

수중폭기용 노즐형 산기관 개발에 관한 연구

임동렬* · 이상규*

Study on the Development of Nozzle-Type Diffusers for Submersible Aeration Process

Dong-Ryul Rhim* and Sangkyoo Lee*

Key Words: Air diffuser(산기관), Air bubble(기포), Nozzle(노즐), Oxygen transfer efficiency(산소전달효율)

ABSTRACT

Experimental study was conducted to increase the oxygen transfer efficiency of air diffusers in clean water. By measuring the bubble size from the bubbly two-phase flow visualization with several air diffusers, the size of air bubbles near the top surface of aeration tank seems to be independent on the diffuser types. Considering design parameters for the better break-up of larger bubbles around the air diffusers, advanced conceptual air diffusers using nozzle-type throat showing the higher oxygen transfer efficiencies were made.

1. 서론

생물학적 오폐수 처리과정의 주요 단계에 해당하는 폭기과정(aeration process)에 사용되는 폭기장치는 설치위치에 따라서 다음과 같이 분류할 수 있다. 첫째는 산기관(diffuser 또는 aerator)이라고 하는 주로 폐수처리장 바닥에 설치되는 공급기체의 확산을 위한 폭기장치이고, 둘째는 수중에 설치되는 수중 교반기나 터빈형 폭기장치이며, 셋째는 기계식 표면 폭기장치이다. 이 중에서 산기관을 제외한 다른 방식의 폭기장치는 대체로 많은 운전에너지와 넓은 설치 공간 등의 과다한 시설 및 운전경비를 요구하며 작동부품의 유지와 보수 및 소음 등의 문제도 발생시키고 있다. 이에 비하여 산기관은 상대적으로 우수한 효율, 간편한 운전 및 작은 설치 공간 등의 장점으로 인하여 다

양한 제질과 형태의 제품이 소개되었고 또한 오랫동안 현장에서 사용되어 왔다.

산기관의 성능을 나타내는 대표적인 인자는 표준산소전달효율⁽¹⁾(Standard Oxygen Transfer Efficiency, 이하 SOTE)인데, 산기관을 이용하여 폐수에 동일한 유량의 공기를 공급한다고 해도 사용된 산기관의 특성에 따라 폐수 중에 용해되는 산소의 양은 변하게 된다. 산기관의 SOTE를 증가시키기 위해서는 여러 방법이 가능하지만 가장 중요한 방법은 산기관을 통과한 후 상승하는 공기기포의 크기를 작게 만들어 폐수와 공기의 접촉면적을 증가시키는 방법이다.

현재 많이 사용되는 산기관은 미세기포식 산기관(fine bubble diffuser)으로는 멤브레인형 산기관과 세라믹형 산기관이 있고, 큰 기포식 산기관(coarse bubble diffuser)으로는 구슬충진형 산기관, 측면분사형 산기관, 음향공진형 산기관 등이 있다. 미세기포식 산기관은 25%~30%(공기유량 150 l/m 기준) 정도의 높은 SOTE를 나타낸다는 장점에도 불구하고

* 고등기술연구원

책임저자 E-mail : rhim@iae.re.kr

장시간 사용 후에는 산기관의 막힘이 발생하여 주기적인 산기관 세척이 필요하다는 단점을 갖고 있고, 큰 기포식 산기관은 대부분 구조가 간단하여 막힘은 거의 없으나 15%~18% 이하의 낮은 SOTE를 나타낸다는 단점이 있다.

최근에 개발된 큰 기포식 산기관으로 맥진동(oscillatory pulsation)과 음향공진(acoustic resonance) 현상을 이용하여 개발된 음향공진 산기관은 공급되는 공기압과 산기관 출구부의 수압 사이의 압력차에 의해 발생된 음파가 물속의 기포에 음향에너지를 공급함으로써 산소의 용해속도를 촉진하는 현상을 이용한 산기관이다^{(2),(3)}. 음향공진 산기관은 장시간 운전에도 하폐수 중의 이물질에 의한 산기관 막힘이 없어 유지보수 비용이 발생되지 않고 고농도의 폐수에도 사용이 가능한 산기관이라는 장점이 있고, 또한 큰 기포식 산기관 중에서 높은 SOTE(18%)를 나타내고 있지만 아직도 미세기포식 산기관에 비해 SOTE가 낮다는 단점을 해소하지는 못했다. 이에 본 연구에서는 기존의 음향공진 산기관을 비교대상으로 선정하여 새로운 형태의 산기관을 개발하기 위한 실험적 연구를 수행하였으며, 미세기포식 산기관과 큰 기포식 산기관의 장점을 모두 취할 수 있는 산기관의 구조로써 노즐 형태를 선정하였다. 새로운 개념의 산기관인 노즐형 산기관의 설계인자로는 노즐 목의 크기를 선정하였고 이에 따른 SOTE의 변화를 실험을 통해 확인하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 가시화수조

본 연구를 위하여 가시화수조 및 공기공급시스템을 제작하였고 이를 이용하여 산기관의 SOTE를 물속의 용존산소(DO: Dissolved Oxygen) 농도측정 결과로부터 구하였다. 또한 가시화 수조의 상부에서 기포 크기를 측정하였으며 수조하부의 산기관 주위에서 일어나는 기포조개짐(air bubble break-up) 현상도 고속카메라를 이용하여 관찰하였다. 본 연구에 사용된 실험장치 구성도를 Fig. 1에 나타내었다. 가시화 수조(①)는 단면적은 660×660 mm²의 정방형으로 높이는 5,200 mm이며 실제 하/폐수처리장의 폭기조의 깊이(4,500 mm~5,000 m)와 유사하도록 설계하였다. 수조 내부의 기포 및 물의 유동가시화를 위해 두께 20 mm의 투명아크릴로 모든 측면 벽을 구성하였

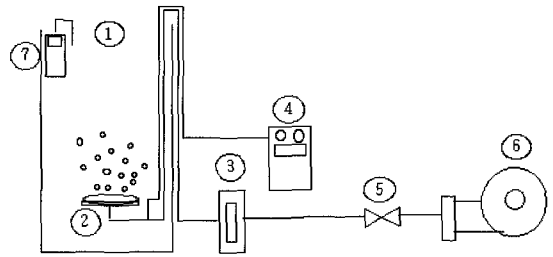


Fig. 1 Schematic of experimental setup : ①가시화수조, ②산기관, ③유량계, ④압력계, ⑤유량조절밸브, ⑥공기공급기(Air compressor) and ⑦DO 측정장치

으며, 수조의 강도유지와 부식방지를 위해 스테인리스 스틸을 사용하여 수조의 프레임을 구성하였다. 수조의 유지와 보수의 편리성을 위하여 수조는 상부(높이 2,800 mm)와 하부(높이 2,400 mm)의 2단으로 이루어졌다.

산기관으로 공급되는 공기의 유량측정을 위한 유량계(③)는 50~300 l/min의 측정범위를 가지고 있는 Dwyer사의 Rate-Master 유량계를 설치하였으며, 산기관(②) 통과 유동저항 측정을 위한 압력계(④)는 산기관 입구에서 공급공기의 압력을 측정하는 장치로서 Druck사의 디지털 차압계 DPI 705(측정범위 0 ~200 kPa)를 사용하였다. 유량계에 부착된 유량조절밸브(⑤)를 사용하여 산기관으로 공급되는 공기유량을 조절하였으며, 공기공급을 위한 5마력 용량의 공기압축기(⑥)를 사용하였다. 본 연구에서는 기존의 음향공진 산기관과의 비교를 위하여 음향공진 산기관의 설계유량인 150 l/min의 공기유량에서 모든 실험을 실시하였다.

수조에는 산기관에서 발생된 기포의 가시화를 위하여 깨끗한 수돗물을 수조높이 5,000 mm까지 공급하였고, 산기관은 수조 바닥에서 약 150 mm의 높이에서 수조단면의 중심에 위치하도록 설치하였다. 수조 바닥에 설치된 산기관으로 공기공급 배관을 따라 수조 내의 물이 주변장치로 역류하는 것을 방지하기 위하여 산기관으로의 공기공급 배관은 Fig. 1에서 알 수 있듯이 수조상부에서 하부로 내려가 산기관으로 연결되도록 하였다.

2.2 기포 이미지 촬영

산기관을 나온 공기의 기포조개짐 현상을 보기 위하여 고속카메라를 이용하여 수조하단에 설치된 산기관

을 촬영하였다. 고속촬영은 Photron Fastcam APX 시스템을 사용하였으며 광원은 전면 1개소와 후면 1개소의 총 2개를 설치하였다. 고속카메라의 촬영 스피드는 상승하는 기포가 정지 이미지를 위하여 초당 1,000장으로 설정하였고, 공간해상도는 빠른 데이터 처리를 위하여 기포이미지 분석에 영향을 주지 않는 해상도인 512×512 픽셀을 설정하였다.

물속의 기포크기를 측정하기 위한 다양한 시도가 있어 왔음에도 불구하고 아직까지는 매우 제한된 실험 조건 및 장치에서만 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있다. 물속에 혼자 떠있는 기포의 크기는 직접 기포를 촬영함으로써 알 수 있으나, 폭기공정과 같이 물속에 많은 수의 기포가 존재할 때에는 기포 이미지의 중첩으로 인하여 직접적인 측정방법으로는 기포의 크기 및 그 분포를 알아내기가 쉽지 않으며 이를 극복하기 위한 방법들이 개발되고 있다. 대표적인 방법 중의 하나로 기포의 크기 및 분포에 따른 물 속에서의 음파의 진행속도 변화 및 음파의 감쇄 효과를 통계학적으로 처리하여 기포의 크기 및 분포를 예측하는 음향학적 기포크기 측정방법⁽⁴⁾이 있다. 그러나 음향학적 기포크기 측정방법을 이용하기 위해서는 기포크기 측정장치의 설치를 위해서 큰 수조가 필요하며, 또한 음향학적 기포크기 측정방법의 유효성을 확인하기 위해서는 기포 촬영결과와 음향학적 측정결과와의 직접 비교가 필수적이다.

이에 본 연구의 기포크기 측정은 가시화수조의 작은 단면적과 측정의 용이성을 고려하여 국부적인 영역 안에 있는 기포의 직접적인 촬영기법을 사용하였다. 기포의 중첩에 의한 기포크기 측정의 어려움을 극복하기 위하여 수조 상부에 $80(\text{폭}) \times 50(\text{높이}) \times 25(\text{깊이}) \text{ mm}^3$ 크기의 기포크기 측정부(수조 높이 4,700 mm에 위치, Fig. 4 참조)를 아크릴 내벽에 설치하였다. 기포크기 측정부 안의 기포를 촬영하기 위하여 KODAK DC280 디지털 카메라(공간해상도 $1,760 \times 1,168$ 픽셀)를 사용하였다.

2.3 SOTE 계산방법

산기관이 물속에 산소를 공급하는 능력을 평가하는 SOTE를 구하는 물속의 용존산소농도 측정실험 전에, 물속에 녹아 있는 산소를 제거하여 용존산소 농도를 거의 0으로 만들어야 한다. 이를 위하여 미국 규격에 명시된 용존산소제거방법 중 하나인 질소 스트리핑 탈

산소방법(Nitrogen stripping deoxygenation)을 사용하였다.

SOTE를 구하기 위한 용존산소농도 측정은 $\pm 0.03 \text{ mg/l}$ 의 정확도를 가진 YSI-58 용존산소측정기(dissolved oxygen meter)를 사용했으며 정확한 용존산소농도 측정에 필요한 최소유속인 0.3 m/sec 이상의 국부적인 물의 유속을 얻기 위하여 용존산소측정기의 측정센서에 YSI 5795A(submersible stirrer)를 장착하였다.

현재 청수(clean water)에서의 산소전달측정방법에 대한 국내표준이 없기 때문에 미국토목공학회 규격인 ANSI/ASCE 2-91⁽¹⁾을 적용하여 $t=0$ 에서 $t=9$ 분까지는 30초 간격으로 측정하였고 그 이후 $t=15$ 분 정도까지는 1분 간격으로 용존산소 농도를 측정하여 각 산기관 당 총 24개 이상의 용존산소농도 측정값을 얻었다.

상기와 같이 측정된 시간별 용존산소농도를 이용하여 표준산소전달효율(SOTE)을 구하였으며, Log Deficit Parameter Estimation Method를 적용하여 미국 UCLA대학의 Michael Stenstrom 교수가 만든 SOTE 계산프로그램인 DO_PAR1_08⁽⁵⁾을 사용하였다. SOTE를 구하는 순서는 다음과 같다.

$$\ln(C_{\infty}^* - C) = \ln(C_{\infty}^* - C_0) - K_L a(t - t_0) \quad (1)$$

$$K_L a_{20} = K_L a \theta^{20 - T} \quad (2)$$

$$C_{\infty 20}^* = C_{\infty}^* \left(\frac{1}{\tau \Omega} \right) \quad (3)$$

여기서,

C = 용존산소농도

C_0 = 시간 t_0 에서의 용존산소농도,

$K_L a$ = 수온 $T^\circ\text{C}$ 에서의 물질전달율(apparent mass transfer coefficient),

$K_L a_{20}$ = 수온 20°C 에서의 물질전달율,

C_{∞}^* = 수온 $T^\circ\text{C}$ 에서의 정상상태 포화용존산소농도,

$C_{\infty 20}^*$ = 수온 20°C 에서의 정상상태 포화용존산소농도,

θ = 온도보정계수 (1.024),

τ = 용존산소 표면포화농도로부터 구한 온도보정계수,

Ω = 압력보정계수를 나타낸다.

측정시간별 용존산소농도 (C)를 이용하여 식 (1) ~ (3)에서 표준조건 (20°C , 1기압, 상대습도 100%)

에서의 물질전달율($K_L a_{20}$)과 정상상태 포화용존산소 농도 ($C_{\infty 20}^*$)를 구한 후 아래의 식 (4)~(5)를 이용하여 표준산소전달효율(SOTE)을 계산한다.

$$SOTR = K_L a_{20} C_{\infty 20}^* V \quad (4)$$

$$SOTE = SOTR / (\text{단위시간동안 공급된 공기질량}) \\ = SOTR / 1.034 Q_s \quad (5)$$

여기서,

SOTR = 표준산소전달율(Standard Oxygen Transfer Rate),

V = 수조내의 물의 체적,

Q_s = 산기관으로 공급된 압축공기의 유량이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 산기관 설계인자

본 연구의 노즐형 산기관의 설계인자를 선정하기 위하여 예비실험으로 기포 가시화실험을 수차례 실시하였다. 이로부터 Fig. 2에 나타난 바와 같이 노즐목 직경($\phi 2=4, 5 \text{ mm}$)과 길이($L=0, 4 \text{ mm}$)를 본 연구의 주요 설계인자로 선정하였고, 노즐형 산기관의 높이($H=30 \text{ mm}$)와 입구직경($\phi 1=23 \text{ mm}$) 그리고 노

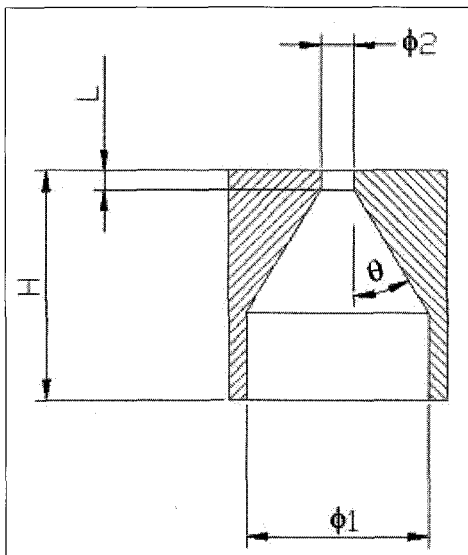


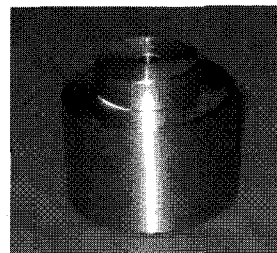
Fig. 2 Design parameters of nozzle-type diffuser

즐 수축각($\theta=33^\circ$)은 고정하였으며 이들 설계인자의 조합으로 총 3종의 노즐형 산기관을 제작하였다. 아래의 Fig. 3은 본 연구를 위해 제작된 노즐형 산기관 (a)과 본 연구의 비교 대상인 기존의 음향공진 산기관 (b)을 나타내고 있다.

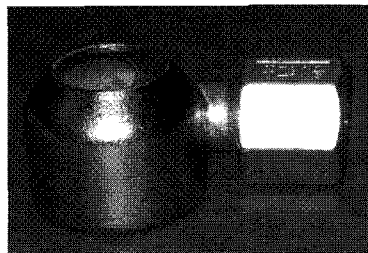
3.2 기포 이미지 촬영 결과

공기유량 150 l/min 의 경우 노즐형 산기관에서 만들어진 기포가 수조높이 $4,700 \text{ mm}$ 에 설치한 기포 크기 측정부에 도달한 이미지를 Fig. 4에 나타내었다. 기포크기 측정부에서 측정된 기포의 크기는 산기관의 종류에 따라서 별다른 변화는 보여 주지 않았다. 전반적으로 모든 산기관에서 기포의 크기는 직경 $1\sim 6 \text{ mm}$ 범위에 있었으며 직경 6 mm 이상의 큰 기포도 모든 실험조건에서 관측되었다. 기포크기 측정부를 통과하는 기포의 수 및 크기는 전반적인 경향은 있으나 동일 산기관의 경우에도 매 촬영 시 마다 어느 정도의 차이를 보여 주었다. 직경이 3 mm 이하인 기포의 모양은 원형에 가까웠으며 직경이 3 mm 이상인 기포는 타원형이었고, 타원 장축의 길이가 약 6 mm 이상인 타원의 기포는 일정한 경향이 없는 비대칭 타원형인 경우가 많았다. 타원형 기포의 장축길이/단축길이 비는 $1.15\sim 4.0$ 범위 내에 있었다.

아래의 Fig. 5와 6에 고속카메라를 이용하여 $1,000$



(a)



(b)

Fig. 3 (a) Nozzle-type diffuser and (b) acoustic resonance diffuser

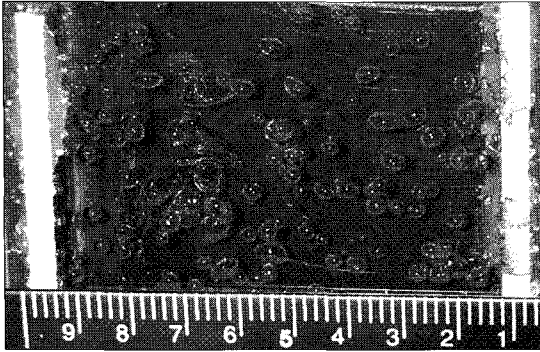


Fig. 4 Bubble size measurement

fps의 촬영스피드로 촬영한 산기관 출구의 기포조개짐 현상을 나타내었다. 노즐형 산기관의 경우에는 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 산기관을 빠른 속도로 나온 기포는 큰 물-기포 경계면의 큰 전단응력(shear stress)에 기인하여 곧바로 작은 기포로 쪼개져 상승하는 것이 관찰되었고 산기관 출구 주위에 미세한 기포들이 많이 생성됨을 알 수 있었다. 기존의 음향공진 산기관의 경우에는 Fig. 6에서 알 수 있듯이 산기관으로 공기를 공급하는 배관에 기인한 맥동과 산기관 본체에 해당하는 음향공진관의 체적에 의하여 산기관 출구를 나온 공기는 음향공진 산기관의 출구직경(30 mm)보다 큰 직경을 가진 기포덩어리의 형태를 나타내고 있으며 이 커다란 기포덩어리는 부력에 의하여 상승하면서 밀도차이에 기인한 물-기포 경계면의 불안정성(instability)에 의하여 작은 기포로 쪼개진다. 기존의 음향공진 산기관의 기포조개짐 구간은 산기관 출구로부터 약 1~1.5 미터 정도이며 그 이후로는 기

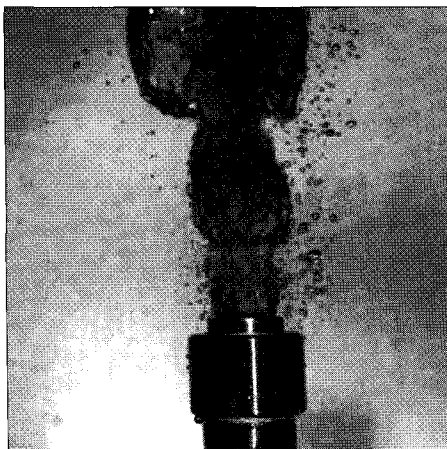


Fig. 5 Bubble breakup from a nozzle-type diffuser

Table 1 SOTE results

Diffuser	L [mm]	$\phi 2$ [mm]	ΔP [kPa]	SOTE [%]	SOTE increase to the reference
ND 1	0	4	52.9	25.15	40.1 % ↑
ND 2	0	5	16.3	20.88	16.3 % ↑
ND 3	4	5	12.6	23.26	29.5 % ↑

포의 크기에 별다른 변화 없이 수조 상부로 상승한다.

3.3 SOTE 실험 결과

용존산소농도 측정실험으로부터 얻은 결과를 이용하여 Log Deficit Estimation Method를 적용해 얻은 SOTE 결과를 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 알 수 있듯이 노즐 직경이 4 mm인 경우에는 SOTE는 높으나 산기관 통과 유동저항이 크며, 노즐 직경이 5 mm인 경우에는 산기관 통과 유동저항도 별로 크지 않으면서 기존 음향공진 산기관에 비하여 향상된 산소 전달성능을 보여준다. 특히 노즐 목의 존재가 SOTE의 증가에 기여함을 나타내고 있는데, 노즐 목이 없는 경우(L=0)에는 유동저항과 SOTE 증가율이 모두 노즐 목이 있는 경우(L=4)보다 좋지 않았다. 이로부터 노즐 수축각에 알맞은 노즐 목의 길이는 노즐 목의 시작 위치에서 유동의 분리(flow separation)와 재부착(reattachment) 등의 영향으로 산기관을 빠져나가는 기포의 운동량에 좋은 영향을 주는 것으로 사료된다.

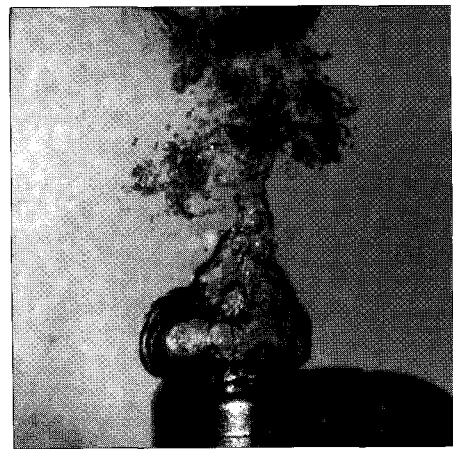


Fig. 6 Bubble breakup from a reference diffuser

4. 결 론

- 1) 기존 음향공진 산기관에 비하여 향상된 산소전달 성능을 나타내는 새로운 형태의 산기관인 노즐형 산기관을 설계/제작하였으며 가시화 수조를 이용하여 실험적으로 연구하였다.
- 2) 가시화 수조 상부에 도달하는 기포의 크기는 산기관의 종류에 별다른 영향을 받지 않는 것으로 관측되었다.
- 3) 노즐형 산기관의 산소전달성능이 기존의 음향공진 산기관에 비하여 향상된 것은 산기관 주위의 기포 쪼개짐이 노즐형 산기관의 경우에 더욱 활발하였기 때문인 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 산업자원부 공통핵심기술 개발사업 (Wave Technology를 이용한 산기관 개발, 과제번호 10003129)의 일환으로 진행되었으며, 연구비를 지원해 주신 산업자원부에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- (1) ASCE Standard, 1992, "Measurement of oxygen transfer in clean water", ANSI/ASCE 2-92, 2nd Ed., American Society of Civil Engineers.
- (2) 홍석윤, 문종덕, 1996, "음향공진과 맥진동 현상을 이용한 폐수처리용 산기관 개발 및 성능시험", 한국음향학회지, 15권 6호, pp. 52~58.
- (3) 임동렬, 조남효, 2004, "음향공진 산기관의 설계인자 특성", 대한환경공학회지, 26권 4호, pp. 446~456.
- (4) 최복경, 1995, "Coherent Acoustic Bubble Sizing Method in Bubbly Liquids", 박사학위논문, 성균관대학교 물리학과.
- (5) Dr. Stenstrom's Research Group Home Page, 2003, <http://fields.seas.ucla.edu>.