

## 마이크로버블을 이용한 분뇨의 전처리 특성

임지영, 김현식, 박수영, 김진한<sup>†</sup>

인천대학교 건설환경공학과

### Pre-treatment Characteristics of Night Soil by Microbubble

Ji-young Lim, Hyun-sik Kim, Soo-young Park, Jin-Han Kim<sup>†</sup>

Department of Civil & Environmental Engineering, Incheon National University, Korea

(Received: Sep. 23, 2016 / Revised: Nov. 3, 2016 / Accepted: Nov. 3, 2016)

**ABSTRACT:** This study was conducted to investigate the effect of OH radicals on organic matter oxidation and suspended solids removal using microbubble as a pre-treatment technique to reduce the organic load of night soil in connection with sewage. The experiment was conducted for three months at HRT 4 hours using pressurized type microbubble generator. The mean SS removal efficiency was achieved 71%. The average removal efficiency of TCOD<sub>Cr</sub>, TBOD, TN and TP were achieved for 51.5%, 47.9%, and 14.7% respectively, as scum and SS were removed by flotation separation. The removal efficiency of soluble organic matters were 25.0%, 17.1% for SCOD<sub>Cr</sub>, SBOD by air microbubble supply. Soluble nitrogen and phosphorus were removed average of 11.9% and 7.4%, respectively. As a result, it was confirmed that soluble organic matters were removed by air microbubble supplied. Generated OH radicals when the microbubble was collapsed, can decompose the soluble organic matters. Therefore, The microbubble flotation process was installed at the front of night soil treatment process, it will contribute to the stable operation of the subsequent biological treatment facility by oxidation of the dissolved organic matters as well as removal of SS by flotation separation.

**Keywords:** Microbubble, Night soil, Oxidation, OH radical, Organics removal

**초 록:** 본 연구는 하수와 연계처리 되고 있는 분뇨의 유기물부하를 저감시킬 수 있는 전처리기술로서 마이크로버블을 이용하여 OH radical에 의한 유기물 산화 및 부유물질 저감 효과를 검토하였다. 가압식 마이크로버블 발생장치를 이용하여 생분뇨를 4시간의 HRT로 3개월간 연속 실험하였다. 마이크로버블을 이용하여 분뇨를 부상처리할 경우 SS 제거율은 평균 71.0%이었으며, 부상분리에 의한 스크럼 및 고형물질이 제거됨에 따라 TCOD<sub>Cr</sub>, TBOD, 총질소, 총인인 제거율은 각각 평균 51.5%, 47.9%, 17.1%, 14.7%로 나타났다. OH radical에 의한 용존성 유기물질의 분해능을 검토한 결과, SCOD<sub>Cr</sub>의 경우 평균 25.0% 제거되었고 SBOD의 경우 평균 17.1% 제거되었다. 용존성 질소와 인은 각각 평균 11.9% 및 7.4% 정도 제거됨으로써 수중에서 마이크로버블이 소멸되면서 발생하는 OH radical의 강력한 산화력에 의하여 용존성 유기물질들이 제거됨을 확인할 수 있었다. 따라서 분뇨 처리과정 전단부에 마이크로버블 부상조를 설치할 경우 부상분리에 의한 고형물 제거는 물론 용존성 유기물질의 산화에 의하여 후속 생물학적 처리시설의 안정적 운영에 충분한 기여를 할 것으로 판단된다.

**주제어:** 마이크로버블, 분뇨, 산화, OH 라디칼, 유기물제거

<sup>†</sup> Corresponding Author (e-mail: jinhan@inu.ac.kr)

## 1. 서론

수거식 화장실에서 발생하는 액체성 또는 고체성 오염물질로 규정된 분뇨는 2013년부터 해양투기가 전면금지되어 육상처리를 할 수 밖에 없는 실정으로 분뇨처리장에서 1차 또는 2차 처리를 거친 후 인근 하수처리장과 연계하여 처리하는 경우가 대부분이며 2012년 기준 전국 190개의 분뇨처리시설 중 약 77%인 146개소가 하수처리장과 연계하여 분뇨를 처리하고 있다<sup>1)</sup>. 이러한 고농도의 유기성 폐수는 하수처리장 연계처리시 방류수 수질기준 준수 등에 대한 부담이 있으므로 이를 법적으로 규제하기 위하여 공공하수도시설 운영·관리 업무지침에는 분뇨 등을 연계 처리하는 경우, 공공하수처리시설의 정상 운영에 지장을 주지 않도록 총질소 및 총인의 오염부하량은 설계시 유입하수오염 부하량의 10% 이내까지 전처리한 후 연계처리하여야 한다고 명시되어 있다<sup>2)</sup>.

분뇨의 전처리시설로는 혐잡물과 침사물을 제거할 수 있는 혐잡물처리시설과 미세혐잡물을 제거하기 위한 원심분리시설, 부상분리시설, 응집시설 등이 있다. 이중 부상분리는 가벼운 입자를 보다 완전하고 짧은 시간에 분리하며 안정된 처리수를 얻을 수 있다는 점에서 분뇨처리공정에서 많이 사용되고 있다. 전처리된 분뇨는 위생처리장에서 1차, 2차 처리를 거쳐 하수처리장으로 연계되지만 분뇨의 특성상 유기오염물질과 암모니아성 질소의 농도가 높아 처리가 용이하지 않기 때문에<sup>3)</sup> 하수처리장으로 연계되었을 경우 분뇨에 함유되어 있는 질소에 의해 하수처리장 호기조에서의 질산화율을 악화시킬 수 있다. 이에 따라 송풍기의 가동율을 증가시켜 하수처리장의 운영효율을 저하시키는 문제를 발생시키고 있다. 따라서, 연계하는 하수처리장의 정상운영에 지장을 주지 않도록 연계부하를 최소화 할 수 있는 전처리시스템의 개발이 시급하다<sup>4)</sup>.

1990년대 중반 이후 일본에서 시작된 마이크로버블 기술은 현재 여러 분야에서 응용되고 있으나 미세기포에 대한 정의는 아직 표준화가 이루어지지 않았다. 학자들에 따라 버블의 크기가 50  $\mu\text{m}$  이하<sup>5)</sup>,

수십  $\mu\text{m}$ <sup>6)</sup>, 1-100  $\mu\text{m}$ <sup>7)</sup>, 100  $\mu\text{m}$  이하<sup>8,9)</sup>, 수백  $\mu\text{m}$  이하<sup>10)</sup> 등 여러 가지의 정의가 혼용되고 있는 실정이다. 마이크로버블은 물과 기체가 함께 존재할 때 생성되며, 일반버블에 비하여 그 크기가 작아 비표면적이 증대됨으로써 최소의 동력만으로 질량전달율이 극대화되므로 기존 밀리버블을 사용한 부상분리공정에 비하여 고/액분리효율이 높다. 용해효율이 높으며 수중에서 부상속도가 매우 느리기 때문에 수중에 체류하는 시간이 길다. 음전하를 띤 마이크로버블이 자체적으로 파괴되거나 양전하를 띤 물질과 물리적으로 충돌하여 파괴되면서 OH radical이 순간적으로 발생하게 되는데[Fig. 1] 이렇게 생성된 OH radical의 강력한 산화력에 의한 살균 효과 때문에 다양한 분야에 응용되고 있으며<sup>11-14)</sup> 최근에는 정수 및 폐수처리 등 그 적용이 확대되고 있다.

본 연구에서는 분뇨의 전처리기술로서 마이크로버블에 의한 고형물 분리 및 유기물 제거효과를 검토하였다.

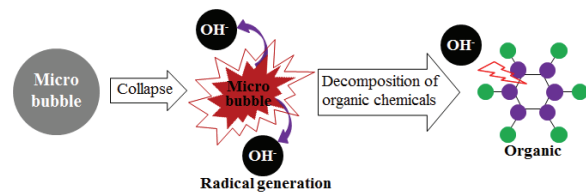


Fig. 1. Generation of OH radical by collapsing microbubble.

## 2. 실험장치 및 방법

본 연구가 진행된 인천광역시 G사업소 위생처리장의 계획처리용량은 1,780  $\text{m}^3/\text{day}$ 이며, 정화조오니, 생분뇨와 축산폐수가 유입된다. 처리공법은 혐잡물 처리기의 전처리를 거친 후 배양조, 혐기조, 간헐포기조로 이루어진 HBR-II공정으로 처리되며, 처리수는 하수와 연계처리 되고, 슬러지는 하수처리장으로 통합처리되며, 혐잡물 및 탈수케익 등의 부산물은 소각업체에서 위탁처리되거나 수도권 매립지로 반입 후 처리된다.

2.1. 실험장치

본 연구에서는 동 사업소의 협잡물 처리기를 거친 배양조 유입수를 대상으로 현장에서 직접 반응을 운전하였다.

실험에 사용된 장치는 아크릴로 제작된 유효용량 140 L의 bench-scale 부상조로서, 부상조 하부에 마이크로버블 공급장치를 설치하였다. 부상되는 스크럼 및 고형물은 skimmer를 이용하여 연속적으로 제거하였다. 마이크로버블 발생을 위한 공기용해설비는 가압수(순환수)를 보내는 가압펌프(PU-S990U, Wilo, Germany), 공기를 용해하는 가압탱크, 공기원이 공급되는 컴프레서(AT-2525A, Besto, China), 가압용해수를 대기 개방하는 감압밸브로 구성되어 있다. 가압펌프를 이용하여 분뇨를 순환시키며 이때 컴프레서를 이용하여 주입된 공기는 순환수와 함께 가압탱크 안에서 혼합되어 배관에 설치된 벤츄리 노즐을 통해 부상조의 내부로 고압으로 분사됨으로써 다량의 미세기포가 발생되도록 하였다.

본 실험에 사용된 부상조 및 가압식 마이크로버블 발생장치를 Fig. 2에 나타내었으며, Table 1에 운전조건을 요약하였다<sup>15,16</sup>.

Table 1. Operation conditions of pressurized microbubble generator

Item	Condition
Pressure(bar)	3.5
Circulation flow rate(m <sup>3</sup> /h)	2.7
Air flow rate(LPM)	5
Bubble size, D <sub>50</sub> ( $\mu$ m)*	49.40 ~ 54.98

\*D<sub>50</sub> : The bubble diameter of fraction of bubble 0.5 at cumulative bubble size distribution.

2.2. 실험방법

실험장치는 현장의 생물반응조의 체류시간을 고려하여 전처리 목적으로 4시간의 HRT로 운전되었으며, 변동 폭이 큰 유입 분뇨의 성상을 고려하여 3개월간 연속식으로 운전하였다.

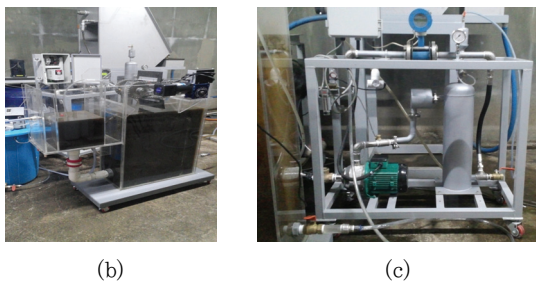
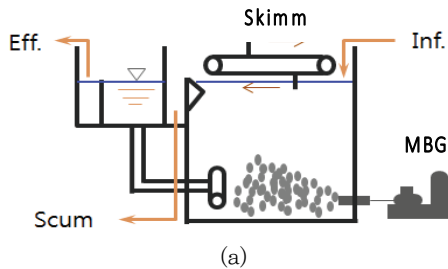
마이크로버블 공급에 의한 분뇨내의 유기물 제거 특성을 파악하기 위해 TBOD, TCOD<sub>Cr</sub>, TN, TP 및 SS를 분석하였다. 또한, 용존성 유기물의 제거정도를 파악하기 위해 유입수 및 처리수에 포함된 SBOD, SCOD<sub>Cr</sub>, S-TN, S-TP를 평가하였다. 각 항목은 수질오염공정시험기준<sup>17)</sup> 및 Standard Methods<sup>18)</sup>에 따라 분석하였으며, 용존성 유기물을 분석하기 위하여 0.45  $\mu$ m 멤브레인 필터(Hyundai micro., Ltd)로 시료를 여과한 후 분석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

Table 2에 생분뇨의 성상과 마이크로버블을 이용한 전처리 후의 처리수 성상을 나타내었다. 생분뇨의 경우 유입농도의 변동 폭이 매우 큰 것을 확인할 수 있다.

3.1. SS 제거에 따른 총유기물질의 저감

마이크로버블을 이용하여 분뇨를 부상분리 할 경우, SS 제거율은 평균 71.0%로 나타났으며 유입수와 처리수의 SS변화를 Fig. 3에 나타내었다.



(a) Diagram of reactor (b) Flotation reactor  
(c) Microbubble generator  
Fig. 2. Photograph of experimental equipment.

Table 2. Experimental results of microbubble flotation reactor performance

Item	Influent(mg/L)			Effluent(mg/L)			Average Removal(%)
	min.	max.	avg.	min.	max.	avg.	
SS	744	10,400	4,142	290	2,930	943	<b>71.0</b>
BOD	T*	1,060	3,930	530	2,070	1,193	47.9
	S**	110	1,390	708	28	60	<b>17.1</b>
COD <sub>Cr</sub>	T	1,600	9,600	800	5,600	2,426	51.5
	S	400	3,280	1,451	240	2,400	<b>25.0</b>
TN	T	202	548	196	369	300	17.1
	S	152	411	296	142	345	<b>11.9</b>
TP	T	63	128	51	107	81	14.7
	S	50	94	74	46	91	<b>7.4</b>

\* Total, \*\* Soluble

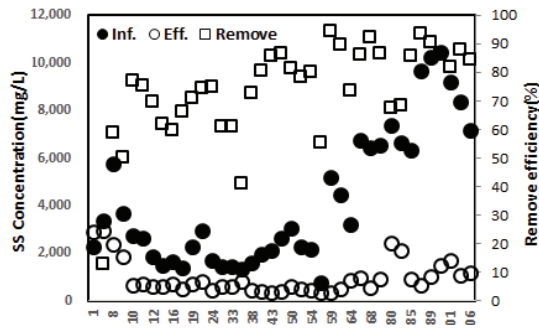


Fig. 3. Variation of SS concentration.

Fig. 3을 살펴보면 유입 분뇨의 SS 농도가 변동이 심하더라도 유출수의 SS 농도는 비교적 일정한 수준이 유지됨을 알 수 있었다. 부상분리에 의한 스크 및 고형물질이 제거됨에 따라 TBOD 제거율은 평균 47.9%, TCOD<sub>Cr</sub> 제거율은 평균 51.5%로 나타남으로써 후단에 위치한 생물학적 처리시설의 유입 유기물 부하를 1/2 정도 저감시킬 수 있는 것으로 판단된다.

김 등<sup>19)</sup>은 생물학적 분뇨처리 시설을 가동함에 있어 마이크로버블을 이용한 전처리 공정을 두어 전단부에서 고형물을 제거함으로써 후단 생물학적 처리시설의 유기물부하를 8kg COD<sub>Cr</sub>/m<sup>3</sup>-day 정도의 고부하에서 안정적으로 운영한 연구결과가 있다.

총질소의 경우 평균 제거율이 17.1%로 질소성분의 감소로 생물학적 처리시설 중 호기조에서의 산소요구량이 크게 절감되고, 총인인 경우 평균 제거율이 14.7%로서 인 성분의 우선 배제로 인 제거에 사용되는 약품이 절감되는 효과를 나타낼 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 4에 유입수와 처리수의 유기물질 농도변화를 나타내었다.

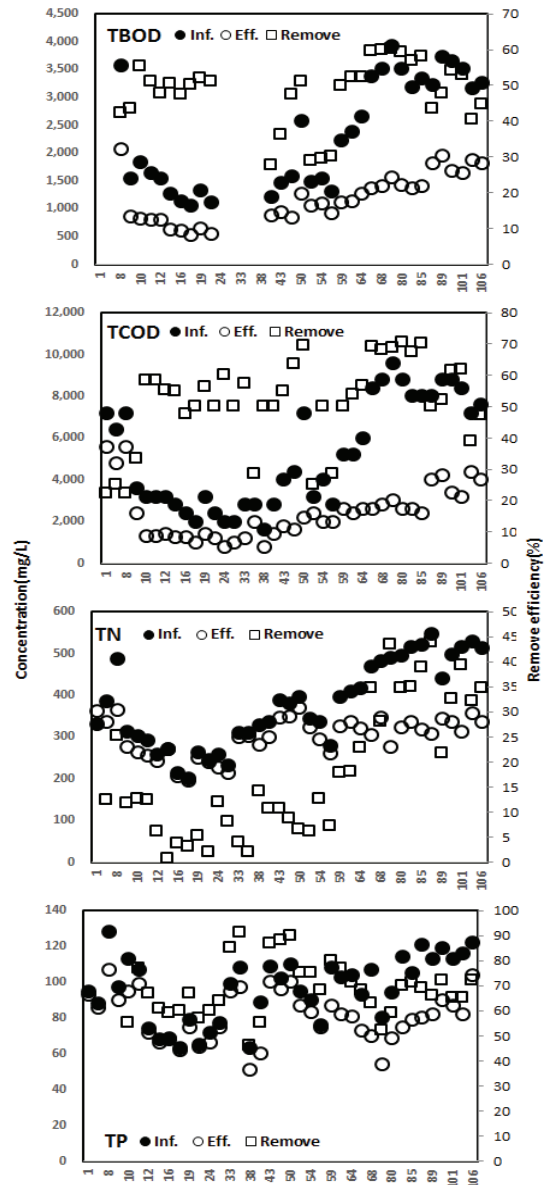


Fig. 4. Variation of total organic matters concentration.

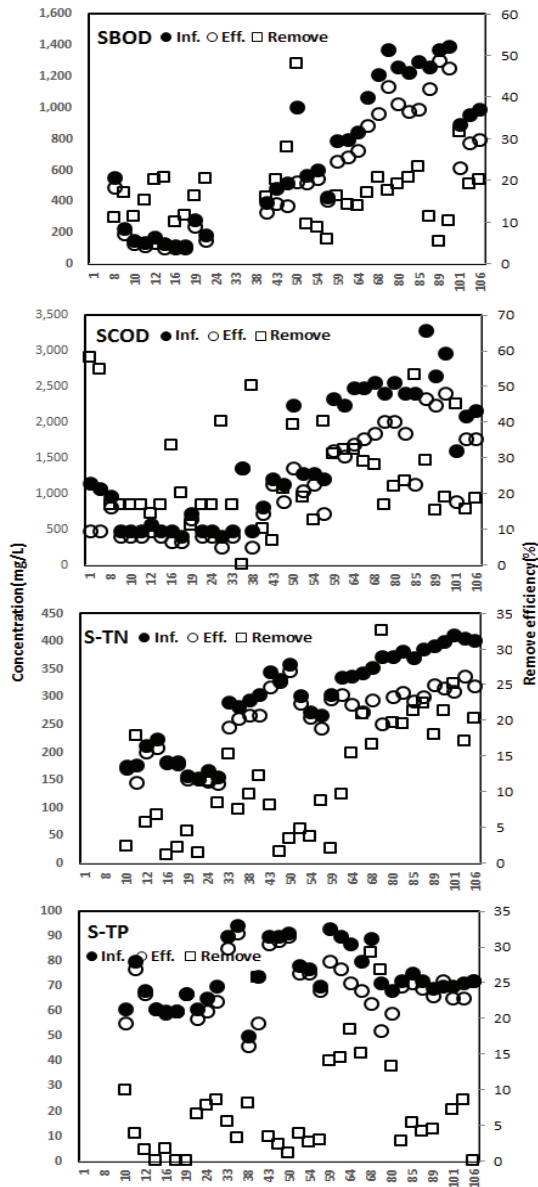


Fig. 5. Variation of soluble organic matters concentration.

3.2. SS 제거에 따른 용존성 유기물질의 저감

분뇨축산 폐수에 대한 마이크로버블을 적용한 선행연구를 살펴보면 오존 마이크로버블을 사용하여 오존의 용해도와 radical 생성량을 증가시켜 일반 오존버블에 비하여 COD 및 색도의 제거효율이 각각 86.0% 및 26.0% 향상되었으며<sup>20)</sup>, 공기 마이크로버블과 촉매를 사용하여 가축분뇨내의 암모니아성 질소 제거율이 39.3% 정도이었으며, SCOD는 16.5% 제거되었다<sup>3)</sup>. 또한, 마이크로버블과 촉매,

그리고 공기를 모두 적용한 경우 공기 마이크로버블에서 생성된 OH radical과 촉매 반응에 의하여 가축분뇨 슬러지의 SCOD가 약 13% 제거되었다고 보고하였다<sup>21)</sup>. 산화제로 공기만을 사용하였을 경우 TCOD가 52.4% 제거되었고, SCOD가 16.5% 제거되었다<sup>3)</sup>.

유입수 및 처리수의 용존성 유기물질의 농도변화를 Fig. 5에 나타내었다. 마이크로버블을 이용하여 생분뇨내 고형물을 분리시키는 과정에서 마이크로버블과 공기가 수중에서 반응하는 과정 중에 OH radical이 생성되며 강력한 산화력으로 용존성 유기물질의 산화가 일어남을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 오존 또는 촉매를 사용하지 않고 오직 공기만을 이용한 마이크로버블을 적용했음에도 불구하고 SCOD<sub>Cr</sub>이 평균 25.0%, SBOD가 평균 17.1% 제거되었다. 용존성 질소와 인은 각각 평균 11.9% 및 7.4% 제거되었다. 다만, 선행연구와 분뇨의 조성이 다르고 실험 수행시기(3~5월)가 달라 그 결과에 차이는 있을 수 있으나 용존성 유기물질의 산화에 마이크로버블이 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

높은 고형물 농도를 함유하는 유기성 폐수를 생물학적으로 처리하기 위해서는 상대적으로 긴 처리시간이 요구되므로 시설이 커지는 매우 큰 단점을 항상 내포하고 있다. 따라서 생물학적 처리시설 유입 전에 원수내의 고형물을 안정적으로 분리해 낸다면 생물학적 처리시설의 간소화 및 유기물부하를 저감시킬 수 있음은 물론 공기공급량, 약품사용량을 저감시킬 수 있어 경제성이 높다. 따라서 분뇨처리 전처리시설로 마이크로버블 부상조의 적용은 생물학적 처리에 있어 유리한 기술인 것으로 판단된다.

4. 결론

분뇨처리시설에서 생물학적 처리시설 전단부에 공기 마이크로버블 부상조를 적용하여 마이크로버블에 의한 분뇨 내 유기물질의 농도변화를 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 생분뇨를 3개월간 마이크로버블을 이용하여 4시간의 HRT로 연속처리한 결과 SS 제거율은 평균 71.0%를 나타내었고, TBOD, TCOD<sub>Cr</sub>, 총질소, 총인의 평균 제거율은 각각 47.9%, 51.5%, 17.1% 14.7%이었다.

2. 수중에서 마이크로버블이 소멸되면서 발생하는 OH radical의 강력한 산화력에 의하여 용존성 유기물질들이 산화됨을 알 수 있었는데, 특히 SCOD<sub>Cr</sub>의 경우 평균 25.0%의 제거율을 나타내었다. SBOD, 용존성 총질소, 용존성 총인은 각각 평균 17.1%, 11.9% 및 7.4% 제거되었다.

3. 분뇨처리공정 전단부에 본 연구에서 검토한 마이크로버블 부상조를 설치할 경우 부상분리에 의한 고형물 제거는 물론 용존성 유기물질의 산화에 의한 유기물부하 저감이 분뇨의 생물학적 처리시설의 안정적 운영에 충분한 기여를 할 것으로 판단된다.

## References

1. Ministry of Environment, 2014 Statistics of Sewerage, pp. 17. (2015).
2. Ministry of Environment, Operation & Management Guideline of Public Sewage Facilities, (2015).
3. Jang, J. K., Sung, J. H., Kang, Y. K. and Kim, Y. H., "The Effect of the Reaction Time Increases of Microbubbles with Catalyst on the Nitrogen Reduction of Livestock Wastewater", *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 37(10), pp. 578~582. (2015).
4. Kim, C. G. and Shin, H. G., "Determination of Optimal Livestock Wastewater Treatment Process for Linked Treatment in Sewage Treatment Plant", *Journal of the Organic Resource Recycling Association*, 20(3), pp. 52~59. (2012).
5. Takahashi, M., Chiba, K. and Li, P., "Free-Radical Generation from Collapsing Microbubbles in the Absence of a Dynamic Stimulus", *The Journal of Physical Chemistry*, 111(6), pp. 1343~1347. (2007).
6. Li, P., Tsuge, H. and Itoh, K., "Oxidation of Dimethyl Sulfoxide in Aqueous Solution Using Microbubbles", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(17), pp. 8048~8053. (2009).
7. Kurup, N. and Naik, P., "Microbubbles : A Novel Delivery System", *Asian Journal of Pharmaceutical Research and Health Care*, 2(3), pp. 228~234. (2010).
8. Tabei, K., Haruyamu, S., Yamaguchi, S., Shirai, H. and Takakusagi, F., "Study of Microbubble Generation by Swirl Jet", *Journal of Environment and Engineering*, 2(1), pp. 172~182. (2007).
9. Margery, S. B., *The American Heritage Dictionary of English Language*, 4th ed., Houghton Mifflin Company, Boston, USA, (2000).
10. Kawahara, A., Sadatomi, M., Matsuyama, F., Matsuura, H., Tominaga, M. and Noguchi, M., "Prediction of Microbubble Dissolution Characteristics in Water and Sea Water", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33(5), pp. 883~894. (2009).
11. Agarwal, A., Ng, W. J. and Liu, Y., "Principle and Applications of Microbubble and Nanobubble Technology for Water Treatment", *Chemosphere*, 84(9), pp. 1175~1180. (2011).
12. Marui, T., "An Introduction to Micro/Nano-Bubbles and Their Applications", *Systemics, Cybernetics and Informatics*, 11(4), pp. 68~73. (2013).
13. Cha, H. S., "Present State and Future Prospect for Microbubble Technology", *Bulletin of food technology*, 22(3), pp. 544~552. (2009).
14. Li, P., Takahashi, M. and Chiba, K., "Enhanced Free-Radical Generation by Shrinking Microbubbles Using a Copper Catalyst", *Chemosphere*, 77, pp. 1157~1160. (2009).
15. Lim, J. Y., Kim, H. S., Park, S. Y. and Kim, J. H., "Evaluation of Characteristics for Microbubble Generation According to Venturi Nozzle Specification", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 16(9), pp. 6397~6402. (2015).
16. Kim, H. S., et.al, "Estimation of Contribution Ratio of Element for Improving Performance of Pressurized-Dissolution Type Microbubble Generator",

- Korea Academia-Industrial Cooperation Society Fall Season Conference, pp. 641~643. (2015).
17. Ministry of Environment, Standard methods for examination of water quality. (2014).
18. APHA(American Public Health Association), Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 17th ed., Washington DC, USA, (1989).
19. Kim, J. H., et.al, "Evaluation of Possibility of Microbubble in the A2O+MBR Process for Night Soil", Korea Academia-Industrial Cooperation Society Fall Season Conference, pp. 648~651. (2015).
20. Lee, I. K., Lee, E. Y., Lee, H. J. and Lee, K. S., "Removal of COD and Color from Anaerobic Digestion Effluent of Livestock Wastewater by Advanced Oxidation Using Microbubbled Ozone", Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 22(6), pp. 617~622. (2011).
21. Jang, J. K., Kim, M. Y., Sung, J. H., Chang, I. S., Kim, T. Y., Kim, H. W., Kang, Y. K. and Kim, Y. H. "Effect of the Application of Microbubbles and/or Catalyst on the Sludge Reduction and Organic Matter of Livestock Wastewater", Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 37(10), pp. 558~562. (2015).