연구를 목적으로 한다. 측정 변수들을 이용하여 유량비, 소요동력, 물질전달 계수 그리고 물질전달 효율을 산출하였다. 소요동력이 커지면 물질전달 계수는 증가하는 반면에 유량비와 물질전달 효율은 감소하였다. 무차원 면적비가 작은 오리피스 노즐의 유량비, 물질전달 계수 및 효율이 높게 나타났다. 물질전달 특성에 미치는 유량비, 소요동력 그리고 프라우드 수의 영향을 평가하기 위한 실험식을 제시하였다.

Abstract: It is necessary to investigate the input power as well as the mass transfer characteristics of the aeration process in order to improve the energy efficiency of an aerobic water treatment. The objective of this study is to experimentally investigate the effect of orifice nozzle design and input power on the flow and mass transfer characteristics of a vertical two-phase flow. The mass ratio, input power, volumetric mass transfer coefficient, and mass transfer efficiency were calculated using the measured data. It was found that as the input power increases the volumetric mass transfer coefficient increases, while the mass ratio and mass transfer efficiency decrease. The mass ratio, volumetric mass transfer coefficient, and mass transfer efficiency were higher for the orifice configuration with a smaller orifice nozzle area ratio. An empirical correlation was proposed to estimate the effect of mass ratio, input power, and Froude number on the volumetric mass transfer coefficient.

1. 서 론

인구의 도시집중과 산업화로 인해 발생량이 증가하는 하·폐수의 물리·화학적 처리방법은 설비 투자비가 적고 처리속도가 빠르다는 장점이 있지만, 처리약품 비용 등으로 인해 운전비용이 증가하고 재처리 과정에서 발생하는 슬러지 등과 관련

하여 2차적인 환경오염을 유발하는 단점이 있다. 반면에 생물학적 처리기술은 미생물을 이용하여 오염물질을 환경에 무해한 성분으로 전환시키므로 2차 오염의 우려가 적어 생활하수의 2차 처리, 유기물을 함유한 산업폐수의 처리공정 등에 다양하게 활용되고 있다.⁽¹⁾

하·폐수의 생물학적 처리공정에서 범용적으로 이용되는 활성슬러지(activated sludge) 공법은 미생물의 군집이 호기적인(aerobic) 환경에서 유기성 오염물질을 무기물질로 안정화시키는 방법으

† Corresponding Author, hcyang@jnu.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

로 폭기(aeration) 설비가 반드시 필요하다. 이러한 미생물의 호기성 호흡을 이용하는 방법은 지속적인 산소공급의 필요성으로 인해 운전비용이 증가하며, 고농도 하·폐수 처리에서는 산소의 소모속도에 비해 산소 전달속도가 느리기 때문에 호기성 처리가 곤란해지는 문제점이 발생할 수 있다. 따라서 처리효율을 높이기 위해서는 산소의 적절한 공급으로 미생물의 농도를 높게 유지할 필요가 있다.⁽²⁾

또한 폭기 설비의 효율화는 하·폐수 처리장의 항구적인 과제이며, 폭기 공정의 에너지 소비량이 전체 공정의 에너지 소비량에서 점유하는 비중이 매우 높기 때문에 처리장의 에너지 절약 대책은 폭기 공정의 효율화와 직결된다고 할 수 있다.⁽³⁻⁵⁾ 따라서 산소전달 효율을 높일수록 설비의 운전에 필요한 에너지 소비량을 줄일 수 있기 때문에 폭기 공정의 산소전달 효율을 높여 처리효율을 극대화시키는 것이 경제적, 기술적인 측면에서 매우 중요하다.

한편 최근에 들어서 환경규제가 강화되고 에너지 가격의 상승으로 수처리 비용이 증가하는 추세이기 때문에 환경규제를 만족시키고 수처리 설비의 운전 비용을 절감할 수 있는 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 에너지 소비량이 많은 폭기 공정의 에너지 이용효율을 높이기 위해서는 물질전달 특성 뿐만 아니라 소요동력에 대한 보다 구체적인 연구가 필요하다. 그러나 소요동력에 대한 기존의 거의 대부분의 연구들은 베르누이 원리를 이용한 간접적인 방법으로 구동유체의 압송 또는 부유체의 압축에 필요한 수력학적 동력을 산출하였다.⁽⁶⁻⁹⁾

그러나 본 연구에서는 전동 모터-펌프의 구동에 필요한 전압과 전류를 직접 측정하여 수직 오리피스 노즐에서 구동유체의 압송에 소요되는 동력을 산출하였으며, 노즐의 설계형상과 소요동력이 2상 유동 및 물질전달 특성에 미치는 영향을 실험적으로 규명하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1의 개략도에 나타난 실험장치는 순환 수조, 전동 모터-펌프, 오리피스 노즐, 가시화 시스템, 제어 및 측정장치로 구성하였다.^(1,10,11) 전동 모터-펌프에 의해서 압송되는 구동유체인 물의 유량과 노즐 출구부에 형성된 부압에 의해 유입되는 부유체인 공기량은 각각 전자제어 유량계(Kometer, KTM-800)와 오리피스 공기유량계(Kometer, PPE-S)

Table 1 Geometric specification of orifice nozzles (unit: mm or deg)

	d_p	d_s	d_o	d_d	L_p	L_d	R_o	α
ON1	13	2	7.4	13	61	68	0.32	4.7
ON2	20	3	9	21	95	109	0.20	5.2
ON3	28	3	14	29	135	111	0.25	6.5

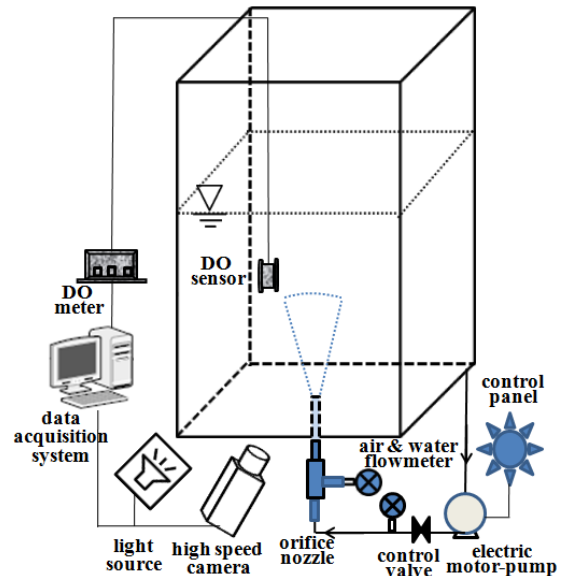


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

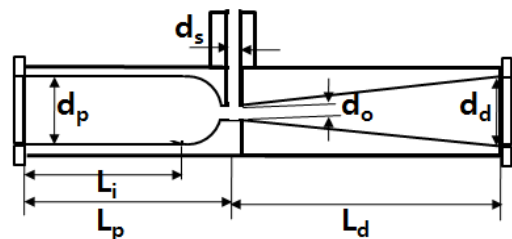


Fig. 2 Schematic diagram of orifice nozzle

를 이용하여 측정하였다. 전자제어 유량계와 오리피스 공기유량계 정확도는 $\pm 1.0\%$ 및 $\pm 2.0\%$ 이다.

Fig. 2는 구동 및 부유체 유입부, 오리피스 목 그리고 디퓨저부로 구성된 오리피스 노즐의 개략도, Table 1은 3종류의 오리피스 노즐의 사양을 나타낸다.^(1,11) 여기서 식 (1)과 같이 정의되는 오리피스 목의 무차원 면적비는 구동유체의 분사속도를 결정하는 변수로 유량비와 디퓨저부에서의 난류혼합에 영향을 미치는 중요한 설계변수이다. 따라서 본 연구에서는 무차원 면적비에 따른 유량비 차이를 고려하여 노즐 사양을 선정하였다.⁽¹¹⁾

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

여기서 $d_o(\text{mm})$ 와 $d_p(\text{mm})$ 는 오리피스 노즐 목과 구동유체 유입부의 직경을 나타낸다.

2.2 실험방법

유동실험은 모터-펌프가 정상상태에 도달한 후에 실험변수에 따라 구동 및 부유체의 유량을 측정하는 과정으로 진행하였다.^(1,10,11) 측정된 구동 및 부유체의 유량과 오리피스 목에서의 물성치를 이용하여 식 (2)와 식 (3)으로 정의되는 유량비 및 프라우드(Froude) 수를 도출하였다. 관성력에 대한 중력의 비로 정의되는 프라우드 수는 구동유체의 관성력과 부유체인 기포의 부력의 영향을 나타내는 변수이다.^(1,12)

$$M = \frac{Q_s}{Q_p} \tag{2}$$

$$Fr = \frac{U_p}{\sqrt{g'd_o}} \tag{3}$$

여기서 $Q_p(\text{m}^3/\text{h})$ 와 $Q_s(\text{m}^3/\text{h})$ 는 구동 및 부유체의 체적유량을 나타내며, $U_p(\text{m/s})$ 는 오리피스 목에서 구동유체의 유속, $g'(\text{m/s}^2)$ 는 수정된 중력가속도로 다음과 같이 주어진다.

$$g' = \frac{g(\rho_w - \rho_a)}{\rho_w} \tag{4}$$

여기서 $\rho_w(\text{kg/m}^3)$ 와 $\rho_a(\text{kg/m}^3)$ 는 각각 구동유체와 부유체의 밀도를 나타낸다.

또한 구동유체의 압송에 필요한 소요동력은 제어 관널에 도시되는 전압과 전류를 측정하여 식 (5)와 같이 도출하였다.^(1,11)

$$E_p[\text{kW}] = \eta_M \cdot V \cdot I \tag{5}$$

여기서 η_M 은 전동기 효율, $V(\text{V})$ 는 전압 그리고 $I(\text{A})$ 는 전류를 나타낸다.

아크릴로 제작된 수조에 분출된 2 상 유동의 정성적 가시화 이미지는 후면 조명조건에서 고속 카메라(Phantom Miro eX2)를 이용하여 초당 120 프레임 (120fps)의 속도로 촬영하였으며, 이미지 분석 시스템의 영상 이원화 기법을 이용하여 분석하였다.^(1,10,11)

물질전달 특성 실험에서는 0.96 m³ 용량의 순환 수조에 약 0.45 m³의 순수한 수돗물을 채우고, 이론적인 반응식으로 계산된 아황산나트륨과 촉매인

염화코발트를 주입하여 탈산소화시키는 비정상 재폭기 방법을 이용하였다.^(1,2,10,11,13) 비정상 재폭기는 탈산소화시킨 실험수에 공기나 순수산소를 주입하여 용존산소가 포화상태에 이르도록 폭기하는 공정이다. 산소 전달율은 총괄 물질전달 계수와 산소 부족량의 함수로 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dC_t}{dt} = K_L a \cdot (C_{st} - C_t) \tag{6}$$

여기서 $C_t(\text{mg/L})$ 는 임의의 시간 $t(\text{s})$ 에서 순간 용존 산소 농도, $C_{st}(\text{mg/L})$ 는 포화 용존산소 농도를 나타낸다. 총괄 물질전달 계수 $K_L a(1/\text{h})$ 은 식 (7)과 같이 계산할 수 있다.

$$K_L a = \ln\left(\frac{C_{st} - C_o}{C_{st} - C_t}\right) / t \tag{7}$$

여기서 $C_o(\text{mg/L})$ 는 초기의 용존산소 농도이다.

한편 소요동력 당 물질전달 계수의 비로 정의되는 물질전달 효율은 식 (5)과 식 (7)을 이용하여 다음과 같이 계산된다.^(1,8,11)

$$\eta_m = \frac{K_L a}{e_p} \tag{8}$$

여기서 비소요동력(specific input power)인 $e_p(\text{kW/m}^3)$ 는 구동유체의 단위체적당 소요동력으로 정의된다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3 은 제어밸브를 조절하여 구동압력을 동일한 간격으로 변화시키며 측정된 구동유체의 체적 유량에 따른 부유체의 체적유량 변화를 나타낸다. 구동압력이 증가하면 구동유체에 부가되는 에너지

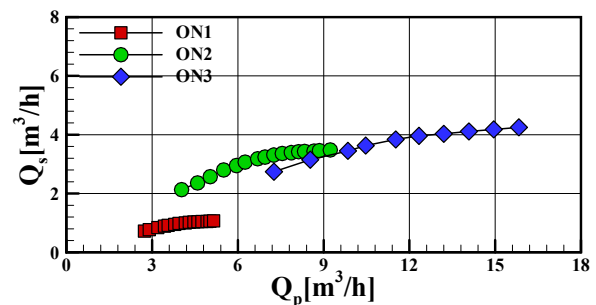


Fig. 3 Suction air flow rate with primary water flow rate

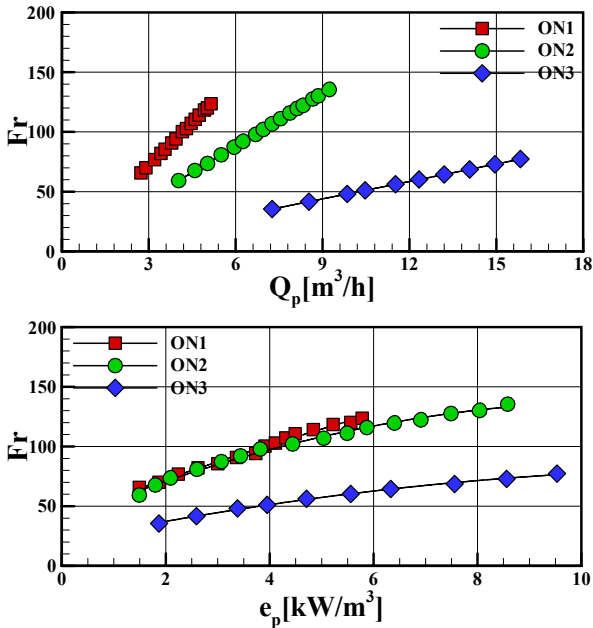


Fig. 4 Froude number with primary water flow rate and specific input power

가 커지기 때문에 구동유체의 유량은 증가하며, 구동유체의 유량이 증가하면 오리피스 목에서 구동유체의 유속이 증가하여 부압이 커지기 때문에 유입되는 공기량도 증가하게 된다. 본 연구의 실험범위에서 3 종류의 노즐에 대해 비압축성 구동유체의 유량은 평균적으로 약 1.88, 2.29, 2.18 배 정도 증가하는 반면에, 압축성 부유체인 공기의 유입량은 평균적으로 약 1.49, 1.63, 1.55 배 정도 증가하였다.

Fig. 4 는 오리피스 목에서의 유동 및 설계변수를 이용하여 산출한 프라우드 수를 구동유량과 소요동력의 함수로 나타낸 결과이다. 관성력에 대한 중력의 비로 정의되는 프라우드 수는 폭기 공정에서 난류혼합과 기포의 체류시간에 영향을 미치는 중요한 변수이다.⁽¹²⁾ 구동유량이 많아지거나 소요동력이 증가하면 오리피스 목에서의 유속증가에 기인하여 프라우드 수가 커지게 된다. 소요동력이 동일한 조건에서는 오리피스 목의 직경이 작은 경우의 프라우드 수가 커지는 것을 알 수 있다. 이는 동일한 소요동력 조건에서 오리피스 목의 직경이 작아지면 노즐의 출구속도가 커지기 때문이다. 한편 식 (9)과 같이 산출한 레이놀드 수는 각각의 노즐에서 1.05~1.98×10⁵, 1.28~2.92×10⁵ 및 1.48~3.22×10⁵의 범위로 난류유동임을 알 수 있다.

$$Re = \frac{d_o U_p}{\nu_w} \quad (9)$$

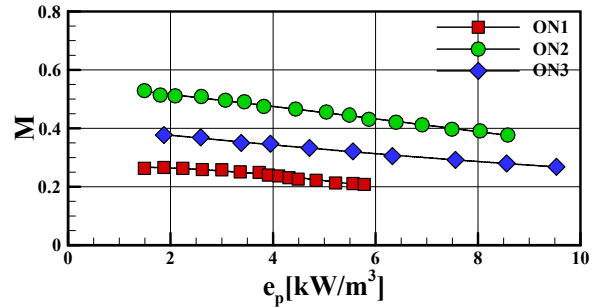


Fig. 5 Mass ratio with specific input power

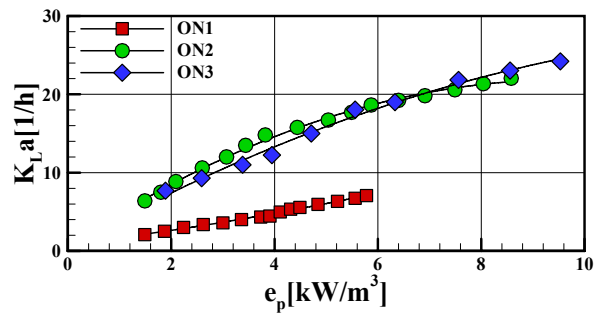


Fig. 6 Volumetric mass transfer coefficient with specific input power

Fig. 5는 소요동력에 따른 유량비 변화를 나타내는데, 소요동력이 증가하면 유량비가 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 4에서 유추할 수 있는 바와 같이 프라우드 수나 소요동력이 커지면 구동유량 증가로 노즐출구 속도가 커지기 때문에 부압이 증가하여 공기 유입량이 많아지게 된다. 그러나 Fig. 3에서 고찰한 것과 같이 부압의 증가에 기인하여 유입되는 압축성 공기의 증가량에 비해서 비압축성 구동유체의 증가량이 더 크기 때문에 유량비가 감소하는 것으로 판단된다.⁽¹¹⁾ 한편 노즐사양에 따른 유량비를 고찰하면, 오리피스 목의 무차원 면적비가 작은 ON2 노즐의 평균 유량비가 약 0.46로 가장 크게 나타났다. 이는 ON1 및 ON3 노즐에 비해서 약 90% 및 40% 정도 증가한 결과이며, 노즐 목의 무차원 면적비가 작아서 부유체에 대한 견인력이 커지기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 6은 소요동력에 따른 총괄 물질전달 계수 변화를 나타내는데, 소요동력이 증가하면 물질전달 계수는 증가하는 경향을 나타낸다. Fig. 4와 Fig. 5에서 고찰한 것과 같이 소요동력이 증가하면 프라우드 수는 증가하지만 유량비는 감소한다. 프라우드 수 증가는 오리피스 목에서 구동유체의 유속 증가에 기인하므로 소요동력이 커지면 난류혼합 효과가 증대되어 물질전달 저항이 감소하기 때문에 물질전달 계수가 증가하는 것으로 판단된다.

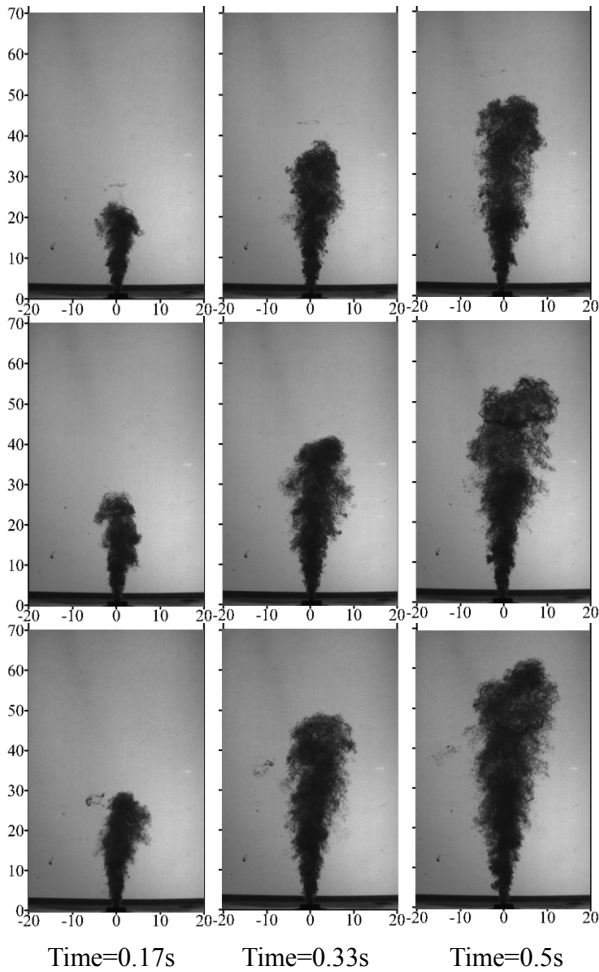


Fig. 7 Typical two-phase flow images of ON2 nozzle at specific input powers 0.94, 1.72 and 2.64kW/m³ with aeration times 0.17, 0.33 and 0.5s

또한 소요동력은 증가하고 유량비가 감소하면 기포의 미세화가 촉진되기 때문에 물질전달 계수가 증가하게 된다. ON2 노즐의 비소요동력이 0.94, 1.72, 2.64 kW/m³인 조건에서의 정성적 가시화 이미지를 나타내는 Fig. 7에서 확인할 수 있는 것과 같이 소요동력이 커지면 2상 유동의 선단 도달거리와 확산도가 증대된다. 소요동력이 증가하면 프라우드 수 증대로 구동유체로부터 기포에 전달되는 전달력과 난류혼합 효과가 커지기 때문에 기포의 미립화가 촉진되고 확산도가 증대되는 것으로 판단된다. 기포의 미립화와 확산도가 증대되면 물과 미세 기포의 접촉빈도 증가와 접촉면적 확대로 물질전달율이 증가하게 된다. 한편 수직 유동의 선단 도달거리 증가에 따른 기포의 체류시간 단축은 물질전달율 감소의 원인이 될 수 있다. 그러나 선단 도달거리 증대에 따른 물질전달율 감소효과보다 미립화 및 확산도 증대에 따른 물질전달율

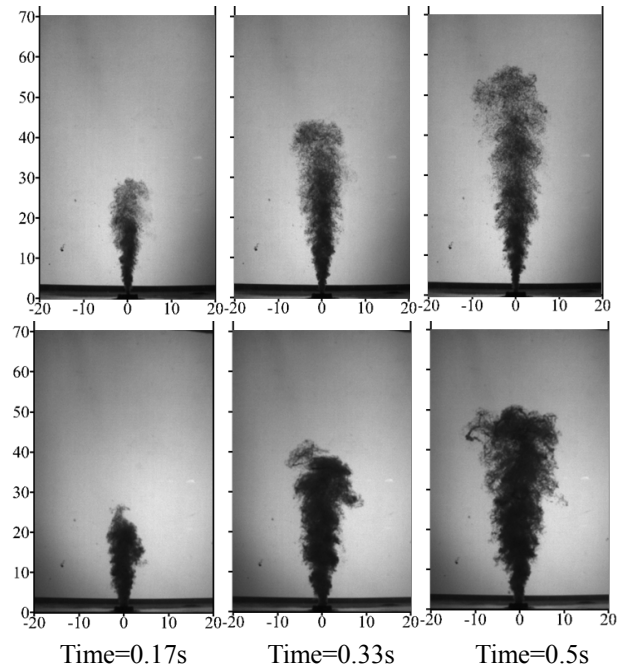


Fig. 8 Typical two-phase flow images of ON1 and ON3 nozzles at specific input power 1.8kW/m³ with aeration times 0.17, 0.33 and 0.5s

증대효과가 더 크기 때문에 소요동력이 커지면 물질전달 계수가 증가하는 것으로 사료된다. 비소요동력이 1.8 ~ 6 kW/m³인 조건에서 ON2 노즐의 평균적인 물질전달 계수는 약 13.6 h⁻¹이며, 이는 ON1과 ON3 노즐에 비해서 약 280%와 10% 정도 높은 결과임을 알 수 있다. 그러나 Fig. 4와 Fig. 5에서 고찰한 것과 같이 ON2 노즐은 ON3에 비해서 프라우드 수도 높고, 유량비도 40% 정도 크지만 물질전달 계수가 약 10% 정도 밖에 크지 않은 것은 공기중 산소의 낮은 용해성에 기인하는 것으로 판단된다.⁽²⁾ 한편 ON1과 ON3 노즐의 정성적 가시화 이미지를 도시한 Fig. 8의 결과로부터 유추할 수 있는 바와 같이 ON1 노즐에 비해서 ON3 노즐은 선단 도달거리는 짧고 확산도가 크기 때문에 물질전달 계수가 크게 나타나는 것으로 사료된다.

식 (10)과 Fig. 9는 총괄 물질전달 계수를 유량비, 소요동력 그리고 프라우드 수의 함수로 제시한 실험식을 나타낸다. 한편 Fig. 10에 도시한 것과 같이 제시한 실험식과 측정결과의 평균오차는 약 ±9%이며, 최대오차는 ±23% 정도로 나타났다.

$$K_L a = 147 \cdot M^{1.5} \cdot e_p^{1.4} \cdot Fr^{-0.7} \quad (10)$$

Fig. 11은 총괄 물질전달 계수에 대한 비소요동력의 비로 정의되는 물질전달 효율을 프라우드 수

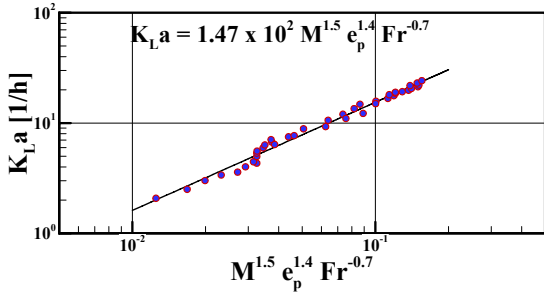


Fig. 9 Empirical correlation for volumetric mass transfer coefficient

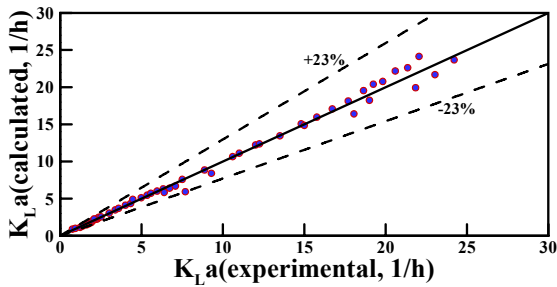


Fig. 10 Comparison of correlation data with experimental data

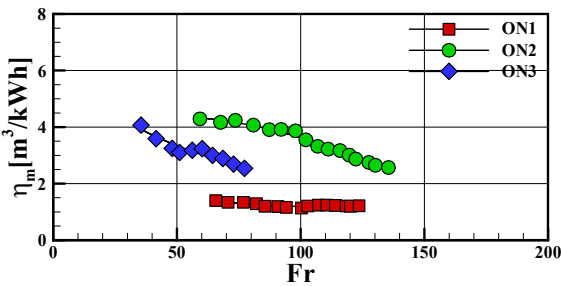


Fig. 11 Mass transfer efficiency with Froude number

의 함수로 나타낸 결과이다. 프라우드 수가 증가하면 물질전달 효율은 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 프라우드 수 증가에 기인한 물질전달 증가율보다 소요동력 증가율이 더 크기 때문인 것으로 사료된다. 즉, 프라우드 수 증가로 소요동력이 커지면 구동 및 부유체의 유입량도 많아지지만 공기 중 산소의 낮은 용해성으로 인해 소요동력의 증가율에 비해 물질전달 계수의 증가율이 낮기 때문이다. 본 연구의 실험범위에서 3종류 노즐의 평균적인 물질전달 효율은 각각 1.24, 3.47, 3.16 정도로 나타났으며, 동일한 프라우드 수 범위에서는 ON2 노즐의 물질전달 효율이 ON1과 ON3노즐에 비해서 약 3배 및 1.5배 정도 높게 나타났다.

4. 결 론

수직 2상 유동 및 물질전달 특성에 미치는 오리

피스 노즐의 설계형상과 소요동력의 영향에 대한 실험적 연구결과를 요약하면 다음과 같다. 소요동력이 커지면 구동 및 부유체의 유입량이 증가하지만 비압축성인 구동유체에 비해 압축성인 부유체의 유입량 증가율이 낮기 때문에 유량비는 감소하였다. 소요동력이 커지면 노즐 목에서의 구동유체 유속증가에 기인하여 전단력과 난류혼합 효과가 증대되어 물질전달 저항이 감소하기 때문에 물질전달 계수가 증가하였다. 또한 소요동력이 커지고 유량비가 감소하면 기포의 미세화 촉진과 확산도 증가에 기인하여 물질전달 계수가 증가하였다. 소요동력이 커지면 물질전달 계수의 증가율에 비해서 소요동력의 증가율이 크기 때문에 물질전달 효율은 감소하였다. 오리피스 목의 무차원 면적비가 작은 설계사양을 갖는 노즐의 유량비, 물질전달 계수 그리고 물질전달 효율이 높게 나타났다. 물질전달 특성에 미치는 유량비, 소요동력 그리고 프라우드 수의 영향을 평가하기 위한 실험식은 평균적으로 ±9%의 오차 범위에서 실험결과와 일치하였다.

후 기

이 논문은 2014 년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌 (References)

- (1) Kim, D. J., Peng, L. and Yang, H. C., 2015, "Effect of Input Power on Mass Transfer of Vertical Mixed Flow," *Proceedings of the KSME 2015 Fall Annual Meeting*, pp. 4059~4063
- (2) Park, S. K. and Yang, H. C., 2013, "Flow and Oxygen Transfer Characteristics in an Aeration System Using an Annular Nozzle Ejectors," *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 52, pp. 1756~1763.
- (3) Yoon, A. H., Bae, J. H., Lim, H. W., Jun, H. B. and Huh, T. Y., 2011, "Effects of Energy Input and Air Flow Rate on Oxygen Transfer Rate at Different MLVSS in a Jet Loop Reactor (JLR)," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, Vol. 33, No. 12, pp. 868~873.
- (4) Thakre, S. B., Bhuyar, L. B. and Deshmukh, S. J., 2008, "Effect of Different Configurations of Mechanical Aerators on Oxygen Transfer and Aeration Efficiency with respect to Power Consumption," *I. J. Aero. Mech. Eng.*, Vol. 2, No. 2, pp. 100~108.
- (5) 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. Sci. Eng.*, Vol. B2, No. 1-2, pp. 242~253.
- (6) Garcia-Ochoa, F. and Gomez, E., 2009, "Bioreactor Scale-up and Oxygen Transfer Rate in Microbial Processes: An Overview," *Biotechnol. Adv.*, Vol. 27, No. 2, pp. 153~176.
- (7) Gourich, B., El Azher, N., Vial, C., Belhaj Soulami, M., Ziyad, M. and Zoulalian, A., 2008, "Influence of Operating Conditions and Design Parameters on Hydrodynamics and Mass Transfer in an Emulsion Loop-Venturi Reactor," *Chem. Eng. Process.*, Vol. 46, No. 2, pp. 139~149.
- (8) Fadavi, A. and Chisti, Y., 2005, "Gas-Liquid Mass Transfer in a Novel Forced Circulation Loop Reactor," *Chem. Eng. J.*, Vol. 112, No. 1, pp. 73~80.
- (9) Cramers, P. H. M. R. and Beenackers, A. A. C. M., 2001, "Influence of the Ejector Configuration, Scale and the Gas Density on the Mass Transfer Characteristics of Gas-Liquid Ejectors," *Chem. Eng. J.*, Vol. 82, No. 1~3, pp. 131~141.
- (10) 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.
- (11) Kim, D. J. and Yang, H. C., 2015, "Mass Transfer Characteristics of Vertical Two-Phase Flows with Orifice Ejector," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 39, No. 10, pp. 817~824.
- (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) Chern, J. M. and Yang, S. P., 2003, "Oxygen Transfer Rate in a Coarse-Bubble Diffused Aeration System," *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 42, pp. 6653~6660.