

## 산소 전달 특성에 미치는 이젝터 구동 노즐 면적비에 따른 혼합 분류의 영향

박상규\* · 양희천†

### Effect of Mixed Jet with Primary Nozzle Area Ratio of Ejector on Oxygen Transfer Characteristics

Sang Kyoo Park and Hei Cheon Yang

**Key Words:** Oxygen transfer(산소 전달), Mixed jet(혼합 분류), Primary nozzle area ratio(구동 노즐 면적비), Air volume fraction(공기 체적 분율), Input power(소요 동력)

#### Abstract

The objective of this is to experimentally investigate the effect of mixed jet on the oxygen transfer characteristics with the primary nozzle area ratio of an annular nozzle ejector for the application of a microbial fuel cell. A direct visualization method with a high speed camera system was used to capture the horizontal mixed jet images, and a binarization technique was used to analyze the images. The clean water unsteady state technique was used for the oxygen transfer measurement. The air-water mixed jet discharging into a water tank behaved similar to a buoyancy or horizontal jet with the primary nozzle area ratio. It was found that an optimum primary nozzle area ratio was observed where the oxygen transfer performance reached its maximum value due to the decrease of air volume fraction and the increase of jet length and air bubble dispersion.

#### 기호설명

AR : 구동 노즐 출구 면적비  
C : 용존 산소 농도 (mg/l)  
d : 직경 (mm)  
e : 비 소요 동력 (kW/m<sup>3</sup>)  
H : 높이 (mm)  
I : 전류 (A)  
K<sub>L</sub>a : 총괄 물질 전달 계수 (1/s)

L : 길이 (mm)  
OTE : 산소 전달 효율 (kg O<sub>2</sub>/kJ)  
Q : 체적 유량 (m<sup>3</sup>/s)  
r : 반경 (mm)  
t : 경과 시간 (s)  
V : 체적 (m<sup>3</sup>) 또는 전압 (V)  
 $\alpha$  : 흡입실 축소각 (°)  
 $\beta$  : 디퓨저 확대각 (°)  
 $\varepsilon$  : 공기 체적 분율  
 $\theta$  : 부유체 유입관 끝단 외주각 (°)  
 $\rho$  : 밀도 (kg/m<sup>3</sup>)  
 $\eta_M$  : 모터 효율

(Received: 28 Jun 2022, Received in revised form: 4 Aug 2022, Accepted: 8 Aug 2022)

\*전남대학교 기계설계공학부

†책임저자, 회원, 전남대학교 기계설계공학부

E-mail : hcyang@jnu.ac.kr

TEL : (061)659-7223 FAX : (061)659-7220

#### 상·하첨자

d : 디퓨저

m	: 혼합관
n	: 구동 노즐
p	: 구동 유체 유입부 또는 구동 유체
s	: 부 유체 유입부 또는 부 유체
st	: 포화 조건
t	: 임의 시간
0	: 초기 조건

## 1. 서 론

용존 산소 (dissolved oxygen, DO)는 물의 오염상태를 나타내는 지표 중의 하나로 물속에 용해된 산소의 양을 의미한다. 물속의 미생물은 용해된 산소를 소비하여 유기물을 분해하기 때문에 오염도의 증가로 유기물이 많아지면 용존 산소가 부족하여 수중 생태계가 위협받게 된다. 또한 유기물의 분해가 너무 빨리 진행된다면 산소의 결핍과 더불어 혐기성 분해에 의해 유해 가스가 발생하므로 수질의 악화를 초래하게 된다. 수질오염의 대표적인 원인물질 중의 하나인 유기물은 인간이나 가축의 배설물, 생활하수, 산업현장의 유기성 폐수 등에 의하여 배출된다. 수처리 공정에서 대기와 접촉하고 있는 수표면에서의 자연적인 교란 방식에 의해 유기물의 분해에 필요한 적정량의 산소를 공급하는 것이 쉽지 않기 때문에 다양한 방식의 강제적인 산소 용존 기술이 보급되고 있다<sup>(1-4)</sup>.

최근에 들어서 산업의 발달과 도시의 팽창에 따른 에너지 수요 및 수질오염을 동시에 해결할 수 있는 기술에 대한 세계적인 관심이 증대되고 있다. 특히 에너지를 소비하는 오.폐수 및 슬러지의 처리공정에서 처리수에 존재하는 유기물을 이용하여 전기를 생산할 수 있는 재생에너지 기술인 미생물 연료전지(microbial fuel cells, MFC)에 대한 연구 및 개발 노력이 지속되고 있다. 미생물 연료전지는 전기 활성 미생물을 촉매로 이용하여 처리 대상에 포함된 유기물의 생화학적 에너지를 전기에너지로 변환함으로써 오.폐수 처리를 통한 수질개선과 신재생에너지의 이용 목적을 동시에 실현할 수 있다. 이러한 미생물 연료전지의 효율은 산화 전극에서 유기물의 산화율, 전기 활성 박테리아에 의한 전자 전달, 수소이온 전달, 환원 전극의 전자 수용체 농도 및 환원율 등 다양한 변수의 영향을 받는 것으로 알려지고 있다<sup>(5-7)</sup>.

Rago 등<sup>(8)</sup>은 미생물 연료전지 환원 전극의 성능 변수인 용존 산소의 영향을 규명하기 위하여 공기, 수중 그

리고 광합성 미생물을 대상으로 하는 연료전지 모드에서의 성능 특성에 대한 연구를 수행하였다. Tao 등<sup>(9)</sup>은 환원 전극의 용존 산소 농도가 미생물 연료전지의 성능과 인 및 질소 제거에 미치는 영향에 대한 연구를 통하여 용존 산소가 감소하면 최대 전압과 전력 밀도가 감소하였으며, 상대적으로 낮은 용존 산소 농도에서 질소 제거율이 높게 나타나는 것으로 보고하였다. Yu와 Lee<sup>(7)</sup>는 산화 전극의 기질로 초산염 (acetate)을 이용하고, 산소를 환원 전극의 수용체로 이용하는 단일 및 직렬 구조 미생물 연료전지 환원 전극의 용존 산소 농도에 따른 효율 특성에 대한 연구를 수행하였다. 그들은 용존 산소 농도가 미생물 연료전지의 설계 및 운전의 중요한 제어 인자임을 규명하였으며, 직렬 및 병렬 구조 연료전지의 전기 생산성에 대한 비교 결과를 제시하였다. Gil 등<sup>(10)</sup>은 pH, 전극, 용존 산소 농도 등의 다양한 구동조건에서 무매개체(mediator-less) 미생물 연료전지의 최적화를 위한 연구를 통해서 미생물 연료전지가 생화학적 산소요구량 (biochemical oxygen demand, BOD) 측정용 바이오센서로 활용 가능하다는 결과를 발표하였다. Olias 등<sup>(11)</sup>과 Zhang과 Angelidaki<sup>(12)</sup>은 수처리 공정의 생화학적 산소요구량을 현장에서 직접 측정할 수 있는 바이오센서로 이용 가능한 미생물 연료전지에 대한 연구를 수행하였다.

대기중의 산소는 미생물 연료전지의 전자수용체로 이용가능성이 높지만, 환원 속도가 느리기 때문에 산소가 불충분한 조건에서는 환원전극에서 전자의 소모가 제한될 수 있고, 산소가 과다하면 이온교환막을 통해 산화전극으로 이동하여 산화반응이 억제될 수 있다. 따라서 공기 주입에 의한 처리수의 용존 산소를 전자수용체로 이용하는 미생물 연료전지의 환원 전극 내 용존 산소 농도는 운전 성능의 중요한 변수로 인식되고 있다<sup>(7)</sup>. 또한 적절한 혼합 강도는 미생물 연료전지에서 기질 및 전해질 내 이온의 전달과 환원전극으로의 전자 수용체의 전달을 원활하게 하는 성능과 직결되는 변수로 알려지고 있다. 일반적으로 혼합 강도는 회분식(batch type) 연료전지 모드에서는 혼합 속도, 연속 운전식에서는 체류시간이나 공급 유량에 의해 결정된다. 그러나 You 등<sup>(13)</sup>의 공기환원전극 미생물 연료전지에서 산소의 체류시간에 대한 연구와 Chen 등<sup>(14)</sup>의 연속적 기질 주입과 환원 전극부 유출수 중 일부의 재순환 제어 연구 이외에는 관련 연구가 많지 않으며<sup>(15)</sup>, 용존 산소 농도에 대한 연속식 모드의 연구결과는 거의 보고된 바가 없는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 연속식 인라인 모드의 미생물

연료전지에 활용을 목적으로 유동 및 용존 산소 농도의 제어가 용이한 환형 노즐 이젝터의 구동 노즐 출구 면적비에 따른 분류 거동이 산소 전달 특성에 미치는 영향에 대한 실험적 연구를 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Figure 1의 개략도에 나타난 실험 장치는 전동 모터-펌프, 환형 노즐 이젝터, 산소 용존 수조, 용존 산소 측정기 및 유량계 등으로 구성된다. 이젝터에서 가압된 처리수가 1.46 m<sup>3</sup> (0.9 m × 1.8 m × 0.9 m) 용량의 수조를 통해서 시스템을 순환하도록 구성하였으며, 이젝터의 디퓨저 출구는 수조 밑면에서 20 cm 위쪽의 측면 중심부에 위치한다. 수조에 분출되는 혼합 분류의 가시화 이미지를 획득에는 고속 카메라(Phantom Miro eX2)와 1 kW 용량의 할로겐램프 조명시스템을 이용하였다. 모터-펌프에 의해서 가압되는 구동 유량과 노즐 출구에서 발생하는 부압에 의해 유입되는 공기량 계측을 위해 전자제어 및 오리피스 유량계를 구비하였다. 또한 용존 산소 농도 측정을 위해 디퓨저 출구 반대편의 수조 벽면에서

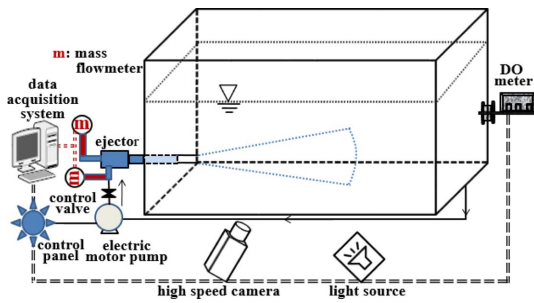


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

Table 1 Geometric parameters of an annular nozzle ejector

Parameter	Values
Primary flow inlet diameter, $d_p$ (mm)	26
Suction flow inlet diameter, $d_s$ (mm)	26
Mixing tube diameter, $d_m$ (mm)	26
Diffuser exit diameter, $d_d$ (mm)	35
Diffuser length, $L_d$ (mm)	130
Mixing tube length, $L_m$ (mm)	290
Suction chamber convergent angle, $\alpha$ (°)	59
Diffuser exit divergent angle, $\beta$ (°)	4
Suction tube tip outer annular angle, $\theta$ (°)	5.2

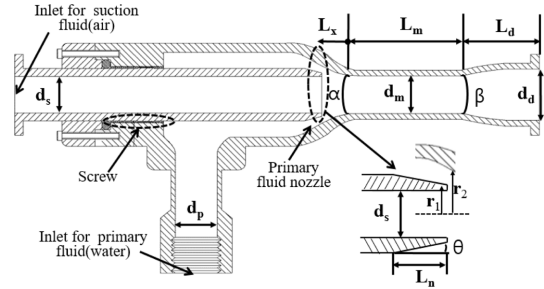


Fig. 2 Schematic diagram of an annular nozzle ejector

10 cm, 수표면으로부터 30 cm 지점에 용존 산소 측정기를 위치시켰다<sup>(16,17)</sup>.

Figure 2는 환형 노즐 이젝터의 개략도이며, Table 1은 이젝터 각부의 사양을 나타낸다. 이젝터는 환형 구동 노즐, 흡입실, 혼합관, 디퓨저 그리고 노즐의 위치 변화를 위한 스크류로 구성된다. 흡입실 축소각 ( $\alpha$ )은 59°, 디퓨저 확대각 ( $\beta$ )은 4° 그리고 부유체 유입관의 끝단 외주각 ( $\theta$ )은 5.2°로 제작하였다<sup>(16,17)</sup>. 스크류의 조절로 구동 노즐의 출구 위치  $L_x$ 가 변하면, 부유체 유입관 끝단의 외주 반경  $r_1$ 과 흡입실 축소부 내부 반경  $r_2$ 가 변하여  $d_n = 2(r_2 - r_1)$ 로 정의되는 구동 노즐의 수력학적 직경이 변하게 된다. 본 연구에서는 (1)식과 같이 정의되는 구동 노즐의 무차원 출구 면적비 범위를 0.061~0.289로 설정하였다.

$$AR_n = \frac{d_n^2}{d_m^2} \quad (1)$$

### 2.2 실험방법

유동실험에서는 모터-펌프가 정상상태에 도달한 후에 전압 ( $V$ ) 및 전류 ( $I$ )와 구동 및 부유체의 체적 유량 ( $Q_p$ ,  $Q_s$ )을 측정하였다. 유량계는 각각  $\pm 1.0\%$ 와  $\pm 2.0\%$ 의 정량적 측정 오차를 나타낸다. 측정된 전압 및 전류를 이용하여 (2)식과 같이 비 소요 동력 (specific input power)을 도출하였다<sup>(1,16-19)</sup>.

$$e = \frac{\eta_M \times V \times I}{V_p} \quad (2)$$

여기서  $\eta_M$ 은 전동 모터의 효율,  $V_p$ 는 구동노즐 개도에 따른 구동 유체의 체적을 나타낸다. 또한 구동 및 부유체의 체적 유량을 이용하여 공기의 체적 분율 (volume fraction)을 산출하였다<sup>(2,16-19)</sup>.

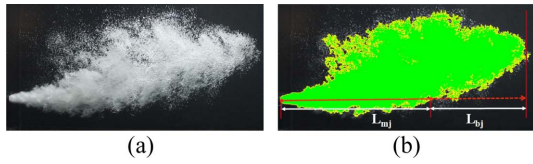


Fig. 3 Visualization (a) and binarization (b) images

$$\varepsilon = \frac{Q_s}{Q_p + Q_s} \quad (3)$$

한편 전면 조명조건에서 초당 120프레임 (120 fps)의 속도로 수조에 분출된 혼합 분류의 가시화 이미지를 획득하고, 이미지 분석시스템의 영상 이원화 기법을 이용하여 분석하였다. 이미지 분석을 통해 Fig. 3(b)와 같이 운동량 분류 길이 ( $L_{mj}$ )를 디퓨저 출구 중심선과 분류 경계의 교차점까지 거리, 분류 선단 도달 길이 ( $L_f$ )는 운동량 및 부력 분류 길이 ( $L_{bj}$ )의 합으로 정의하였다<sup>(2,16,17)</sup>.

산소 용존 실험에서는 이론 반응식을 이용하여 계산된 아황산나트륨과 촉매인 염화코발트를 투입하여 초기의 수돗물에 용존된 산소를 제거한 후에 공기를 주입하여 산소를 포화시키는 방법을 이용하였다. 경과 시간에 따른 용존 산소 농도는 10초 간격으로 측정하였다. 산소 전달율은 총괄 산소 전달 계수와 산소 전달의 구동력인 산소 부족량의 함수로 (4)식과 같이 주어지며, 총괄 산소 전달 계수 ( $K_La$ )는 (5)식으로 계산된다<sup>(1,16,19)</sup>.

$$\frac{dC_L}{dt} = K_La \times (C_{st} - C_L) \quad (4)$$

$$K_La = \ln\left(\frac{C_{st} - C_0}{C_{st} - C_L}\right) / t \quad (5)$$

여기서  $C_L$ 와  $C_{st}$ 는 경과 시간에 따라 측정된 용존 산소 농도와 23.5°C인 물의 포화 용존 산소 농도(8.48 mg/l)를 나타내며,  $C_0$ 는 물의 초기 용존 산소 농도를 나타낸다. 한편 비 소요 동력에 대한 산소 전달 계수와 포화 용존 산소 농도의 곱의 비로 정의되는 산소 전달 효율(oxygen transfer efficiency, OTE)은 (6)식과 같이 계산된다<sup>(20)</sup>.

$$OTE = \frac{K_La}{e} \times C_{st} \quad (6)$$

한편 산소 전달 계수 및 효율의 불확도 분석을 위해 유량 및 소요동력에 대해 3회의 반복 실험을 수행하였으며, 유량 및 소요동력의 실험 표준편차 (s)를 근거로

$\pm 2s$ 에 해당하는 95%의 신뢰 구간을 나타내는 error bar 를 도시하였다<sup>(21)</sup>.

### 3. 결과 및 고찰

Figure 4는 환형 구동 노즐의 개도에 따라 분출되는 구동 유체의 체적당 소요 동력인 비 소요 동력의 변화를 면적비의 함수로 나타낸 결과이다. 구동 노즐의 개도 확대에 면적비가 커지면 비 소요 동력이 감소하는 것을 알 수 있다. 개도가 확대되면 구동 유량이 많아지기 때문에 소요되는 동력은 증가하지만 개도 확대에 따른 소요 동력의 증가율에 비해서 구동 유량의 증가율이 더 커지기 때문에 비 소요 동력이 감소하는 것으로 판단된다. 한편 구동 노즐의 개도 감소로 면적비가 작아지면 구동 노즐의 위치가 혼합관 입구에 근접하게 되므로 구동 유체의 유동 저항의 증가에 기인하여 비 소요 동력이 커지게 되는 것으로 사료된다.

Figure 5는 구동 노즐의 면적비에 따른 유입 공기의 체적 분율을 나타낸다. 면적비가 커지면 구동 노즐의 유로가 확대되고, 흡입실 축소부의 유동 저항 감소로 구동 유량은 증가하게 된다. 그러나 구동 노즐 유로의 확대율과 구동 유량의 증대율에 기인한 부압의 변화에 따라 자연 유입되는 공기량의 증가율이 구동 유량의 증가율보다

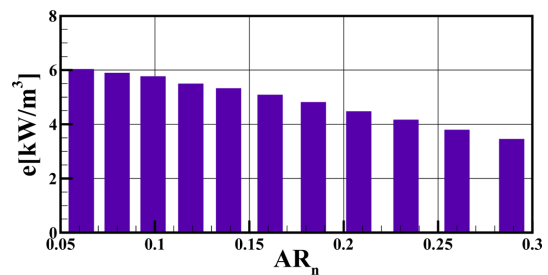


Fig. 4 Specific input power with primary nozzle area ratio

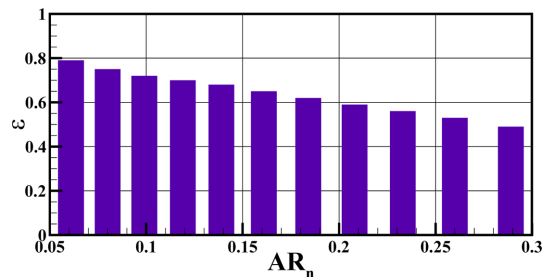


Fig. 5 Air volume fraction with primary nozzle area ratio

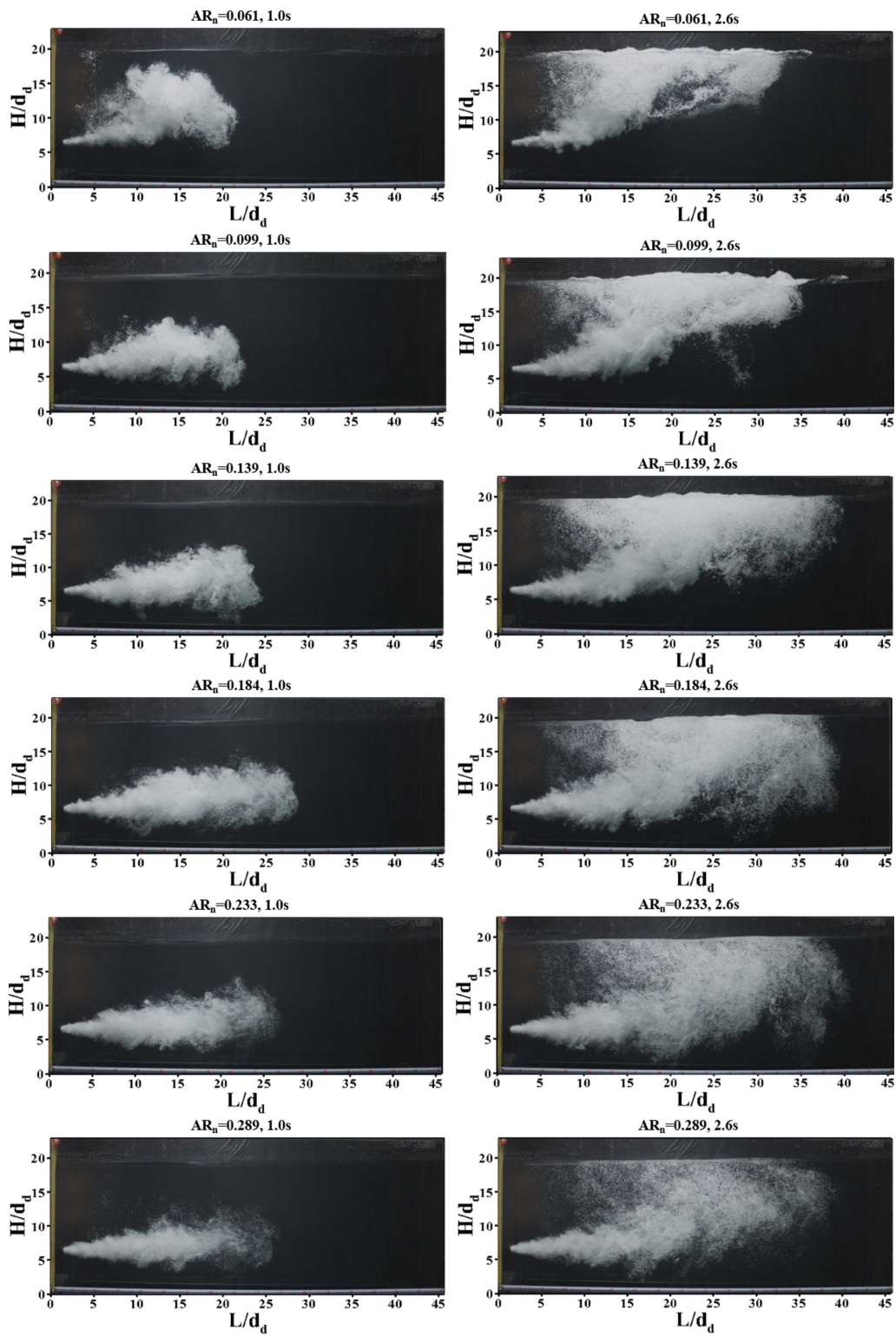


Fig. 6 Typical images of mixed jet with primary nozzle area ratio and aeration time

작기 때문에 체적 분율이 감소하는 것으로 판단된다.

Figure 6은 구동 노즐 면적비에 따라 수조에 분출되는 혼합 분류의 경과 시간 1.0과 2.6초에서의 이미지를 디퓨저 출구 직경으로 무차원화한 수조 길이 ( $L/d_d$ )와 높이 ( $H/d_d$ )를 변수로 나타낸 결과이다. 면적비가 작아지면 부력 분류의 거동이 나타나고, 면적비 증대에 따라 수평 분류로 천이 되는 것을 경과 시간 1.0초의 결과를 통해 확인할 수 있다. 작은 면적비에서의 부력 분류의 거동은 면적비에 따른 공기의 체적 분율을 도시한 Fig. 5의 결과를 통해서 유추할 수 있다. 이는 면적비가 작아질수록 유입 공기의 체적 분율이 커지므로 상대적으로 많은 공기가 유입되지만 이젝터내에서 기포의 미세화 부족에 따른 크기가 큰 기포로 인한 부력의 증대 때문인 것으로 사료된다. 한편 면적비 증대에 따른 수평 분류 거동은 구동 유량에 비해 상대적으로 작은 공기 유입으로 미세화가 촉진되어 기포의 부력의 영향이 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 한편 면적비가 작아질수록 부력 분류의 거동으로 인해 수표면으로 부상되는 분류 선단이 공기와의 불연속 경계면에서 요동 (sloshing motion)을 수반하는 수평유동으로 전환되는 강도가 커지는 것을 경과 시간 2.6초의 결과를 통해 확인할 수 있다. 또한 면적비가 커지면 수평 분류의 거동에 기인하여 분류 선단의 확산도가 증대되기 때문에 미세화된 기포

의 분포도가 넓어지는 것을 알 수 있다.

Figure 7은 가시화 이미지를 영상 이원화 기법으로 분석하여 디퓨저 출구 직경으로 무차원화한 운동량 분류 길이 ( $L_m/d_d$ )와 분류 선단 도달 길이 ( $L_r/d_d$ )를 경과 시간의 함수로 정량화한 결과를 나타낸다. 구동 노즐 면적비가 커지면 운동량 분류의 지속 시간은 0.8초에서 약 1.6초까지 증가하였으며, 동일한 경과 시간의 운동량 분류 길이는 면적비  $AR_n=0.184$ 까지 증가 한 후 감소하는 것을 알 수 있다. 동일한 경과 시간의 분류 선단 도달 길이 또한 운동량 분류 길이와 마찬가지로 면적비에 따라 증가 후 감소하였으며, 면적비에 따른 분류 선단 도달 길이의 편차도 경과 시간에 따라 증가 후 감소하였다. 경과 시간에 따른 선단 도달 길이 편차의 감소는 Fig. 6의 가시화 이미지에서 확인할 수 있는 것과 같이 부력 분류 거동에서는 수표면에서의 요동에 따른 수평 유동으로 전환과 수평 분류 거동에서는 선단의 확산도 증대에 기인하는 것으로 사료된다.

Figure 8은 총괄 산소 전달 계수의 변화를 구동 노즐 면적비의 함수로 나타낸 결과로, 면적비가 커지면 전달 계수가 증가 후 감소하는 경향을 나타낸다. 산소 전달 계수가 최대가 되는 면적비  $AR_n=0.184$ 까지의 전달 계수의 증가는 Fig. 5에 도시한 것과 같은 공기의 체적 분율 감소와 Fig. 6에서 기술한 것과 같은 부력 분류에서 수평 분류로의 천이에 따른 운동량 분류 길이 증가와 분류 선단 도달 길이 및 확산도 증대에 기인하는 것으로 판단된다. 체적 분율 감소로 기포의 미세화가 촉진되면 처리수와의 접촉 면적이 확대되어 전달 계수가 증가한다. 기포의 미세화에 따른 수평 분류의 거동은 기포의 수중 체류 시간을 증대시켜 산소의 용존 시간을 크게 하고, 선단 도달 길이와 확산도의 증대는 기포와 처리수의 접촉 시간을 크게 할뿐만 아니라 새로운 기-액 계면의 형성을 촉진하여 접촉 면적을 증대시키기 때문에 전

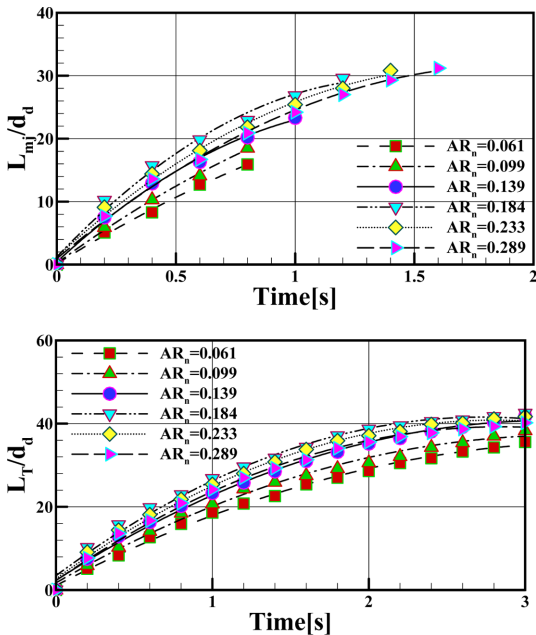


Fig. 7 Momentum jet and jet front edge length with aeration time

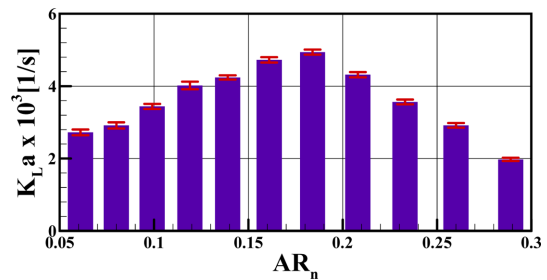


Fig. 8 Volumetric mass transfer coefficient with primary nozzle area ratio

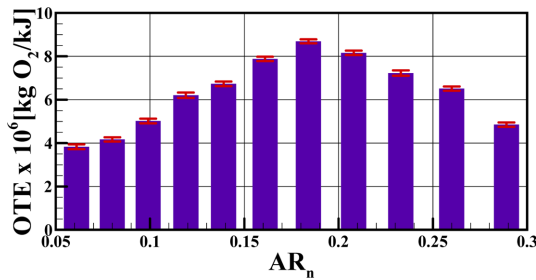


Fig. 9 Oxygen transfer efficiency with primary nozzle area ratio

달 계수가 증가하게 된다. 한편  $AR_n = 0.184$ 보다 면적비가 커지면 유입 공기량 감소에 따른 기포수 감소, 수평 분류의 거동에도 불구하고 분류의 도달 길이 감소와 수평 분류 거동에 따른 수표면에서의 요동 및 혼합 촉진 효과의 저하에 기인하여 전달 계수가 감소하는 것으로 판단된다. 또한 면적비가 작고 체적 분율이 큰 경우의 낮은 전달 계수는 상대적으로 많은 유입 공기량에 비해서 기포의 미세화 부족으로 표면적 증대 효과는 작고 부력은 커지기 때문에 산소의 용존에 필요한 접촉 면적과 기포의 체류 시간의 감소에 기인하는 것으로 판단된다.

Figure 9는 (6) 식과 같이 정의되는 산소 전달 효율을 구동 노즐 면적비의 함수로 나타낸 결과이다. 총괄 산소 전달 계수와 유사하게 면적비  $AR_n = 0.184$ 까지는 산소 전달 효율이 증가하지만 면적비가 더 커지면 효율이 감소하게 되는데, 0.184보다 커지는 면적비에서의 전달 효율이 0.184보다 줄어드는 면적비의 전달 효율에 비해서 상대적으로 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 정량적으로 고찰하면,  $AR_n = 0.184$ 보다 작아지는 면적비의 산소 전달 효율의 감소율 (약 51%)이 0.184보다 커지는 면적비에서의 산소 전달 효율의 감소율 (약 41%)에 비해서 크게 나타난다. 이는 0.184보다 커지는 면적비에서의 산소 전달 계수의 감소율 (약 54%)은 0.184보다 작아지는 면적비의 산소 전달 계수의 감소율 (약 42%)에 비해서 크지만, Fig. 4의 비 소요 동력에 대한 결과에 나타난 것과 같이 0.184 보다 커지는 면적비의 비 소요 동력의 감소율 (약 23%)이 0.184 보다 작아지는 면적비에서의 동력 감소율 (약 16%)보다 크기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 구동 노즐의 면적비 (또는 개도)가 감소하여 노즐 출구가 혼합관 입구에 근접될수록 유로의 감소에 따른 유동 저항의 증대로 소요 동력이 커지기 때문인 것으로 사료된다.

이러한 결과를 통해서 이젝터와 같은 인라인 시스템을 이용한 수증의 산소 전달 공정에서 소요 동력이 가

장 효율적으로 이용되고, 산소 전달 성능이 최대가 되는 구동 노즐 면적비 (개도)의 존재를 유추할 수 있다. 이는 너무 작거나 큰 구동 노즐 면적비 (개도)에서는 소요 동력의 상당 부분이 유동 저항에 따른 손실이나 구동 유체의 불필요한 가압 및 분출에 이용될 수 있고, 유입되는 공기량은 많지만 기포의 미세화가 부족하거나 유입 공기량이 작아서 기포수가 감소하는 것에 근거한다.

#### 4. 결 론

환형 노즐 이젝터의 구동 노즐 출구 면적비에 따른 분류 거동이 산소 전달 특성에 미치는 영향에 대한 실험적 연구결과는 다음과 같다.

(1) 출구 면적비가 작아지면 유입 공기의 체적 분율 증대에 따른 기포의 미세화 불량으로 부력 분류 거동이 나타나지만 수표면에서 요동을 수반하는 수평유동으로 전환되는 강도가 커졌으며, 면적비가 커지면 체적 분율 감소에 따른 미세화 촉진에 의한 수평 분류의 거동으로 분류 선단 도달 길이와 기포의 확산도가 증대되었다.

(2) 산소 전달 성능이 최대가 되는 출구 면적비  $AR_n = 0.184$ 까지의 면적비 확대에 따른 성능의 증가는 유입 공기의 체적 분율 감소, 수평 분류 거동에 따른 운동량 분류 길이 증가 그리고 분류 선단의 도달 길이 및 확산도 증대에 기인한다. 0.184보다 큰 면적비에서는 유입 공기의 기포수 감소와 수평 분류 도달 길이 및 수표면에서의 요동 효과의 감소에 기인하여 산소 전달 성능이 감소하였다.

(3) 환형 노즐 이젝터를 이용하는 인라인 연속식 산소 전달 공정에서 구동 노즐의 개도 제어를 통한 노즐 출구 면적비의 최적화를 통해서 전달 성능 및 에너지 이용효율 향상이 가능할 것으로 사료된다.

(4) 그러나 환형 노즐 이젝터의 출구 단면적은 흡입실 축소각과 부유체 유입관 끝단의 설계 형상에 따른 수력학적 출구 직경의 직접적인 변수이기 때문에 다양한 설계 형상 및 실험 변수와 작동 유체의 종류를 고려한 추가적인 연구를 통해 최적의 면적비에 대한 검증이 필요하다.

#### 후 기

이 논문은 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구

구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2019R111A3A01057227).

### 참고문헌

- (1) S. K. Park and H. C. Yang, "Experimental investigation on characteristics of oxygen transfer efficiency for vertical-up aeration process", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 43, No. 4, 2019, pp. 241~248.
- (2) H. C. Yang, "Effect of primary nozzle area and distance ratios of ejector on flow characteristics in water treatment process", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 42, No. 12, 2018, pp. 777~785.
- (3) I. S. Choi and W. Udo, "Influence of ammonia and dissolved oxygen concentration on nitrite accumulation in a MBR", *Trans. Korean Soc. Environ. Eng.*, Vol. 29, No. 8, 2007, pp. 922~929.
- (4) J. A. Mueller, W. C. Boyle and H. J. Popel, *Aeration: Principles and Practice*, CRC Press LLC, New York, 2002.
- (5) S. K. Kim and D. J. Yoo, "A Study on the driving characteristics of microbial fuel cell using mixed strains in domestic wastewater", *Trans. Korean Hydrogen New Energy Soc.*, Vol. 32, No. 6, 2021, pp. 506~513.
- (6) J. K. Jang, J. H. Sung, Y. K. Kang and Y. H. Kim, "The effect of the reaction time increases of microbubbles with catalyst on the nitrogen reduction of livestock wastewater", *Trans. Korean Soc. Environ. Eng.*, Vol. 37, No. 10, 2015, pp. 578~582.
- (7) J. C. Yu and T. H. Lee, "Evaluation of single and stacked MFC performances under different dissolved oxygen concentrations in cathode chamber", *Trans. Korean Soc. Environ. Eng.*, Vol. 31, No. 4, 2009, pp. 249~255.
- (8) L. Rago, P. Cristiani, F. Villa, S. Zecchin, A. Colombo, L. Cavalca and A. Schievano, "Influence of dissolved oxygen concentration on biocathodic microbial communities in microbial fuel cells", *Bioelectrochem.*, Vol. 116, 2017, pp. 39~51.
- (9) Q. Tao, J. Luo, J. Zhou, S. Zhou, G. Liu and R. Zhang, "Effect of dissolved oxygen on nitrogen and phosphorus removal and electricity production in microbial fuel cell", *Bioresour. Technol.*, Vol. 164, 2014, pp. 402~407.
- (10) G. C. Gil, I. S. Chang, B. H. Kim, M. Kim, J. K. Jang, H. S. Park and H. J. Kim, "Operational parameters affecting the performance of a mediator-less microbial fuel cell", *Biosens. Bioelectron.*, Vol. 18, 2003, pp. 327~334.
- (11) L. G. Olias, A. R. Otero, P. J. Cameron and M. D. Lorenzo, "A soil microbial fuel cell-based biosensor for dissolved oxygen monitoring in water", *Electrochimica Acta*, Vol. 362, 2020, pp. 137108.
- (12) Y. Zhang and I. Angelidaki, "A simple and rapid method for monitoring dissolved oxygen in water with a submersible microbial fuel cell (SBMFC)", *Biosens. Bioelectron.*, Vol. 38, 2012, pp. 189~194.
- (13) S. J. You, Q. L. Zhao, J. Q. Jiang and J. N. Zhang, "Treatment of domestic wastewater with simultaneous electricity generation in microbial fuel cell under continuous operation", *Chem. Biochem. Eng. Q.*, Vol. 20, No. 4, 2006, pp. 407~412.
- (14) G. W. Chen, S. J. Choi, T. H. Lee, G. Y. Lee, J. H. Cha and C. W. Kim, "Application of biocathode in microbial fuel cell: cell performance and microbial community", *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, Vol. 79, No. 3, 2008, pp. 379~388.
- (15) C. Kim, J. Cha, S. Choi and H. Yu, "Operational conditions and design factors of microbial fuel cell for practical application", *Trans. Korean Soc. Environ. Eng.*, Vol. 31, No. 9, 2009, pp. 719~732.
- (16) S. K. Park and H. C. Yang, "Effect of ejector mass ratio on aeration performance", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 45, No. 11, 2021, pp. 613~621.
- (17) S. K. Park and H. C. Yang, "Experimental investigation on mixed jet and mass transfer characteristic of horizontal aeration process", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 113, 2017, pp. 544~555.
- (18) S. K. Park and H. C. Yang, "An experimental investigation of the flow and mass transfer behavior in a vertical aeration process with orifice ejector", *Energy*, Vol. 160, 2018, pp. 954~964.
- (19) S. K. Park and H. C. Yang, "Experimental investigation on oxygen transfer efficiency of horizontal aeration process using central-driven ejector", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 43, No. 10, 2019, pp. 717~724.
- (20) M. E. Jahromi and M. Khiadani, "Experimental study on oxygen transfer capacity of water jets discharging into turbulent cross-flow", *J. Environ. Eng.*, Vol. 143, No. 6, 2017, pp. 04017007.
- (21) B. N. Taylor and C. E. Kuyatt, *Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results*, NIST Technical Note 1297, 1994.