

# 공기의 자가흡입에 의해 마이크로버블을 발생시키는 보텍스 노즐에 대한 실험적 연구

곽구태\*, 박상희<sup>#,\*\*</sup>, 김창수<sup>\*\*\*</sup>, 유상열<sup>\*\*\*</sup>

\*금오공과대학교 기계공학과 대학원, \*\*금오공과대학교 기계공학과, \*\*\*(주)신생테크

## An experimental study on the Vortex nozzle for generating micro-bubble by air self-suction

Gu Tae Kwak\*, Sang Hee Park<sup>#,\*\*</sup>, Chang Su Kim<sup>\*\*\*</sup> and Sang Yul U<sup>\*\*\*</sup>

\* School of Mechanical Engineering, Kumoh Nat' l Univ, \*\* School of Mechanical Engineering,  
Kumoh Nat' l Univ, \*\*\* SinSaeng Tech

(Received 3 February 2015; accepted 23 February 2015)

### ABSTRACT

This experiment was a study of a Vortex nozzle designed to produce micro-bubbles due To investigate air self-suction and the generation of micro-bubble by the Vortex nozzle, the dimensions of air intake region, the nozzle shape, and the nozzle exit diameter ( $d_n=5,7,9.2,12.3\text{mm}$ )werevaried. The air self-suction rate was ~1,000 to 2,000 cc/min at the orifice nozzle (7 mm), and ~100 and ~22 cc/min at the sector nozzles (9.2 and 12.3 mm, respectively). The most bubbles were detected in the orifice nozzle, but bubbles less than 50  $\mu\text{m}$  were found in the 12.3-mm sector nozzle. The dissolved oxygen in the tank water was much greater in Case 2 than in Case 1, at both the orifice and sector nozzles. Moreover, the reduction rate of dissolved oxygen was found to be less at the sector nozzles, than at the orifice nozzle.

**Key Words** : Micro-bubble(마이크로버블), Vortex nozzle(보텍스 노즐), Self-suction(자가흡입), Nozzle shape (노즐형상), Oxygen dissolved(용존산소량)

### 1. 서 론

최근 반도체 산업의 제품에서 마이크로미터 단위의 미세 공정기술이 점점 발달됨으로 인해 이들을 세정하기 위한 기술이 필요하게 되었다. 최근 새로운 세정방식으로 마이크로버블(Micro-bubble)을 이용한 세정에 대한 연구가 진행되고 있다. 마이크로버블은 직경이 50  $\mu\text{m}$  이하의 기포를 말한다. 일반 기포에 비해 마이크로버블의

특성은 다음과 같다. 첫 번째, 마이크로버블은 수중에서 상승시간이 느려서 수중에서 오랫동안 지속할 수 있다. 두 번째, 마이크로버블은 프리라디칼(Free-radical)로 인해 음전하의 성격을 띠어 흡착력을 가진다. 세 번째, 마이크로버블은 일반 기포에 비해 기체와 액체가 맞닿는 면적이 커서 질량 및 에너지 전달력이 크다. 이러한 특성으로 인해 마이크로버블을 이용한 세정은 미세 패턴 내의 이물질 제거하는데 우수하다는 것으로 알려져 있다.<sup>[1,2]</sup>

본 연구의 목적은 보텍스 노즐(Vortex nozzle) 내부에서 물의 와류 유동에 의해 공기가 자가흡입

# Corresponding Author : parksh@kumoh.ac.kr  
Tel: +82-54-478-7298 , Fax: +82-54-478-7319

(Self-suction)이 되도록 하여 노즐 출구를 통해 마이크로버블을 발생시키는 보텍스 노즐을 연구하는 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 노즐의 공기유입부의 직경과 길이, 노즐 출구형상 그리고 공기유입관의 길이를 변화시켜 노즐 내부로 공기가 자가 흡입이 되면서 노즐의 출구를 통해 마이크로버블을 발생시키는 보텍스 노즐을 연구한다. 또한 실험 조건의 변화에 따라 노즐 출구를 통하여 발생하는 마이크로버블의 크기 및 분포를 확인한다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에 사용된 마이크로버블을 발생시키는 실험장치의 개략도를 나타낸다. 본 실험장치는 크게 보텍스 노즐 시스템, 수조, 유체 순환부, 측정부로 구분된다.

보텍스 노즐 시스템의 크기는 직경 96mm, 길이 106mm, 내부체적이 약 250mL이며, 노즐 내부에서 물의 와류유동을 가시화하기 위해 두께 8mm의 투명아크릴로 제작하였다. 수조는 마이크로버블수와 일반수를 비교하기 위해 2개의 공간으로 분리하였고 크기는 570×600×600mm<sup>3</sup>이다. 펌프는 유량 20LPM의 횡형 다단펌프(CALPEDA MXAM-203)를 사용하였다. 압력계는 측정 범위가 0~1MPa인 (주)드림팩토리 NO.11를 사용하였다. 물유량은 초음파유량계(Dynasonics사의 UFX)를 사용하였고 측정 범위는 0~9m<sup>3</sup>/s이다. 공기유량계는 Dwyer사의 RM 시리즈이며 측정 범위는 0~1L/min이다. 수조 내의 용존산소량은 DO 측정기(DKK TOA사의 DO-31P모델)를 사용하였고 측정 범위는 0~20mg/L이다.

Fig. 2는 마이크로버블을 발생시키는 보텍스 노즐 시스템을 나타낸다. 보텍스 노즐은 와류유동을 발생시키는 선회유도부, 공기가 흡입되는 공기유입부 그리고 마이크로버블을 발생시키는 노즐 출구부로 구성된다. Fig. 2에서  $D_{air,in}$ 은 공기유입부의 직경,  $L_{air,in}$ 은 공기유입부의 길이,  $L_{air,bar}$ 는 공기유입관의 길이를 나타내며, 본 실험에서는 Table 1에 보여진 것처럼  $D_{air,in}=10, 15, 20\text{mm}$ ,  $L_{air,in}=10,$

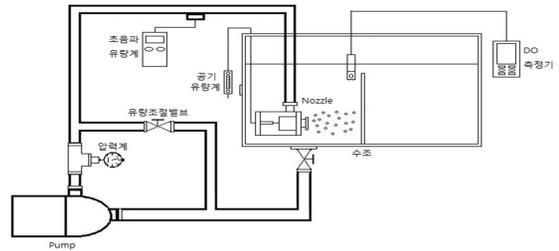


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

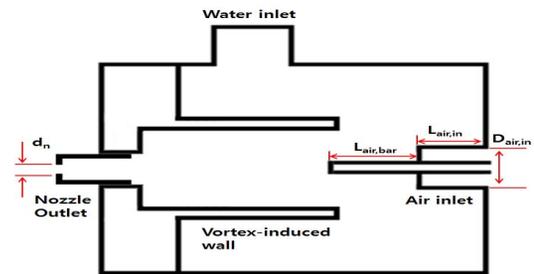


Fig. 2 Schematic diagram of vortex nozzle system

Table 1 Experimental parameters of air inlet parts

Geometry	$L_{air,in}$		$D_{air,in}$			$L_{air,bar}$		
Size(mm)	10	20	10	15	20	10	20	30

Table 2 Shape and outlet diameter of nozzle

Nozzle	Orifice nozzle		Sector nozzle	
Shape				
$d_n$ (mm)	5	7	9.2	12.3
Type	I	II	III	IV

20mm,  $L_{air,bar}=10, 20, 30\text{mm}$ 로 변화시켰다. Table 2에 보여진 것처럼 노즐 출구부의 형상과 직경( $d_n$ )은 Orifice nozzle의 경우에는  $d_n=5\text{mm}$ 와  $7\text{mm}$ 로, Sector nozzle에서는  $d_n=9.2\text{mm}$ 와  $12.3\text{mm}$ 로 변화시켜 실험을 수행하였다.

Fig. 3은 노즐 내로 유입된 물과 공기에 의한 유동 형태와 마이크로버블의 발생을 모사한 그림이다. 노즐 내부에서 마이크로버블이 생성되는 과정은 다음과 같다. 먼저 노즐 상부의 물유입관을

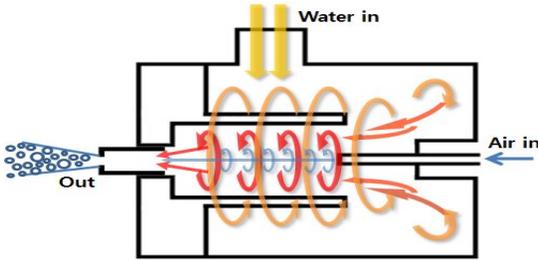


Fig. 3 Schematic representation of micro-bubble and fluid flow in vortex nozzle system

통해 유입된 물은 회전유도벽에 의해 와류유동을 일으키게 된다. 이 유동에 의해 유도벽 입구영역(공기 유입관 앞부분)에는 음(-)압력으로 낮아져서 공기유입관을 통해 공기가 저절로 흡입하게 된다. 그 후에 회전유도벽 내부에서는 물의 와류유동과 흡입된 공기의 혼합으로 저압 및 고속의 혼합 와류유동이 발생하여 기포가 잘게 부서지면서 노즐 출구에서 마이크로버블이 만들어지게 된다.

본 연구의 실험방법은 다음과 같은 순서로 수행하였다. 먼저 수조에 보텍스 노즐을 설치한 후에 약 200L 정도의 물을 채운다. 펌프를 가동시켜 물이 전체시스템을 순환시킨 후, 유량조절밸브를 조절하여 보텍스 노즐에 적정 유량을 공급하였다. 또한 노즐에 공급되는 물의 유량은 초음파 유량계를 사용하여 실시간으로 확인되도록 하였다. 보텍스 노즐 내부로 들어가는 공기량은 공기유입부에 설치된 공기유량계로 측정하였다. 노즐 출구에서 발생된 마이크로버블은 수조 내에 확산되며 입자 측정시스템을 이용하여 마이크로버블의 발생량 및 분포도를 측정하였다.

본 연구에서는 두 가지의 실험을 수행하였다. 첫 번째 실험은 보텍스 노즐 내로 공기가 자가흡

입이 되는 조건을 구하는 것이다. 이 실험에서는 Sector nozzle을 이용하여 공기유입부의  $D_{air,in}$ ,  $L_{air,in}$ ,  $L_{air,bar}$ 를 변화시켜 공기의 자가흡입이 일어나면서 마이크로버블이 발생하는 조건을 구하는 것이다.

두 번째 실험에서는 첫 번째 실험에서 구한 실험조건을 기준으로 노즐 종류와 노즐 출구의 직경의 변화에 따른 공기의 자가흡입량과 마이크로버블의 발생량 및 발생분포를 비교하는 것이다. 수조 내의 용존산소량은 먼저 DO 측정기를 이용하여 수조 내의 물의 용존산소량을 측정한다. 그 다음에 보텍스 노즐 시스템으로 10분 동안 마이크로버블을 발생시킨 이후에 버블 발생을 멈춘 직후부터 1분 간격으로 총 10분 동안에 마이크로버블에 의해 용해된 용존산소량을 측정한다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 노즐 내로의 공기의 자가흡입조건

본 연구에서는 먼저 Sector nozzle에서 Table 1과 2에서 나타낸 변수( $D_{air,in}$ ,  $L_{air,in}$ ,  $L_{air,bar}$ ,  $d_n$ )를 서로 조합시킨 총 36개의 실험조건을 이용하여 보텍스 노즐 내부로 공기의 자가흡입 및 마이크로버블의 생성이 일어나는 실험을 수행하였다. 이들 실험에서 공기의 자가흡입이 일어나면서 마이크로버블이 발생하는 경우는 다음의 3가지 실험조건에서만 나타났다. 즉  $d_n=9.2\text{mm}$ 일 때  $D_{air,in}$ ,  $L_{air,in}$ ,  $L_{air,bar}=15, 10, 20\text{mm}$ 인 경우,  $d_n=12.3\text{mm}$ 일 때는 10, 20, 20mm와 15, 10, 20mm인 경우이다. 다른 실험조건에서는 물유입관을 통해 노즐 내부로 들어오는 물이 공기흡입관을 통해 밖으로 빠져나가게 되는 역류(Back flow)현상이 일어남을 보였다. 이것은 노즐 내의 와류유동에 의해 생성되는 음(-)압력 영역과 공기흡입관의 위치가 서로 맞지 않기 때문인 것으로 예측된다.

Fig. 4(a)와 (b)는 보텍스 노즐에서 공기흡입관을 통한 공기의 자가흡입 및 마이크로버블의 생성을 유동가시화한 사진이다. 노즐에서 공기흡입부의 크기인  $D_{air,in}$ ,  $L_{air,in}$ ,  $L_{air,bar}$ 는 15, 10, 20mm이다.

Fig. 4(a)는 Sector nozzle( $d_n=9.2\text{mm}$ )을 사용할 경

Table 3 Air self-suction condition at Sector nozzle

Case	Size (mm)				Air self-suction (cc/min)
	$d_n$	$D_{air,in}$	$L_{air,in}$	$L_{air,bar}$	
1	9.2	15	10	20	100
2	12.3	10	20	20	100
3	12.3	15	10	20	100~200

우로서 공기의 자가흡입이 없이 마이크로버블이 발생됨을 보여준다. 물의 유입유량은 22L/min이다.

이것은 노즐 시스템 상부의 물 유입관에서 유입된 물이 Sector nozzle의 출구를 통해 전부 빠져나가야 하는 데 노즐 출구의 직경이 너무 작아서 일부분의 물만이 유출되고 나머지 유입유량은 공기 유입관을 통해 빠져 나가는 역류현상이 일어나기 때문이다. 그러나 마이크로버블의 발생은 물의 와류유동에 의해 노즐 내부의 압력이 음(-)압력으로 급격히 낮아져 노즐 내부에서 공동현상이 발생하여 물의 일부가 기체화되면서 마이크로버블이 생성되는 것으로 예측된다.

Fig. 4(b)는 노즐 직경을 12.3mm로 더 크게 할 경우이다. 이 실험에서는 공기의 자가 흡입이 일어나면서 마이크로버블이 발생됨을 보였다. 이것은 물 유입관을 통해 노즐 내부로 유입된 물이 회전 유도벽에 의해 와류유동이 발생되어 유도벽 입구영역(공기유입관 앞부분)이 음(-)압력으로 낮아지면서 공기가 저절로 흡입하게 된다. 그 이후 회전유도벽 내부에서는 물의 와류유동과 흡입된 공기의 혼합으로 기포가 잘게 부서지면서 노즐 출구를 통해 마이크로버블이 분출됨을 보여준다.

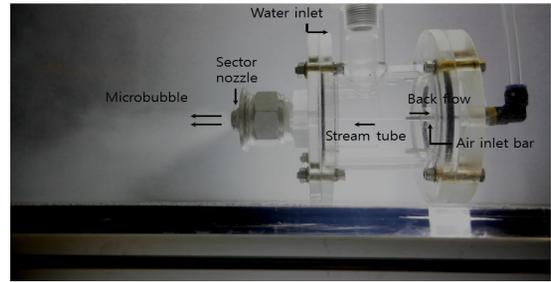
### 3.2 보텍스 노즐 내의 자가흡입량, 유관 그리고 수조내의 용존산소량의 변화

Fig. 5는 Case 1(10, 20, 20mm)과 Case 2(15, 10, 20mm)로 일정할 때 Table 2에 보여진 Orifice nozzle과 Sector nozzle의 출구 직경( $d_n$ )의 변화에 따른 공기의 자가흡입량을 나타낸다.

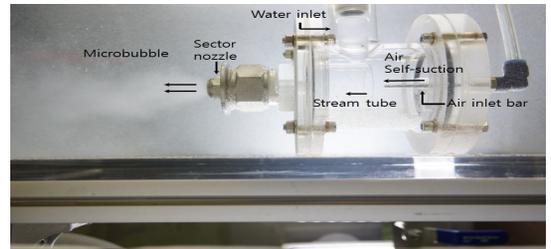
그림에서 Outlet Type I은  $d_n=5\text{mm}$ 의 Orifice nozzle을, Type II는  $d_n=7\text{mm}$ 의 Orifice nozzle을 사용하여 수행한 실험을 나타낸다. 또한 Type III와 IV는 9.2mm의 Sector nozzle과 12.3mm의 Sector nozzle을 사용하여 수행한 실험을 나타낸다.

Outlet Type I의 Case 1과 2의 실험결과는 Fig. 4(a)에서 설명하였듯이 노즐 상부에서 유입된 물이

Orifice nozzle의 출구를 통해 모두 빠져나가야 하는데 노즐의 출구 직경이 5mm로 너무 작아서 물의 일부분이 공기유입관을 통해 역류하는 현상이



(a) Sector nozzle,  $d_n=9.2\text{mm}$



(b) Sector nozzle,  $d_n=12.3\text{mm}$

Fig. 4 Visualization of microbubble and air self-suction at  $D_{air,in}$ ,  $L_{air,in}$ ,  $L_{air,bar}=15, 10, 20\text{mm}$

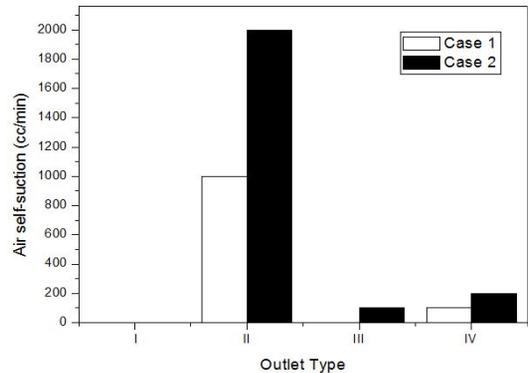


Fig. 5 Variation of air self-suction flow rate

일어나서 공기의 자가흡입량이 없음을 나타낸다.

노즐 출구의 직경을 7mm로 증가시킨 Type II의 경우에는 Case 1과 2에서 모두 공기의 자가 흡입이 일어났으며, Case 1은 1,000cc/min으로 Case 2는 2,000cc/min으로 측정되었다. 이 실험에서는 과도한 공기의 자가흡입으로 인해 수 mm 크기의 일반 기포가 마이크로버블과 함께 발생하였다.

Type III의 실험에서 Case 1은 Type I과 같이 노즐 내에서 물의 역류 현상으로 인해 공기의 자가흡입량이 없으나, Case 2는 100cc/min 정도로 공기가 흡입되었다. 그리고 Type IV의 경우 Case 1은 100cc/min, Case 2는 200cc/min 정도로 공기가 자가 흡입되었다. Sector nozzle을 사용한 Type III의 Case 2 및 Type IV의 Case 1과 2의 경우에는 노즐 출구에서 마이크로버블만 발생함을 보였다.

Fig. 6은 Outlet Type I~IV의 실험조건으로 보텍스 노즐 내의 선회유도벽 내에서 생성된 공기 유관의 직경 변화를 나타낸다.

공기 유관의 생성은 노즐 내부로 자가 흡입된 공기 혹은 공동현상으로 인해 수중에서 기체화된 버블이 회전유도관 내의 공기유입관과 노즐 출구 사이의 유동 중심축에서 유체의 와류 유동의 원심력에 의해 발생하게 된다. 이 때 형성되는 유관은 0.5초 정도의 간격으로 직경이 커지거나 작아지는 것을 반복하는 불안정한 상태로 형성된다.

Type I에서 유관 직경은 Case 1과 2의 실험에서 모두 0.5mm 이하로 동일하게 형성되었다. 공기의 자가 흡입이 없는 조건에서 형성되는 유관은 노즐 내부에서 공동현상으로 인해 물속에서 생성되는 기체에 의해 생성되며 Type II~IV의 조건에 비해 유관 직경이 매우 작게 생성되었다.

Type II의 경우 Fig. 5에서 설명하였듯이 다른 실험조건에 비해 공기의 흡입량이 매우 많아서 유관의 직경도 1.5~2.5mm 범위로 가장 크게 나타났다. Type III의 조건에서 Case 1은 0.5mm 이하로, Case 2는 0.5~1.0mm 범위로 형성되었다. 그리고 Type IV의 Case 1에서 형성된 유관은 Type III의 Case 2와 공기의 자가 흡입량이 100cc/min으로 거의 동일하여 유관의 직경도 거의 일치함을 보였다. 이 결과에서 유관의 직경과 공기의 자가 흡입량은 서로 의존함을 볼 수 있었다.

Fig. 7은 Case 1(10, 20, 20mm)과 Type II, III, IV 조건에서 보텍스 노즐을 통해 발생하는 마이크로버블의 발생량 및 발생분포를 측정된 결과이다.

마이크로버블의 발생량은 입자측정시스템에 0.1L의 버블수를 공급하여 측정된 마이크로버블의 개체수이다. 마이크로버블의 측정범위는 0~100  $\mu$ m 범위로 설정하여 10  $\mu$ m 단위로 조절하여 각

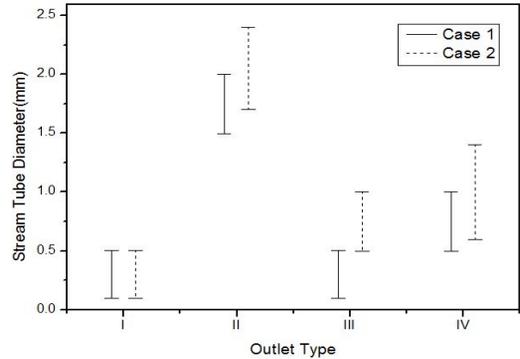


Fig. 6 Variation of stream tube diameter for outlet type I~IV

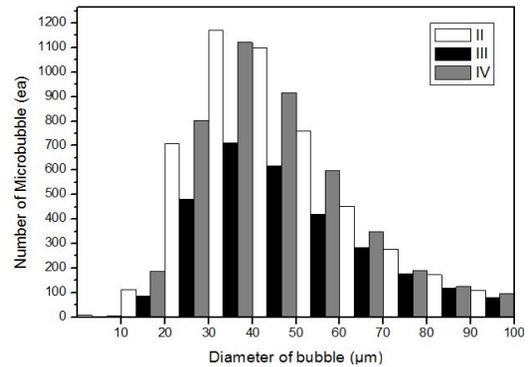
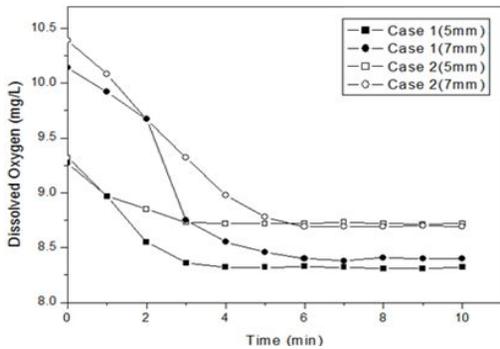


Fig. 7 Distributions of Microbubbles generated by vortex nozzle system

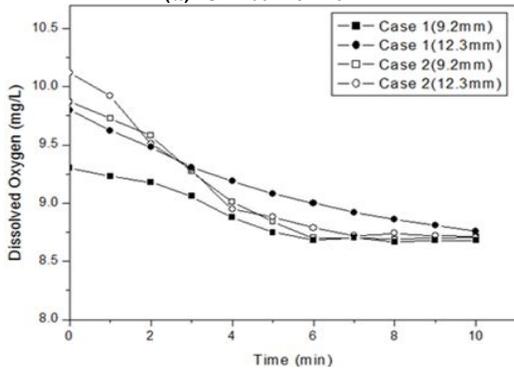
범위 당 입자수를 나타내었다.

Type II(7mm, Orifice nozzle)의 실험에서 측정된 마이크로버블의 총 개수는 6,505개, Type III(9.2mm, Sector nozzle)에서는 2,975개, Type IV(12.3mm, Sector nozzle)에서는 4,387개이다. 이 중에서 직경이 50  $\mu$ m 이하의 버블은 약 1,500개 (Type II), 700개 (Type III), 1,100개 (Type IV) 정도로 되었다.

Type II의 실험에서는 공기의 자가 흡입량이 많아서 발생하는 마이크로버블의 개수도 가장 많이 발생되나 측정 범위인 100  $\mu$ m 이상을 초과하는 기포의 발생량 또한 역시 많았다. 용존산소량 측정 실험에서 큰 기포의 발생은 마이크로버블의 효



(a) Orifice nozzle



(b) Sector nozzle

Fig. 8 Variation of dissolved Oxygen for 10 minutes at Case 1 and 2

과를 저해하는 것으로 확인되었다. Type III에서는 공기의 자가 흡입이 없이 공동현상으로 인해 발생하는 기체로 마이크로버블이 발생하므로 입자 수가 가장 적게 측정되었다. 그리고 Type IV의 실험에서는 100cc/min 정도의 공기가 자가 흡입이 되었다.

위의 3가지 실험결과에서 보텍스 노즐을 통해 발생하는 입자 수는 자가흡입이 일어날 경우가 자가흡입이 없을 때보다 1.4~2.2배 더 많았으며, 측정된 총 버블 개수에 대해 50  $\mu$ m 이하의 마이크로버블의 발생량은 Type IV에서는 약 71%, Type III는 약 64% 그리고 Type II는 약 60% 정도이다.

Fig. 8(a), (b)는 Orifice nozzle(5, 7mm)과 Sector nozzle(9.2, 12.3mm)의 노즐 조건에서 Case 1(10, 20, 20mm)과 Case 2(15, 10, 20mm)의 변화에 따라

서 10분 동안에 마이크로버블을 생성한 후에 0분부터 1분 간격으로 10분간 수조 내의 용존산소량을 측정한 결과를 나타낸다. 실험 전에 측정된 수조 내의 용존산소량은 7.5mg/L이다.

Fig. 8(a)는 Orifice nozzle(7mm)을 사용할 때 용존산소량은 Case 2(0분)의 경우가 10.4mg/L로 가장 많이 측정되었다. 이것은 공기의 자가 흡입량이 2L/min으로 가장 많기 때문이다. Case 2의 경우 0분 이후부터 용존산소량은 시간이 경과함에 따라 급격히 감소하여 6분 이후부터 8.75mg/L로 일정하게 유지되었다.

Case 1의 경우는 용존산소량이 10.14mg/L로 Case 2보다 더 적게 측정되었다. Case 1의 경우는 Case 2보다 용존산소량이 더 급격하게 감소하여 6분이 경과한 이후부터 8.40mg/L로 일정하였다.

Orifice nozzle(5mm)의 경우는 Case 1과 2에서 7mm보다 용존산소량이 9.2~9.3mg/L(0분)로 약 1.2mg/L 더 적게 측정되었으나 Case 2의 경우는 3분 이후부터 8.80mg/L로, Case 1은 4분 이후부터 8.30mg/L로 일정하게 지속됨을 보였다.

따라서 Orifice nozzle을 사용할 때 수조 내에서 유지되는 용존산소량은 Case 2의 경우가 Case 1보다 더 많이 유지되었으나 노즐 출구직경에는 크게 의존하지 않음을 보였다.

Fig. 8(b)는 출구직경이 12.3mm인 Sector nozzle 일 때 용존산소량은 Case 2에서 10.12mg/L(0분)로 가장 많이 측정되었으나 0분 이후부터 용존산소량이 급격하게 감소하여 6분 경과한 후에는 8.7mg/L 정도로 일정하게 유지되었다. 그러나 Case 1은 초기에 Case 2보다 용존산소량이 9.78mg/L(0분)로 더 적게 측정되었으나 전체적인 감소율이 가장 낮게 되어 시간이 10분일 때 용존산소량의 측정값이 8.8mg/L으로 유지되었다.

따라서 Sector nozzle을 사용할 때 Case 2의 경우가 Case 1보다 전체적인 용존산소량 감소율이 낮아져서 수조 내에 유지되는 용존산소량이 보다 많아짐을 보였다. 그러나 노즐의 직경에 따라서는 용존산소량이 거의 차이가 없음을 보였다.

위의 결과에서 Sector nozzle의 경우가 Orifice nozzle에 비해 용존산소량의 감소율이 더 적게 나타났다. 이것은 Orifice nozzle(5mm)의 경우 발생되

는 마이크로버블의 양이 많지 않고, 7mm의 경우는 발생하는 큰 기포에 마이크로버블들이 흡착되거나 합쳐지면서 전체적인 마이크로버블의 상승 속도 및 소멸되는 양이 증가하여 유지되는 시간이 감소하기 때문인 것으로 예측된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 공기의 자가흡입으로 인해 마이크로버블을 생성시키는 보텍스 노즐에 대하여 실험연구를 수행하였다. 공기의 자가흡입 및 마이크로버블의 발생 정도를 파악하기 위하여 노즐 내의 공기 흡입부의 치수, 노즐출구에서 마이크로버블을 발생시키는 노즐형상 및 직경을 변화시켜 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. Sector nozzle에서 자가 흡입이 일어나면서 마이크로버블이 발생하는 실험조건 즉  $d_n=9.2\text{mm}$  일 때  $D_{air,in}$ ,  $L_{air,in}$ ,  $L_{air,bar}=15, 10, 20\text{mm}$  및  $12.3\text{mm}$  경우에는 10, 20, 20mm와 15, 10, 20mm를 구하였다. 또한 이들 조건에서 노즐 시스템 내의 공기의 자가 흡입 및 마이크로버블의 유동을 가시화하였다.

2. Outlet Type I의 Case 1과 Case 2 그리고 Type III의 Case 1은 공기의 자가흡입이 없어도 유관의 직경이 0.5mm 이하로 형성되었으나 공기의 흡입량이 가장 많은 Type II의 Case 1, 2는 0.5~2.5mm 범위로 가장 크게 형성되었다. 또한, 공기흡입량이 100~200cc/min인 Type III의 Case 2와 Type IV의 Case 1, Type IV의 Case 2의 경우에는 0.5~1.5mm 범위로 형성되었다. 이 결과에서 공기의 자가흡입량과 유관의 직경은 크게 의존함을 보였다.

3. 보텍스 노즐에서 발생한 마이크로버블의 총 개수는 Type II(7mm, Orifice nozzle)에서 가장 많이 측정되었으나 이 중에서  $50\mu\text{m}$  이하의 버블은 Type IV에서 71%로 가장 많이 존재하였다. 또한, 마이크로버블의 개수는 자가흡입이 일어날 경우가 자가흡입이 없을 때보다 1.4~2.2배 더 증가함을 보였다.

4. Orifice nozzle과 Sector nozzle에서 수조 내의 용존산소량은 Case 2의 경우가 Case 1보다 더 많

이 오랫동안 유지되었으며 노즐 출구직경에는 크게 의존하지 않음을 보였다. 또한, Sector nozzle의 경우가 Orifice nozzle에 비해 용존산소량의 감소율이 더 적게 나타남을 보였다.

#### 후 기

본 연구는 금오공과대학교학술연구비에 의하여 연구된 논문입니다.

#### REFERENCES

1. Zimmermanl W.B., Tesa V., Butlerl S., Bandulasenal H. H., "Microbubble Generation".
2. Futyu Laboratory, "An Introduction to Micro/nano Bubbles and their Applications".
3. Sadatomi, M., Kawahara A., Kano K., Ohtomo A., "Performance of a new micro-bubble generator with a spherical body in a flowing water tube", Experimental Thermal and Fluid Science Volume 29, Issue 5, Pages 615-623, June 2005.
4. Borkent B.M., Dammer S.M., Schonoherr H., Vancso G.J., Ohse D.L., "Superstability of Surface Nanobubbles", Prys. Rev. Lett. 98, 204502, 2007.