

## 이젝터를 이용한 순환양식 시스템 폭기공정의 혼합유동 특성

박 상 규\*· 양 희 천\*\*

\* 전남대학교 기계설계공학부

### Mixed Flow Characteristics of Aeration Process for Recirculation Aquaculture System Using Ejector

Sang Kyoo Park\* and Hei Cheon Yang\*\*

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

(Received May 16, 2013 ; Revised July 9, 2013 ; Accepted July 17, 2013)

**Key Words:** Ejector(이젝터), Recirculation Aquaculture System(순환양식 시스템), Aeration(폭기), Mass Ratio(유량비), Head Ratio(수두비), Dissolved Oxygen(용존산소), Volumetric Oxygen Transfer Coefficient(총괄 산소전달계수)

**초록:** 본 연구는 환형 노즐 이젝터를 이용하여 수평방향 폭기공정의 혼합유동 및 산소전달 특성에 대한 실험적 연구를 목표로 한다. 실험변수는 이젝터 피치와 가압수 유량이며, 측정된 유량과 압력을 이용하여 유량비, 수두비 및 효율을 계산하였다. 이젝터에서 분출된 혼합유동의 가시화를 통해 정성적 거동을 고찰하였으며, 용존산소량을 측정하여 총괄 산소전달계수를 도출하였다. 이젝터에서 분출된 혼합유동은 가압수의 운동량과 유입된 공기기포의 미립화에 따라 부력분류 또는 수평분류의 거동을 나타내었다. 기포의 크기에 기인하는 부력과 가압수의 운동량에 지배되는 혼합유동의 도달거리는 가압수와 공기기포의 접촉 면적 및 시간에 크게 영향을 미치기 때문에 산소전달률의 중요한 변수임을 유추할 수 있다.

**Abstract:** The objective of this study is to experimentally investigate the mixed flow and oxygen transfer characteristics of a horizontally injected aeration process using an annular nozzle ejector. The flow rate ratio, pressure ratio and ejector efficiency are calculated using the measured flow rate and pressure with the experimental parameters of the ejector pitch and primary flow rate. The visualization images of mixed flow issuing from the ejector are analyzed qualitatively, and the volumetric oxygen transfer coefficients are calculated using the measured dissolved oxygen concentration. The mixed flow behaves like a buoyancy jet or horizontal jet owing to the momentum of primary flow and air bubble size. The buoyancy force of the air bubble and the penetration of mixed flow are found to be important parameters for the oxygen transfer rate owing to the contact area and time of two phases.

#### 1. 서 론

육상 수조식 양식시설에서는 양식 용수를 최대한 효율적으로 이용하고 양식의 생산성과 경제성을 증대시키기 위해서 순환양식 시스템(RAS, recirculation aquaculture system)에 의한 어류의 집약적인 고밀도 생산 기술의 적용이 일반화되었다.<sup>(1,2)</sup> 순환양식 시스템에서는 Fig. 1의 개념도에서 보는 바와 같이 양식장에서 가장 심각한 문제인 사료 찌꺼기 및 어류 배설물 등의

슬러지를 1 차 여과장치로 제거한다. 그리고 여과되지 않은 부유물질이나 발생하는 암모니아 등의 유해가스를 생물학적 여과 및 살균을 통해 제거한 후 양식 어류의 환경에 맞는 수질을 인위적으로 조절하여 공급함으로써 항상 최적의 조건에서 양식할 수 있는 첨단 양식 시스템이다.

현재 순환양식 시스템에서는 거의 대부분 별도의 구성라인과 동력원을 사용하여 양식수와 산소의 공급, 그리고 여과 및 살균 공정을 수행하고 있다. 특히 원심펌프를 이용한 취수 공정에서는 공동현상의 심화, 취수관 부착생물 및 유입 해양오염물질 등에 의한 임펠러의 손상 등으로 펌프설비의 내구성이 저하된다. 또한

† Corresponding Author, [hcyang@chonnam.ac.kr](mailto:hcyang@chonnam.ac.kr)

블로어를 이용한 산소공급 방식에서는 유입되는 공기기포의 크기가 커서 기포의 부상력이 강하기 때문에 양식수와와의 접촉면적이 작고 접촉시간이 짧아서 산소의 단위 시간당 용해율이 낮아지는 문제점이 있다.<sup>(3)</sup>

반면에 이젝터의 노즐 출구부에서 발생하는 부압을 이용하여 해수를 취수하면 공동현상이 없고, 이젝터 내부에는 구동부가 전혀 없기 때문에 내구성 손상을 최소화할 수 있다. 또한 취수가 필요치 않은 운전시간에는 이젝터의 부압부를 대기중에 개방함으로써 공기중의 산소를 양식수에 주입할 수 있는 산소공급설비로 이용이 가능하다. 따라서 모터-펌프 이젝터 시스템을 이용하여 해수와 산소공급 설비를 일체화하면 전체 순환양식 시스템의 단순화를 통해 육상 수조식 양식의 경제성 및 생산성 향상에 기여할 수 있는 기술적 장점을 갖고 있다.

이젝터는 기본적으로 분사 노즐, 유입 노즐, 혼합부와 디퓨저로 구성되며, 중심 구동(central-driven)과 환형 구동(annular-driven) 노즐의 2 가지 형상으로 크게 분류할 수 있다.<sup>(4,5)</sup> 이젝터를 이용해 상이한 성질의 유체를 유입하고 혼합시키는 공정은 화학공업, 수처리 공정, 양식장 등에 광범위하게 사용되고 있으며, 이젝터 내에서의 물질전달에 대한 연구도 지속적으로 이루어지고 있다. 특히 물속에 산소를 용해시키는 폭기(aeration) 공정에서 산소는 용해도가 낮고 전달속도가 느려서 수면의 공기와 물의 접촉면만을 통해서 충분한 양의 산소가 용해되지 못하기 때문에 강제적으로 공기를 주입하고 미세화하여 산소의 전달속도를 높일 수 있는 기술개발이 필요하다.<sup>(6-8)</sup>

물속에 산소를 공급하는 공정에 이용되는 이젝터에서 가압 분사되는 물과 이젝터의 부압부를 통해 유입되는 공기기포는 혼합부를 통과하는 과정에서 혼합과 확산 그리고 난류효과 등의 복합적인 영향을 받게 된다. 따라서 공기기포가 미세화되어 2 상의 접촉면적이 증가하고, 수조에 유입되었을 때 미세화된 기포의 부력 감소로 부상속도가 느려서 2 상의 접촉시간이 길어지기 때문에 산소의 전달률이 높아지게 된다. 이와 같은 높은 물질전달 및 혼합률 특성으로 인해 이젝터의 2 상 유동 및 혼합특성에 대한 연구는 이젝터의 설계형상, 적용방법, 유체의 종류 및 작동조건에 따라서 다양한 결과가 제시되고 있다.<sup>(9-11)</sup> 또한 Balamurugan 등,<sup>(12)</sup> Kim 등,<sup>(13)</sup> 그리고 Utomo 등<sup>(14)</sup>은 주 유체 또는 흡입 유체로

공기 또는 물을 사용하여 이젝터의 물질전달 및 유체역학적 특성에 대한 실험 및 수치적 연구를 수행하였다.

저비용, 고효율의 산소전달 시스템의 개발은 많은 응용분야에서 중요한 이슈가 되고 있다. 특히 산소의 낮은 용해성과 전달률 때문에 충분한 산소를 물속에 주입하기 위해서는 단위 소비 에너지당 유입되는 공기량을 증가시키고, 기포의 크기를 감소시켜 물과 공기 기포의 접촉면적 및 접촉시간을 증가시켜야 한다. 환형 노즐 이젝터는 높은 유입 유체 처리용량을 가지고 있기 때문에 효율적인 폭기 시스템에 적합한 것으로 알려지고 있다. 그러나 환형 노즐 이젝터의 유동 및 산소전달 특성에 대한 실험적 연구는 그다지 많지 않다. 또한 순환여과 방식의 양식수조 깊이는 1~2m 정도로 깊지 않기 때문에 이젝터 시스템을 순환여과 양식장의 폭기공정에 이용하기 위해서는 수평방향의 분사거동 해석이 반드시 필요하다. 그러나 이젝터 시스템을 이용한 연구는 연직상·하 방향으로의 거동해석이 대부분이고, 수평방향으로의 특성 연구는 많지 않은 것으로 보고되고 있다.<sup>(15,16)</sup> 따라서 본 연구는 환형 노즐 이젝터를 이용하여 수평방향 폭기 공정의 혼합유동 및 산소전달 특성에 대한 실험적 연구를 목표로 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 2의 개략도에 나타낸 실험장치는 가압 모

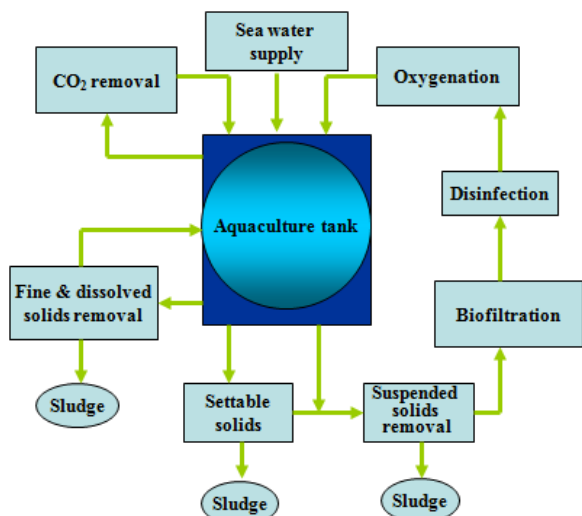


Fig. 1 Schematic diagram of recirculation aquaculture system

터-펌프, 환형노즐 이젝터, 폭기 수조, 용존산소 측정기, 유량계 및 압력계 등으로 구성하였다.<sup>(7,8)</sup> 폭기수조의 체적은 1.38m<sup>3</sup> (0.9m×1.7m×0.9m)이며, 가압 모터-펌프(Wilo, Model 8051-1)에 의해서 구동되는 이젝터 시스템의 유량은 전자제어 유량계(Kometer, KTM-800)를 이용하여 측정하였다. 이젝터에서 발생하는 진공압에 의해서 유입되는 공기량은 오리피스 공기유량계(Kometer, PPE-S)를 이용하여 측정하고, 흡입되는 공기의 부압은 차압계(Autor, APT3100-D5)를 이용하여 측정하였다. 전자제어 유량계, 오리피스 공기유량계 그리고 차압계의 정확도는 각각 ±1.0%, ±2.0% 그리고 ±0.5%이다. 폭기 수조 수면으로부터 30cm 지점에 용존산소 측정기(YSI-5B)를 설치하여 10 초 간격으로 폭기 시간에 따른 용존산소 농도를 측정하였다.

Fig. 3 은 환형노즐 이젝터의 개략도이며, Table 1 은 이젝터 각부의 치수를 나타낸다. 이젝터의 기본 구성 요소는 환형 노즐, 주 유체 유입부 및 부압 유체 유입부, 혼합부, 디퓨저 그리고 노즐의 위치변화를 위한 스크류 등이다. 이젝터의 혼합부 입구의 축소각( $\alpha$ )은 59°, 디퓨저 출구의 확대각( $\beta$ )은 7.7°이며, 주 유체 분사노즐 유로를 형성하는 부압 유체관 외주의 각도( $\theta$ )는 5.2°로 제작하였다.

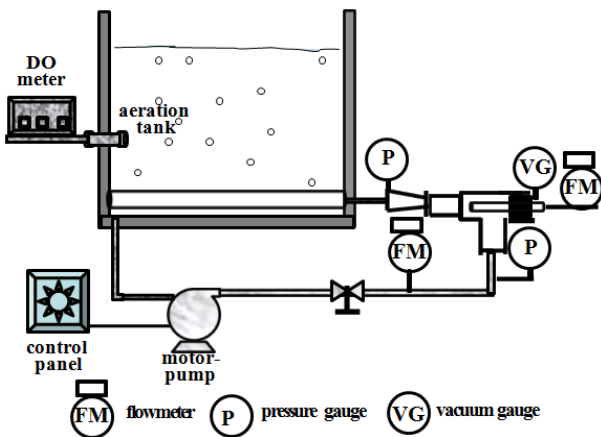


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

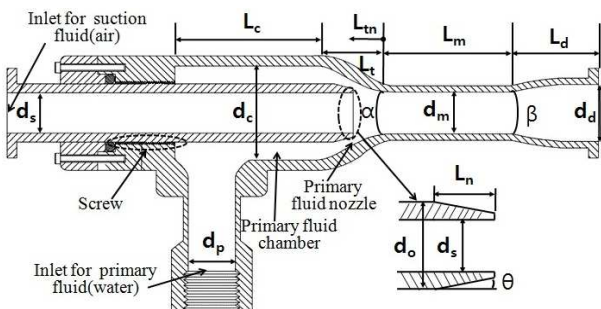


Fig. 3 Geometric diagram of an annular nozzle ejector

이젝터 노즐의 위치( $L_m$ )는 혼합부 입구에서 환형 노즐의 출구까지의 거리로 정의된다. 환형 노즐의 초기 위치(0 피치)는 혼합부의 입구에서 1.0mm 떨어진 지점이며, 1 피치의 길이는 1.5mm 이다.

2.2 실험방법

실험변수는 환형 노즐 이젝터의 노즐출구 위치 변화인 피치와 가압수의 유량으로 설정하였다. 실험은 수조에 수돗물을 채우고, 임의의 피치에서 전동 모터-펌프를 가동하여 정상상태의 유동조건에 도달하면 가압수와 유입공기의 유량 및 압력과 디퓨저 출구의 압력을 측정후, 피치를 변화시키고 새로운 수돗물을 채워 측정하는 과정으로 진행하였다.<sup>(7,8)</sup> 그리고 특정 피치에서는 유량계의 상류에 설치된 유량조절 밸브로 가압수의 유량을 변화시키며 실험을 수행하였다.

한편 이젝터 내부에서의 미세화 및 수조에 분출 후의 혼합유동의 정성적 거동을 조사하기 위하여, 수조 밑면으로부터 약 20cm 지점의 단폭(0.9m) 측면 중앙부에 설치한 이젝터 출구에서 분출되는 혼합유동의 가시화 이미지를 획득하였다. 정성적 가시화 이미지 획득에는 CCD 카메라(HiSense MkII)를 이용하였으며, 1/100 초의 노출시간에서 초당 5 프레임(5fps)의 속도로 촬영하였다.<sup>(8,16)</sup>

산소전달계수를 도출하기 위해 가장 일반적으로 사용되고 있는 방법은 ASCE 측정기준이다<sup>(17,18)</sup>. 산소 전달률은 총괄 산소전달계수와 산소부족량의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dC_t}{dt} = K_L a \cdot (C_{st} - C_t) \tag{1}$$

여기서  $C_t$ 는 임의의 시간  $t$ 에서 순간 용존산소 농도,  $C_{st}$ 는 포화 용존산소 농도이며,  $K_L a$ 는 총괄 산소전달계수를 나타낸다. 총괄 산소전달계수는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\ln\left(\frac{C_{st} - C_0}{C_{st} - C_t}\right) = K_L a \cdot t \tag{2}$$

여기서  $C_0$ 는 초기 조건에서의 용존산소 농도를 나타낸다.

용존산소량 측정실험에서는 실험 시작 전에 폭기 수조에 순수한 수돗물을 채우고, 이론적인 반

Table 1 Geometric dimensions of the ejector

Dimension	$d_p, d_s, d_m$	$d_d$	$d_c$	$L_c$	$L_t$	$L_m$	$L_d$	$L_n$
Values[mm]	26	35	50	50	45	290	130	10

응식에 의해 계산된 아황산나트륨과 촉매를 첨가하여 탈산소화시킨 후 실험을 수행하는 비정상 재폭기 방법을 이용하였다.<sup>(8,17,18)</sup>

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 환형노즐 이젝터의 유동특성

이젝터의 성능은 일반적으로 다음과 같은 유량비( $M$ ), 수두비( $N$ ) 그리고 효율( $E$ )과 같은 변수들의 함수로 알려지고 있다.<sup>(19)</sup>

$$M = \frac{Q_s}{Q_p} \tag{3}$$

$$N = \frac{P_d - P_s}{P_p - P_d} \tag{4}$$

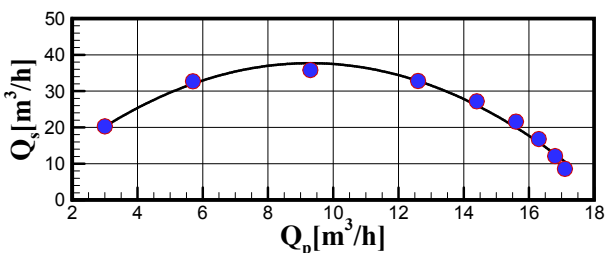
$$E = M \times N \tag{5}$$

여기서  $Q_s$  는 유입 공기량,  $Q_p$  는 가압수의 유량을 나타내며,  $P_d, P_s, P_p$  는 각각 디퓨저 출구, 유입공기, 가압수의 압력을 나타낸다.

Fig. 4 는 1 ~ 9 피치 범위에서 측정된 가압수의 체적유량에 따른 유입공기의 체적유량 변화를 나타낸다. Table 2 에서 알 수 있는 바와 같이 피치가 증가하면 노즐 선단과 혼합부의 입구 사이의 거리가 증가하게 되어, 환형 노즐 출구의 단면적이 커지게 되므로 가압수의 유량은 증가하게 된다. 가압수의 유량은 1 피치에서는 약 3.0m<sup>3</sup>/h 이고, 9 피치에서는 17.1m<sup>3</sup>/h 로 증가하였다. 한편 피치에 따라 증가하는 가압수의 유량과는 달리 유입 공기량은 3 피치에서 35.8m<sup>3</sup>/h 로 최대치에 도달한 후 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 피치에 따른 가압수 유량과 환형노즐 면적 비의 변화에 의해 발생

**Table 2** Dimensions of tube tip positions(or pitches)

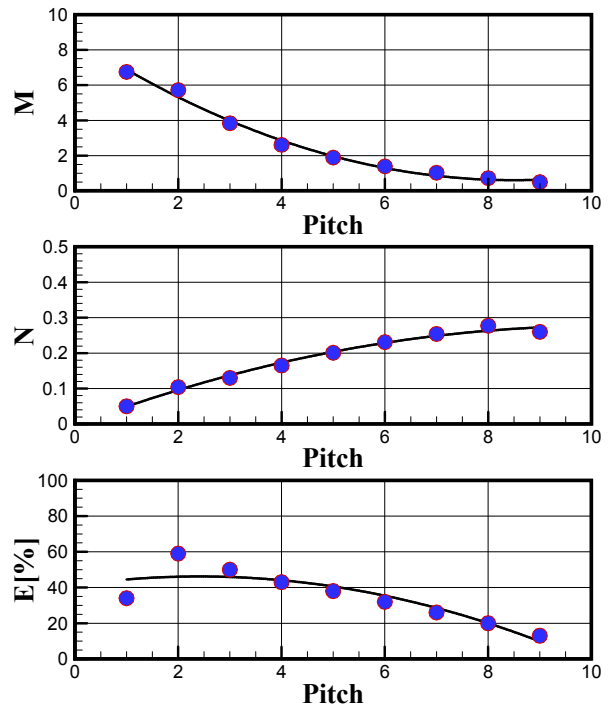
Pitch	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$L_{in}$ [mm]	$L_{t1}$	$L_{t2}$	$L_{t3}$	$L_{t4}$	$L_{t5}$	$L_{t6}$	$L_{t7}$	$L_{t8}$	$L_{t9}$
	2.5	4	5.5	7	8.5	10	11.5	13	14.5



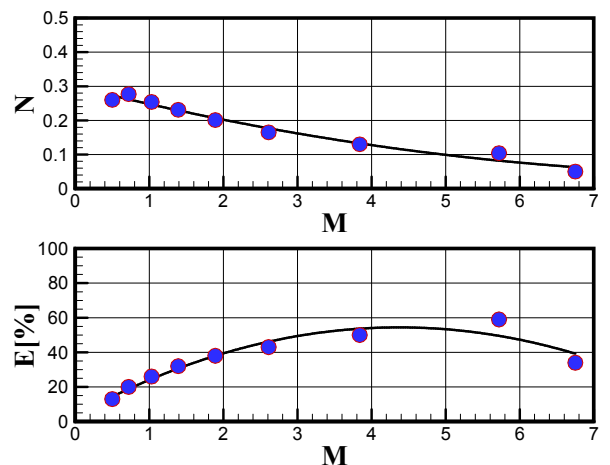
**Fig. 4** Variation of suction air flow rate with primary water flow rate

하는 부압의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 5 는 유량 및 압력의 측정결과를 이용하여 식 (3)~(5)로 정의된 이젝터의 유량비, 수두비 및 효율을 피치변화에 따라 나타낸 것이며, Fig. 6 은 유량비에 따른 수두비 및 효율변화를 나타낸다. 피치가 증가하면 유량비는 감소하고 수두비는 증가하며, 효율은 2 피치에서 약 60%로 최대값을 나타낸 후 감소하는 것을 알 수 있다. 한편 유량비에 따른 수두비와 효율의 변화는 중심-노즐 이젝터와 유사하게 유량비가 증가하면 수두비는 감소하고, 효율은 증가한 후 감소하는 경향을 나타낸다.<sup>(19)</sup>



**Fig. 5** Variations of flow ratio, head ratio and efficiency with screw pitch



**Fig. 6** Variations of head ratio and efficiency with flow ratio



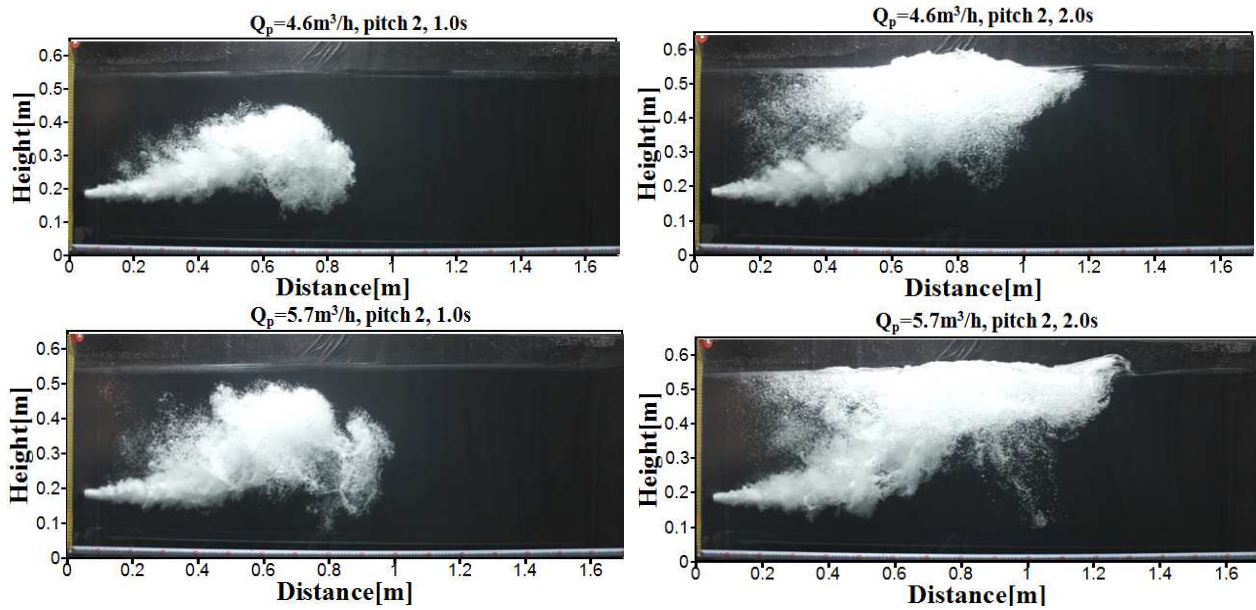


Fig. 7 Typical images of the mixed flow of water/air bubbles at pitch 2 with primary water flow rate 4.6 and 5.7m<sup>3</sup>/h

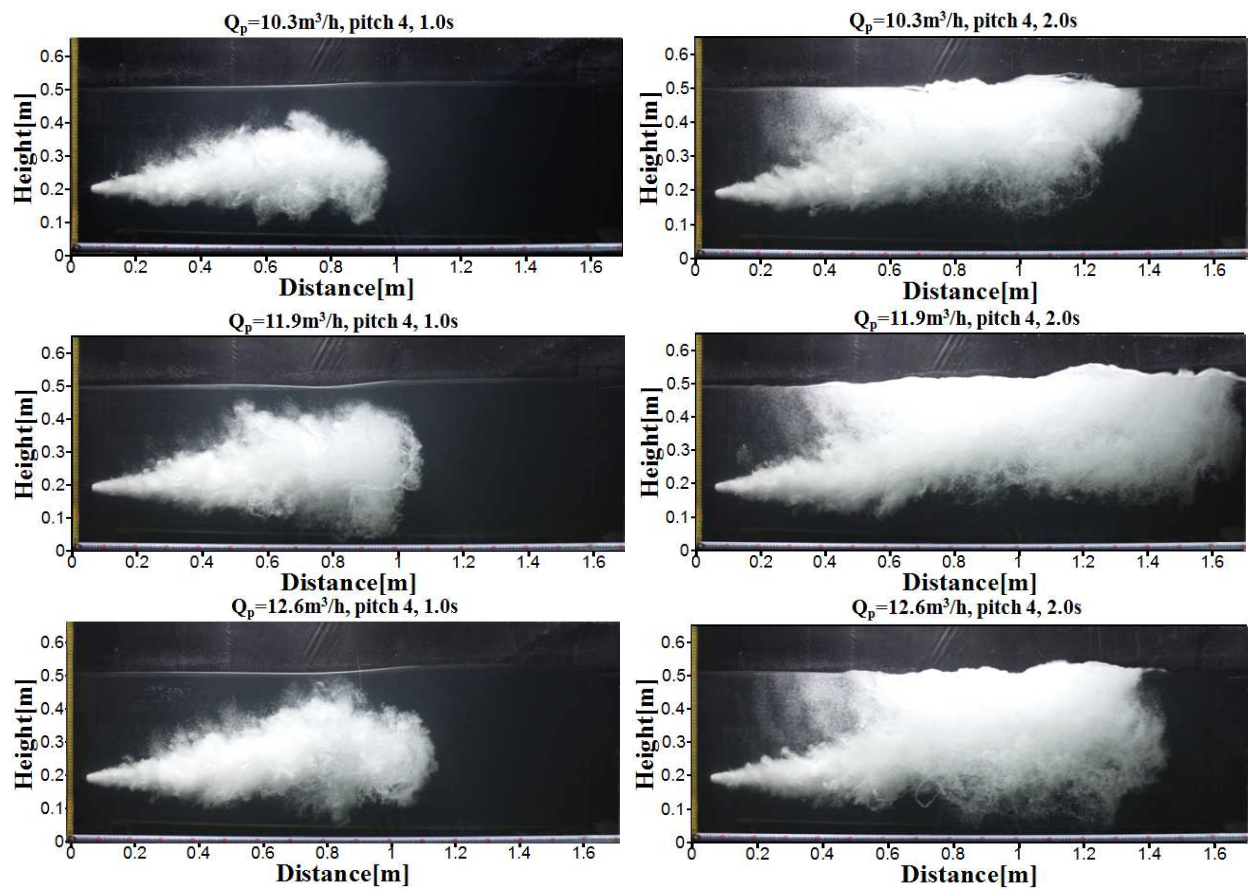


Fig. 8 Typical images of the mixed flow of water/air bubbles at pitch 4 with primary water flow rate 10.3, 11.9 and 12.6m<sup>3</sup>/h

### 3.2 혼합유동의 가시화 특성

Fig. 7은 2 피치에서 가압수의 유량( $Q_p$ )이 4.6 및 5.7m<sup>3</sup>/h 인 조건, Fig. 8은 4 피치에서 가압수 유량

이 10.3, 11.9 및 12.6m<sup>3</sup>/h 인 조건에서 분사 1 초 및 2 초 후의 혼합유동의 거동을 나타내며, Fig. 9는 8 피치에서 가압수 유량이 12.7, 15.6 및 16.8m<sup>3</sup>/h

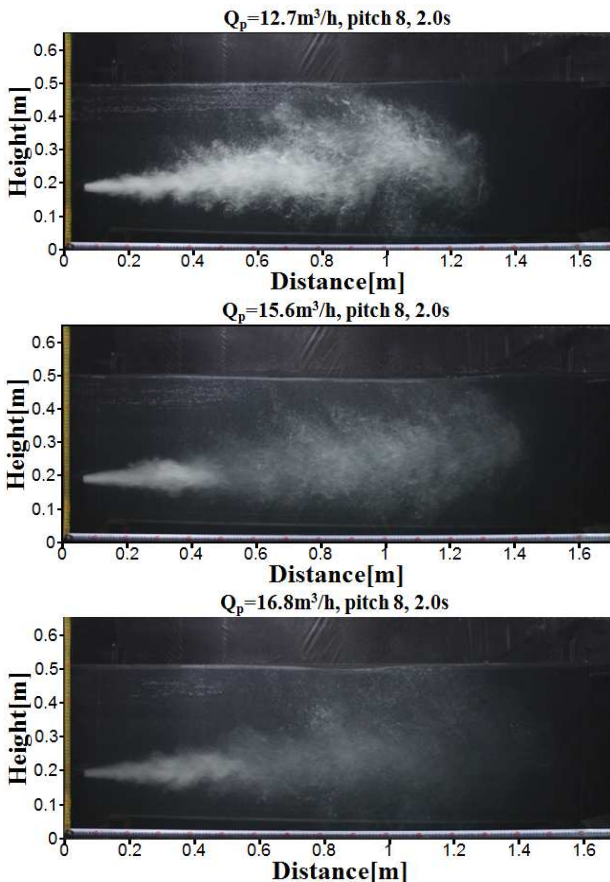


Fig. 9 Typical images of the mixed flow of water/air bubbles with time in the aeration tank

인 경우에 분사 후 2 초에서 혼합유동의 거동을 나타낸다. Fig. 7의 2 피치에서는 이젝터의 효율이 60%로 최대값을 갖지만, 가압수의 유량에 비해 유입 공기량이 많은 유량비가 큰 조건이므로 가압수의 운동량이 작아 이젝터내에서 유입공기의 미세화가 충분치 못하여 기포의 크기가 상대적으로 크기 때문에 부력의 영향이 커지는 부력분류(buoyancy jet)의 거동과 유사한 유동특성을 나타내는 것을 알 수 있다. 특히 분사 후 2 초에서는 혼합유동의 선단이 수면위로 강하게 분출되어 수면의 요동이 심하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8의 4 피치의 경우, 분사 1 초 후의 혼합유동의 거동은 거의 수평분류(horizontal jet)에 가까운 특성을 나타내며, 2 초 후의 수면의 거동은 2 피치에 비해서 요동의 진폭이 작아지고 선단의 도달거리가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 5의 결과에 나타난 것과 같이 4 피치에서는 2 피치에 비해서 효율은 약 27% 정도 감소하지만 유량비는 2 배인 약 54% 정도 감소하기 때문에 2 피치에 비해서 가압수의 운동량 증가로 인한 이젝터 내에서 기포의 미립화 향상에 따른 부력의 감소에 기인하

는 것으로 판단된다. 4 피치에서 유량비가 54% 정도 감소하는 것은 Fig. 4의 결과를 통해서 알 수 있는 것과 같이 2 피치와 4 피치에서 유입 공기량은 거의 동일하지만 가압수의 유량이 약 54% 정도 증가하기 때문이다.

Fig. 9의 8 피치에서는 2 피치에 비해서 가압수의 유량은 많고 상대적으로 유입 공기량은 매우 적어서 유량비가 약 87% 정도 감소하므로 이젝터내에서 미립화가 양호하고 운동량은 크기 때문에 분사 2 초 후에도 거의 수평분류의 거동을 나타내는 것으로 판단된다.

이젝터의 피치변화와 유량변화에 따른 가압수의 운동량과 유입공기의 이젝터내에서의 미립화 특성은 이젝터에서 분출된 혼합유동의 거동에 영향을 미치는 중요한 변수이며, 기포의 크기에 기인하는 부력과 가압수의 운동량에 지배되는 혼합유동의 도달거리는 2 상의 접촉면적과 접촉시간에 크게 영향을 미치기 때문에 산소전달률의 중요한 요소임을 유추할 수 있다.

### 3.3 산소 전달특성

Fig. 10은 4 피치와 8 피치에서 폭기 시간에 따른 백분율 용존산소량 특성을 나타낸다. 가압수의 온도는 약 23.5°C이며, 이 온도조건에서 포화 용존산소 농도는 8.48mg/L이다. 4 피치에서는 용존산소가 포화되는 시간이 약 4 ~ 6 분 정도 소요되며, 8 피치의 경우에는 약 6 ~ 8.3 분 정도 소요되는 것을 알 수 있다. 4 피치에서 분사 후 1 분 이전에는 가압수 유량이 많을수록 용존산소 농도가 높게 나타나는 반면에, 분사 후 1 분 이후에는 가압수의 유량이 11.9m<sup>3</sup>/h 인 경우의 용존산소 농도가 가장 높게 나타나며, 약 4 분 경과 후에 가장 빠르게 포화농도에 도달하는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 8의 분사 후 2 초의 가시화 이미지에서 확인할 수 있는 것과 같이 가압수의 유량이 11.9m<sup>3</sup>/h 인 경우의 도달거리가 가장 길어지기 때문에 2 상의 접촉률이 증가하는 것에 기인하는 것으로 판단된다. 유량비가 낮은 8 피치에서는 Fig. 9를 통해서 알 수 있는 바와 같이 가압수의 운동량이 증가할수록 미립화가 촉진되고 선단의 도달거리가 증가하기 때문에 용존산소가 포화되는 시간이 감소하게 된다. 용존산소량 특성을 고찰하면, 폭기 시간이 증가하면 가압수와 기포의 접촉시간이 길어지고, 가압수의 운동량이 증가하면 기포의 미립화가 촉진되어 2 상의 접촉면적이 넓어지고 접촉빈도가 증가하기 때문에 용존산소 농도가 증가하는 것으로 판단된다.

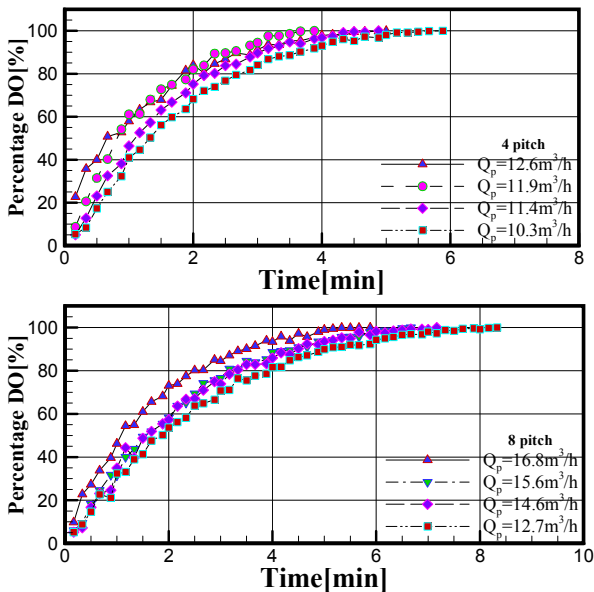


Fig. 10 Percentage dissolved oxygen concentrations with reeration time

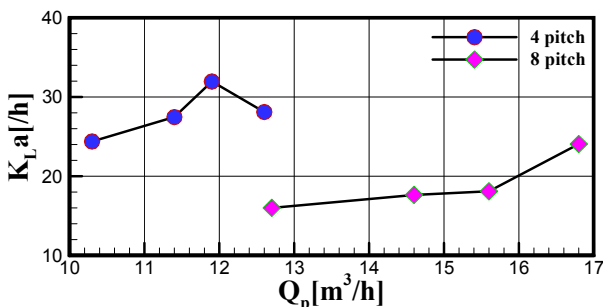


Fig. 11 Volumetric oxygen transfer coefficients with primary fluid flow rate

Fig. 11 은 Fig. 10 의 결과를 이용하여 식 (2)를 이용하여 도출한 가압수의 유량변화에 따른 총괄 산소전달계수를 나타낸다. Fig. 10 의 결과에서 기술한 바와 같이 용존산소가 포화되는 시간이 가장 짧은 4 피치의 가압수 유량이 11.9m<sup>3</sup>/h 인 경우에 총괄 산소전달계수가 가장 높게 나타났다. 한편 4 피치와 8 피치의 가압수 평균 유량은 약 11.6m<sup>3</sup>/h 와 14.9m<sup>3</sup>/h 로 4 피치의 가압수 유량이 8 피치보다 약 22% 정도 작지만, 4 피치의 평균 총괄 물질전달계수는 약 28.9h<sup>-1</sup> 로 8 피치의 약 18.5h<sup>-1</sup> 보다 56% 정도 커지는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 8 과 Fig. 9 의 결과에 나타난 것과 같이 피치에 따른 가압수와 유입 공기량의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 그러나 가압수의 양 보다는 상대적으로 유입 공기량이 산소전달률을 높이는데 중요한 영향 요소임을 알 수 있다.

결론적으로 고찰하면, 고효율의 산소전달 시스템의 개발을 위해서는 보다 다양한

실험변수를 고려한 가압수의 운동량과 유입 공기량의 최적화 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

환형 노즐 이젝터를 이용하여 수평방향 폭기 공정의 혼합유동 및 산소전달 특성에 대한 실험적 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

유량비에 따른 수두비와 효율특성은 중심-노즐 이젝터에서와 같이 유량비가 증가하면 수두비는 감소하고, 효율은 증가한 후 감소하는 경향을 나타낸다.

이젝터의 피치 및 유량변화에 따른 가압수의 운동량과 유입공기의 이젝터내에서의 미립화 특성에 따라 이젝터에서 분출된 혼합유동은 부력분류 또는 수평분류의 거동을 나타낸다.

기포의 크기에 기인하는 부력과 가압수의 운동량에 지배되는 혼합유동의 도달거리는 2 상의 접촉률에 영향을 미치기 때문에 용존산소 농도를 결정하는 중요한 요소임을 알 수 있다.

8 피치에 비해서 4 피치의 가압수 유량은 약 22% 정도 작고 미립화도 불량하지만, 유입 공기량이 많기 때문에 총괄 물질전달계수는 약 56% 정도 증가하였다.

가압수의 양 보다는 상대적으로 유입 공기량이 산소전달률을 높이기 위한 중요한 영향 변수로 판단되지만, 고효율의 산소전달 시스템의 개발을 위해서는 보다 다양한 실험변수를 고려한 가압수의 운동량과 유입 공기량의 최적화 연구가 필요하다.

#### 후기

본 논문은 2011 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업(No. 2011-0014640)의 결과물임.

#### 참고문헌

- (1) Summerfelt, S. T. and Sharrer, M. J., 2004, "Design Implication of Carbon Dioxide Production within Biofilters Contained in Recirculating Salmonid Culture Systems," *Aquacultural Engineering*, Vol. 32, pp. 171~182.
- (2) Summerfelt, S. T., Vinci, B. J. and Piedrahita, R. H., 2000, "Oxygenation and Carbon Dioxide Control in Water Reuse Systems," *Aquacultural Engineering*, Vol. 22, pp. 87~108.

- (3) Barrut, B., Blancheton, J. P., Champagne, J. Y. and Grasmick, A., 2012, "Mass Transfer Efficiency of a Vacuum Airlift – Application to Water Recycling in Aquaculture Systems," *Aquaculture Engineering*, Vol. 46, pp. 18~26.
- (4) EL-Ghandour, M., EL-Sawaf, I. A. and EL-Ottla, F. M., 2001, "Solid-Materials-Handling Central-Type Jet Pump," *6<sup>th</sup> Int. Water Tech. Conference, IWTC 2001, Alexandria, Egypt*, pp. 328~340.
- (5) Lima Neto, I. E., 2011, "Maximum Suction Lift of Water Jet Pumps," *J. of Mechanical Science and Technology*, Vol. 25, pp. 391~394.
- (6) Yang, H. C., Jung, S. W. and Park, S. K., 2009, "Performance Characteristics of Ejector System for Aeration," *Proceedings of the KSME 2009 Fall Annual Meeting*, pp. 2458~2462.
- (7) Du, H., Jang, D. H., Kim, D. J. and Yang, H. C., 2012, "Experimental Study of Oxygen Transfer Characteristics in an Aeration System Using an Annular Nozzle Ejectors," *Proceedings of the KSME 2012 Fall Annual Meeting*, pp. 2926~2931.
- (8) 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, No. 4, pp. 1756~1763.
- (9) Rainer, B., Fonade, C. and Moser, A., 1995, "Hydrodynamics of a New Type of Ejector," *Bioprocess Engineering*, Vol. 13, pp. 97~103.
- (10) Long, X., Han, N. and Chen, Q., 2008, "Influence of Nozzle Exit Tip Thickness on the Performance and Flow Field of Jet Pump," *J. of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, pp. 1959~1965.
- (11) Yapici, R., 2008, "Experimental Investigation of Performance of Vapour Ejector Refrigeration System Using Refrigerant R123," *Energy Conversion & Management*, Vol. 49, pp. 953~961.
- (12) Balamurugan, S., Lad, M. D., Gaikar, V. G. and Patwardhan, A. W., 2007, "Effect of Geometry on Mass Transfer Characteristics of Ejectors," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 46, pp. 8505~8517.
- (13) Kim, M. I., Kim, O. S., Lee, D. H. and Kim, S. D., 2007, "Numerical and Experimental Investigations of Gas-Liquid Dispersion in an Ejector," *Chemical Engineering Science*, Vol. 62, pp. 7133~7139.
- (14) Utomo, T., Jin, Z., Rahman, M., Jeong, H. and Chung, H., 2008, "Investigation on Hydrodynamics and Mass Transfer Characteristics of a Gas-Liquid Ejector Using Three-Dimensional CFD Modeling," *J. of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, pp. 1821~1829.
- (15) Socolofsky, S. A. and Adams, E. E., 2002, "Multiphase Plumes in Uniform and Stratified Crossflow," *J. Hydraulic Research*, Vol. 40, No. 6, pp. 661~672.
- (16) Lima Neto, I. E., Zhu, D. Z. and Rajaratnam, N., 2008, "Horizontal Injection of Gas-Liquid Mixtures in a Water Tank," *J. Hydraulic Engineering*, Vol. 134, pp. 1722~1731.
- (17) Al-Ahmady, K. K., 2006, "Analysis of Oxygen Transfer Performance on Sub-Surface Aeration Systems," *Int. J. Environmental Research and Public Health*, Vol. 3, pp. 301~308.
- (18) 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.
- (19) EL-Sawaf, I. A., Halawa, M. A., Younes, M. A. and Teaima, I. R., 2011, "Study of the Different Parameters That Influence on the Performance of Water Jet Pump," *15<sup>th</sup> Int. Water Tech. Conference, IWTC 2011, Alexandria, Egypt*, pp. 1~17.