

## 수압이 자흡식 마이크로버블 발생장치의 산소 용해율에 미치는 영향

김현식, 임지영, 박수영, 김진한<sup>†</sup>

인천대학교 건설환경공학과

### Effect of Hydraulic Pressure on Bubble Dissolution Rate of Ejector Type Microbubble Generator

Hyun-Sik Kim, Ji-Young Lim, Soo-Young Park, Jin-Han Kim<sup>†</sup>

Department of Civil & Environmental Engineering, Incheon National University

(Received: Mar. 29, 2017 / Revised: May 9, 2017 / Accepted: May 10, 2017)

---

**ABSTRACT:** This study was performed to estimate bubble dissolution rate by change of hydraulic pressure according to increase of water depth. Experimental results showed that airflow rate was decreased by increase of hydraulic pressure. Because the force which acts on outlet of nozzle was increased by increase of hydraulic pressure. Mass-transfer coefficient decreased with decreasing airflow rate and increasing effective volume due to increase of hydraulic pressure as water depth increased. On the contrary, as the water depth increased, the bubble dissolution rate was increased because longer residence time of microbubble which was generated by ejector type microbubble generator. However it was thought that if water depth for capacity of ejector type microbubble generator is excessively increasing, bubble dissolution rate would be reduced due to low airflow rate and mass-transfer coefficient. Therefore, it is importance to consider the water depth when operating ejector type microbubble generator.

**Keywords:** Microbubble, Ejector type microbubble generator, Hydraulic pressure, Venturi nozzle, Breaker disk

---

**초 록:** 본 연구에서는 자흡식 마이크로버블 발생장치를 운전함에 있어서 수심 변화에 의한 수압이 산소 용해율에 미치는 영향에 대하여 평가하였다. 연구결과, 흡입 공기량의 경우 수압이 증가할수록 노즐 토출부에 작용하는 힘의 증가로 감소하는 경향을 나타내었다. 산소전달계수는 수심이 증가할수록 수압 증가에 의한 흡입 공기량 감소와 반응조 용적의 증가로 감소하는 경향을 나타내었으나 수심이 증가할수록 자흡식 마이크로버블 발생장치에서 발생하는 마이크로버블의 체류시간이 증가하여 산소 용해율은 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 자흡식 마이크로버블 발생장치 용량에 대비하여 수심이 과도하게 깊을 경우 낮은 흡입 공기량 및 산소전달계수로 인하여 산소 용해율은 감소할 것으로 판단된다. 따라서 자흡식 마이크로버블 발생장치 운전 시 수압이 중요한 고려사항이 됨을 확인할 수 있었다.

**주제어:** 마이크로버블, 자흡식 마이크로버블 발생장치, 수압, 벤츠히관, 충돌판

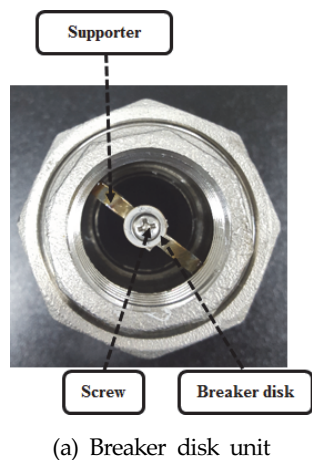
---

<sup>†</sup> Corresponding author(e-mail : [jinhan@inu.ac.kr](mailto:jinhan@inu.ac.kr))

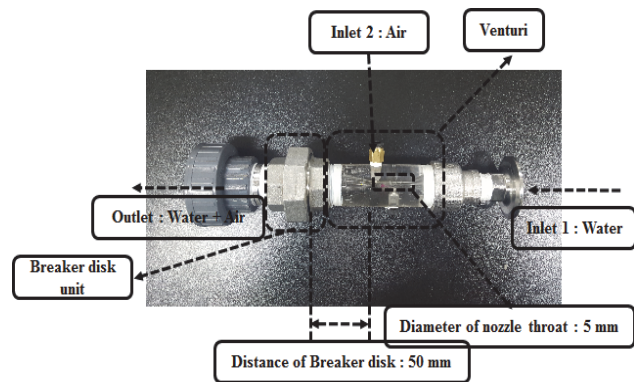
### 1. 서론

마이크로버블이란 기체를 포함한 크기가 작은 버블로 알려져 있으며<sup>1)</sup>, 일반 산기장치에서 발생하는 버블과는 달리 크기가 작은 특성으로 인한 장점을 가지고 있어 현재 여러 분야에서 활용되고 있다<sup>2-4)</sup>. 마이크로버블을 생성시키기 위한 여러 가지 방법 중에서 자흡식(ejector type) 마이크로버블 발생장치는 유체 순환시 노즐, 오리피스 등 내부 관로 직경변화에 의한 압력차로 인하여 대기 중의 공기가 흡입되어 수중에 마이크로버블을 공급하는 원리로서 별도의 공기 공급 장치를 필요로 하지 않는 장점을 가지고 있다. 그러나 자흡식 마이크로버블 발생 방법은 다른 마이크로버블 발생 방법에 비하여 발생하는 버블의 크기가 비교적 크다<sup>5)</sup>는 근본적인 단점이 있어 여러 연구자들이 이를 보완하기 위하여 요소 기술을 접목시켜 버블의 크기를 작게 만들기 위한 방법을 제안한 바 있다<sup>1,6,7)</sup>. 한편, Sadatomi 등(2012)은 수심의 변화에 따라 자흡식 마이크로버블 발생장치의 흡입 공기량에 영향을 준다고 주장하였다<sup>1)</sup>. 이는 자흡식 마이크로버블 발생장치에서 흡입 공기량 확보를 위하여 수심 변화에 의한 수압을 고려해야함을 의미한다.

따라서, 본 연구에서는 자흡식 마이크로버블 발생장치를 운전함에 있어 수압에 따른 흡입 공기량 및 산소 용해율을 분석함으로써 자흡식 마이크로버블 발생장치의 설계인자를 도출하고자 하였다.



(a) Breaker disk unit



(b) Venturi connected with breaker disk

Fig. 2. Photograph of nozzle configuration.

### 2. 실험장치 및 방법

#### 2.1. 실험장치

실험 장치의 개요도 및 노즐의 형상을 각각 Fig. 1 및 Fig. 2에 나타내었다. 실험에 사용된 반응조는 지름 0.5m인 원기둥 형태이며 높이가 2.3m로, 총 유효용량은 412L이다. 마이크로버블 발생장치의 순환수 유량 및 노즐에서의 흡입 공기량을 측정하기 위하여 전자식 유량계와 기체 유량계를 각각 설치하였으며, 수중의 용존산소 농도를 측정하기 위하여 DO meter (ProODO<sup>®</sup>, YSI, USA)를 각각의 수심에서 약 10cm 하단에 위치시켜 사용하였다.

실험에 사용된 감압 장치는 목 직경이 5mm인 벤투리 노즐을 사용하였으며, 자흡식 마이크로버블

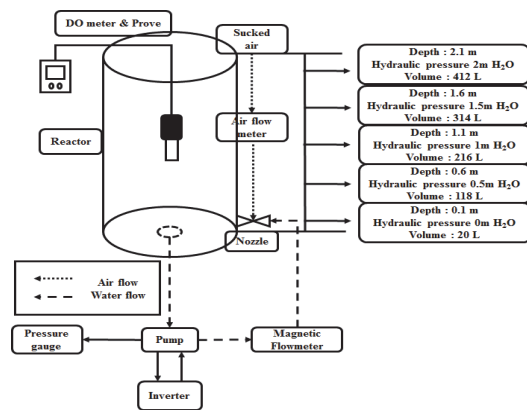


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

발생장치에서 발생하는 버블의 크기가 비교적 크다는 단점을 보완하기 위하여 충돌판을 설치하였다. 충돌판은 노즐의 목(throat)으로부터 50mm 지점에 설치하였다. 본 실험에서 사용된 자흡식 마이크로버블의 발생 원리는 펌프에 의하여 반응조에 채워진 물이 순환되고 벤투리 노즐에서 마이크로버블이 1차적으로 발생하는 방법이다. 그 이후 발생한 일부 마이크로버블이 충돌판과 충돌하여 크기가 더 작은 버블로 깨진 다음 수중에 분산된다<sup>8)</sup>.

### 2.2. 실험방법

실험은 상수(수도수)를 사용하여 수압을 0.5mH<sub>2</sub>O에서 2.0mH<sub>2</sub>O까지 0.5mH<sub>2</sub>O 간격으로 상승시키면서 진행하였다. 실험 전 수중의 용존산소 농도 저감을 위하여 질소 가스를 수중에 공급하여 수중의 용존산소 농도를 4 mg/L 이하로 유지하였다<sup>1)</sup>. 용존산소의 측정은 각 수압에서 자흡식 마이크로버블 발생 장치의 순환수 유량을 각각 15.5, 21.4, 25.9, 29.8, 33.2 L/min으로 증가시키면서 발생장치 가동 후 30초 간격으로 수중 용존산소 농도가 포화 농도에 이를 때까지 진행하였다. 또한 각 실험조건에서 발생장치 가동 후 순환수 유량별로 측정된 흡입 공기량, 수온 및 용존산소 농도 자료를 이용하여 산소전달계수 및 산소 용해율을 산정하였다. 수온 변화에 따른 산소전달계수의 보정은 산소전달계수 산정 시 포화 용존산소 농도를 보정하여 계산하였다. 산소전달계수 및 산소 용해율 산정에 사용된 계산식은 (1)<sup>9)</sup>, (2) 및 (3)에 나타내었다.

$$\frac{dC}{dt} = K_L a \cdot (C_S - C) \quad (1)$$

여기서,  $K_L a$ 는 산소전달계수(sec<sup>-1</sup>)를 의미하며,  $C_S$  및  $C$ 는 각각 포화 용존산소 농도(mg/L) 및 시간  $t$ 에서의 용존산소 농도(mg/L)를 의미한다.

$$N_C = K_L a \cdot V \cdot C_S \quad (2)$$

$$E_A = \frac{N_C}{W} \cdot 100 \quad (3)$$

$N_C$ 는 단위 시간당 산소 용해량(mg/sec)을 의미하고  $V$ 는 반응조의 유효용량(L)를 나타낸다. 또한  $W$ 는 수중에 공급되는 산소량(mg/sec)를 의미하며,  $E_A$ 는 수중에 산소 용해율(%)을 의미한다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 수압이 자흡식 마이크로버블 발생장치의 흡입 공기량에 미치는 영향

Fig. 3에 수압에 따른 노즐에서의 흡입 공기량 측정결과를 나타내었다. 실험 결과, 동일 수압에서 순환수 유량이 증가함에 따라 흡입 공기량도 증가하는 경향을 나타내었는데, 이는 순환수 유량이 증가함에 따라 벤투리 노즐 내부에서 압력강하의 크기가 증가하기 때문이다. 이외는 반대로 동일한 순환수 유량에서는 수압이 증가함에 따라 흡입 공기량이 감소하는 경향을 보였는데, 이는 수압이 노즐 토출부에 작용하여 벤투리 노즐 내부에서 발생하는 압력강하의 크기가 감소된데 그 원인이 있다. 즉, 수압이 증가할수록 동일한 순환수 유량에서 흡입 공기량이 감소되기 때문에 흡입 공기량을 증가시키기 위해서는 더 큰 순환수 유량이 필요하다. 이는 결과적으로 수압이 증가할수록, 수중에 필요한 만큼의 산소 공급을 위해서 요구되는 펌프의 용량 및 동력이 상승되어야 함을 의미한다.

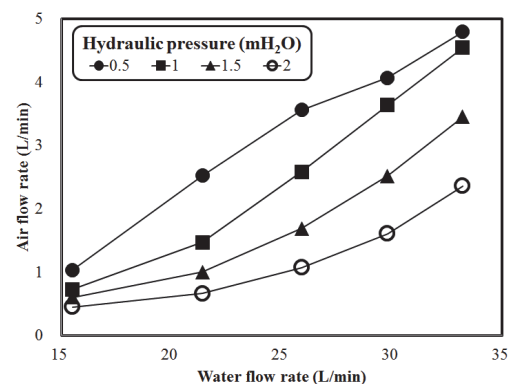


Fig. 3. Effect of hydraulic pressure on the air flow rate.

### 3.2. 수압이 산소전달계수 및 산소 용해율에 미치는 영향

수압에 따른 용존산소 농도를 측정한 결과 순환수 유량의 변화에 관계없이 수압이 증가할수록 포화 용존산소 농도에 도달하는 시간이 증가하는 경향을 나타내었기 때문에, 순환수 유량 33.2 L/min의 조건에서 수압에 따른 용존산소 농도 곡선을 Fig. 4에 예시하였다. 또한, 각 순환수 유량에서 수압에 따른 용존산소 농도를 측정한 다음 이를 근거로 하여 산소전달계수를 산정한 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 4에 나타난 바와 같이 용존산소 농도의 경우 수압이 증가할수록 포화 용존산소 농도까지 도달하는 시간이 증가하는 원인은 Fig. 5에 나타난 동일 순환수 유량에서 수압 증가에 따른 산소전달계수의 감소 및 수심증가로 인한 반응조 유효용적의 증가로 설명할 수 있다. 산소전달계수의 경우 단위 시간

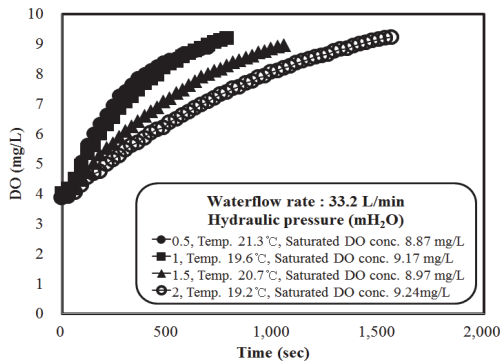


Fig. 4. Effect of hydraulic pressure on the DO concentration.

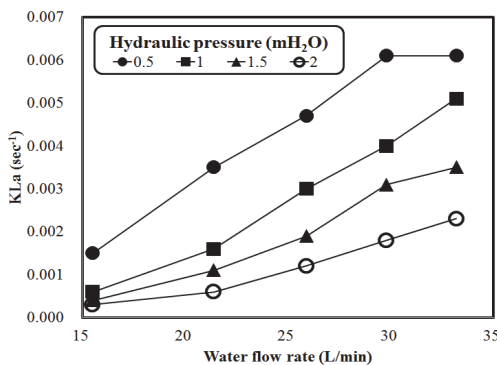


Fig. 5. Effect of hydraulic pressure on the mass-transfer coefficient.

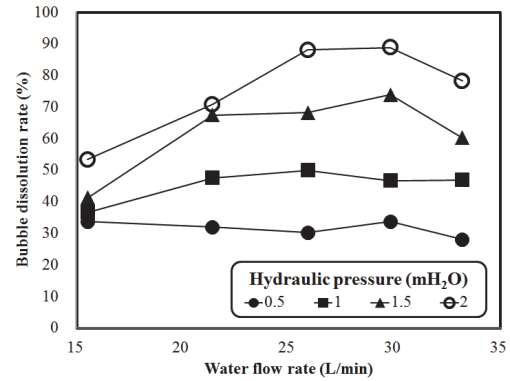


Fig. 6. Effect of hydraulic pressure on bubble dissolution rate.

당 수중의 용존산소 농도를 기준으로 산정되기 때문에 수중 공기 공급량 및 반응조 용적에 영향을 받으며 수압이 증가할수록 흡입 공기량의 감소와 반응조 용적의 증가로 산소전달계수 또한 감소된다.

Fig. 6에 순환수 유량 및 수압 변화에 따른 수중 산소 용해율 산정결과를 나타내었다. 마이크로버블에 의한 수중 산소 용해율은 실험에서 채택된 가장 낮은 수압인 0.5mH<sub>2</sub>O를 제외하고 순환수 유량이 25.9 L/min까지 증가함에 따라 증가하다가 그 이상의 순환수 유량에서는 대체적으로 감소되는 경향을 보이고 있다. 이는 순환수 유량이 증가함에 따라 반응조 내에 비교적 크기가 큰 버블이 차지하는 비율이 상대적으로 커진데 그 원인이 있을 것으로 추정되며, 이로 인하여 순환수 유량이 33.2 L/min일 경우 수중에 공급되는 공기량이 증가하여도 산소 용해율이 감소되는 현상이 나타난 것으로 판단된다. 이런 현상은 공기량을 1 L/min에서 4 L/min으로 증가시켰을 때, 비교적 크기가 큰 버블이 발생되었다는 선행 연구와 일치되는 연구결과로 판단된다<sup>1)</sup>. 한편, 수압이 증가할수록 산소 용해율이 증가하는 경향은 수심의 증가로 수중에서 마이크로버블의 체류시간이 증가됨으로써 이들에 의한 산소 용해율 증가가 그 원인인 것으로 판단된다. 그러나 수심이 마이크로버블 발생장치 용량 대비 크게 증가한다면 동일 유량에서 흡입 공기량 및 산소전달계수의 지속적인 감소로 마이크로버블에 의한 산소 용해율은 특정 수심을 기준으로 오히려 감소될 것으로 추정된다. 이는 수중 산소 공급을 목적으로 자흡식 마이

크로버블 발생기를 사용할 경우 장치 설계에 있어 수심을 필수적으로 고려하여야 함을 의미한다.

#### 4. 결론

자흡식 마이크로버블 발생장치를 운전함에 있어 수압에 따른 수중의 산소 용해율을 평가한 결과 다 음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 수압의 증가는 자흡식 마이크로버블 발생장치 에서 흡입 공기량을 감소시키며 수중에 공기 공급 을 위한 자흡식 마이크로버블 발생장치의 용량 및 동일 공기량을 공급하기 위한 필요 동력의 상승 원 인이 될 수 있다.

2. 수압이 증가할수록 반응조의 용적이 상승되어 흡입 공기량이 감소되어 산소전달계수는 감소하고 반응조에서 포화 용존 산소 농도에 도달하기 위한 시간이 증가하였다.

3. 마이크로버블에 의한 수중 산소 용해율은 수 심이 증가할수록 마이크로버블의 체류시간 증가로 상승하지만, 수심이 증가할수록 수압에 의한 흡입 공기량 및 산소전달계수의 감소로 특정 수심이상 에서는 마이크로버블에 의한 수중 산소 용해율이 감 소될 것으로 판단된다. 이는 자흡식 마이크로버블 발생장치 용량 선정시 수심이 중요한 고려사항이 됨을 의미한다.

#### 사 사

이 논문은 인천대학교 2015년도 자체연구비 지원 에 의하여 연구되었음.

#### References

1. Sadatomi, M., Kawahara, A., Matsuura, H., and Shikatani, S., "Micro-bubble Generation Rate and Bubble Dissolution Rate into Water by a Simple Multi-fluid Mixer with Orifice and Porous Tube" *Experimental Thermal and Fluid Science*, 41, pp. 23~30. (2012).
2. Terasaka, K., Hirabayashi, A., Nishino, T., Fujioka, S., and Kobayashi, D., "Development of Microbubble Aerator for Waste Water Treatment Using Aerobic Activated Sludge", *Chemical Engineering Science*, 66(14), pp. 3172~3179. (2011).
3. Parmar, R., and Majumder, S. K., "Microbubble Generation and Microbubble-aided Transport Process Intensification-A State-of-the-Art Report", *Chemical Engineering and Processing*, 64, pp. 79~97. (2013).
4. Kawahara, A., Sadatomi, M., Matsuyama, F., Matsuura, H., Tominaga, M., and Noguchi, M., "Prediction of Micro-bubble Dissolution Characteristics in Water and Seawater", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33, pp. 883~894. (2009).
5. Maeda, Y., Hosokawa, S., Baba, Y., Tomiyama, A., and Ito, Y., "Generation Mechanism of Micro-bubbles in a Pressurized Dissolution Method", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 60, pp. 201~207. (2015)
6. Sadatomi, M., Kawahara, A., Kano, K., and Ohtomo, A., "Performance of a New Micro-bubble Generator with a Spherical Body in a Flowing Water Tube", *Experimental Thermal and Fluid*, 29, pp. 615~623. (2005).
7. Ohnari, H., "All about Microbubbles", Nippon Jitsugyo Shuppanasha(in Japanese). (2006).
8. Kim, H. S., Lim, J. Y., Park, S. Y., and Kim, J. H., "Effects on Swirling Chamber and Breaker Disk in Pressurized-Dissolution Type Micro-Bubble Generator", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(4), pp. 1102~1106. (2017).
9. Akita, K., and Yoshida, F., "Gas Holdup and Volumetric Mass Transfer Coefficient in Bubble Columns", *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, 12(1), pp. 76~80. (1973).