

이젝터-폭기 시스템의 용존산소특성에 미치는 염도의 영향 양희천[†] · 박상규¹

(원고접수일 : 2011년 6월 22일, 원고수정일 : 2011년 7월 8일, 심사완료일 : 2011년 7월 16일)

Effect of Salinity on Dissolved Oxygen Characteristics in an Ejector-Aerator

Hei-Cheon Yang[†] · Sang-Kyoo Park¹

요 약 : 용존산소는 물속에 용해되어 있는 산소량으로 수질의 지표가 된다. 본 논문은 이젝터-폭기 시스템의 용존산소특성에 미치는 염도의 영향에 대한 실험적 연구를 목적으로 한다. 이젝터-폭기 시스템은 모터-펌프, 이젝터, 모터-블로어, 폭기 및 순환수조, 제어판넬 등으로 구성된다. 처리수의 용존산소량은 염도가 증가함에 따라 감소하였으며, 산소전달율의 정량적인 변수인 총괄 물질전달계수는 염도가 증가함에 따라 증가하였다.

주제어 : 용존산소, 염도, 폐수처리, 이젝터, 총괄물질전달계수

Abstract: Dissolved oxygen (DO) refers to the volume of oxygen that is contained in water, and is a major indicator of water quality. The objective of this paper was to investigate the effect of salinity on the dissolved oxygen characteristics in an ejector-aerator. An experimental aeration system composed of a motor-pump, an ejector, a motor-blower, a set of aeration and recirculation tank and a control panel. The dissolved oxygen concentrations decreased with the water salinity. The volumetric mass transfer coefficient increased with increasing the water salinity.

Key words: Dissolved oxygen, Salinity, Wastewater treatment, Ejector, Volumetric mass transfer coefficient

1. 서 론

일반적으로 가정에 공급되는 상수나 산업분야에 공급되는 산업용수가 사용목적에 따라 이용되면 대부분 폐수가 되어 그 효용성을 잃게 되는데, 이를 재활용 또는 생태계에 영향을 주지 않는 법적 범위까지 처리해야 한다. 특히 전 세계적으로 물 부족에 대한 경각심이 높아지고 있는 현실을 고려할 때, 이러한 폐수의 처리비용을 최소화하고 안정적으로 처리할 수 있는 기술개발의 중요성이 강조되고 있다.

현재 전국적으로 각 지자체의 특성에 부합하는 식품가공 산업의 육성과 음식물 분리수거의 확산으로 식품류 폐기물 발생량은 지속적으로 증가 추

세에 있다. 특히 2005년 식품류 폐기물의 매립 금지제도 시행 이후 그 발생량이 급증하고 있는 것으로 알려지고 있다. 발생된 식품류 폐기물은 자원 화시설을 통해서 대부분 사료나 퇴비 등으로 재활용되고 있는데, 사료나 퇴비화를 위해서는 염분제거가 필요하다. 이러한 염분제거 과정에서의 세척수나 식품함유 수분 등이 다량의 식품류 처리 폐수로 발생하게 된다. 특히 염분의 농도가 상대적으로 높은 이러한 식품류 폐수 발생량은 전체 산업 폐수의 약 10% 내의 수준이지만 생물학적 산소 요구량(BOD) 부하의 약 30%로 나타나 다른 산업폐수에 비해 발생량 대비 오염 부하량이 매우 높기 때문에 이에 대한 처리가 필요하다[1].

[†] 교신저자(전남대학교 기계자동차공학부, E-mail:hcyang@chonnam.ac.kr, Tel: 061-659-7223)

¹ 전남대학교 기계자동차공학부

한편 2013년부터는 폐기물의 해양투기가 전면적으로 금지되기 때문에 식품류 폐기물 자원화시설에서 발생하는 폐수의 처리를 위한 기술개발이 절실하게 요구되고 있다. 기존의 폐수처리 공정에서는 활성슬러지처리와 물리화학적 침전 등의 여러 단계를 거쳐서 처리하고 있지만, 활성슬러지로 유입되는 폐수의 염분농도가 높아지면 활성슬러지 내의 미생물의 세포파괴와 질산화 효율감소 등의 현상이 나타나고, 응집침전을 위한 플록(floc)의 형성을 방해하는 것으로 알려지고 있다. 따라서 활성슬러지법을 이용하여 염분 농도가 높은 이러한 고농도 유기성 식품류 폐수를 처리하기 위해서는 산소 전달율을 극대화하여 용존산소량을 높일 수 있는 기술개발이 필요하다[2].

용존산소는 물에 녹아 있는 유리산소의 양을 나타내는데, 폐수처리설비에서 산소의 전달이 많이 요구되는 공정은 활성슬러지처리법과 같은 생물학적 처리공정이다. 그러나 산소는 용해도가 낮고 전달속도가 느려서 수면의 공기와 물의 접촉면만을 통해서 충분한 양의 산소가 용해되지 못하기 때문에 충분한 양의 산소를 전달하기 위해서는 강제적으로 공기를 주입하고, 공기기포를 미세화하고 산소의 전달속도를 높여야 한다[3]. 따라서 용존산소량을 증가시키기 위해서는 산소를 포함하고 있는 공기기포와 처리수의 접촉면적을 확대시키고, 기포의 처리수 내 체류시간을 증대시킬 수 있는 폭기장치가 필요하다. 용존산소량을 높이기 위해 가장 일반적으로 이용되는 블로어나 공기 압축기에 의한 방법은 공기를 물속에 불어넣어 공기기포가 수면쪽으로 부상하는 과정에서 산소가 녹아 들어가는 방식이기 때문에 기포를 미세화하기 위하여 다공성 구조물의 산기장치가 사용되고 있다[4-5].

블로어나 공기압축기와는 달리 이젝터는 흡입공기와 액체의 혼합류를 강력하게 분출함으로써 폭기수조 내에서 혼합과 폭기가 동시에 발생된다. 특히 이젝터의 진공부로 흡입된 공기기포는 이젝터 노즐 출구에서 고속으로 분출되는 액체의 전단력에 의해 미세한 기포로 분산되어 폭기수조 내에 주입되므로 처리수와 접착 면적이 커지게 된다. 또한 미세화된 공기기포는 부상속도가 느려서 체류시간을 크게 할 수 있기 때문에 산소전달효율을

높일 수 있는 장점이 있다[6]. 이젝터에 대한 연구는 공기의 유입율[7-8], 폭기수조 내에서의 공기기포의 체류시간[9-11], 산소 전달율[12-13] 등에 대해 실험 및 수치해석적으로 다양하게 수행되고 있다.

한편 [14]는 회분식 반응기(batch reactor)를 이용하여 해산물 가공폐수의 혐기성 미생물과 염분농도에 따른 혐기성 생분해도를 평가하는 연구를 통해서 리터당 염소이온 농도가 3,000mgCl/L 이하의 조건에서 85% 이상의 유기물 제거효율을 얻을 수 있다는 결과를 발표하였다. [15]는 외륜(paddle wheel) 및 프로펠러형 폭기장치를 이용하여 산소 전달율에 미치는 염분의 영향에 대한 연구를 통해 염분농도 30%의 조건에서 2종류의 폭기장치 모두 최대의 산소전달율을 나타내며, 외륜형에 비해 프로펠러형 폭기장치의 전달효율이 2배 이상 높다는 결과를 발표하였다. [16]과 [17]은 회분식 교반기를 이용하여 활성슬러지 처리시스템의 성능에 미치는 염분농도의 영향에 대한 연구결과를 발표하였다. Wang 등은 염화나트륨의 농도가 5g/L 이상의 조건에서는 용존산소량이 35% 이상까지 감소하였으며, Kargi는 호염성세균(halophilic bacteria)가 포함된 활성슬러지의 처리에서 2%(w/v) 이상의 염분조건일 때 화학적산소요구량(COD)의 제거율이 증가한다는 결과를 발표하였다.

기술혁신을 통한 고효율 친환경기술의 적용은 모든 산업분야에서 강조되고 있는 세계적인 추세임에도 불구하고, 연구동향에서 고찰한바와 같이 폐수처리 공정에서 산소전달 특성에 미치는 염분의 영향에 대한 연구는 기존의 회분식 시스템을 이용한 것이 거의 대부분이다. 따라서 본 논문은 공기주입 및 강제혼합을 병용함으로써 용존산소량을 증가시킬 수 있는 이젝터를 이용한 폭기장치의 용존산소량 특성에 미치는 염도의 영향에 대한 실험적 연구를 목적으로 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 이용된 실험장치[18]는 Figure 1과 같이, 가압 모터-펌프, 이젝터 시스템, 모터-블로어, 폭기 및 순환수조, 용존산소 측정기 그리고 제어판넬 등으로 구성된다. 가압 모터-펌프에 의해서 구

동되는 이젝터 시스템의 유량은 전자제어 유량계와 유량 조절밸브를 이용하여 조절하며, 이젝터에서 발생하는 진공압에 의해서 유입되는 공기량은 진공계와 공기 유량계를 이용하여 측정한다. 폭기 및 순환수조의 체적은 각각 약 1500L, 700L이며, 폭기수조로부터 순환수조로 순환되는 처리수는 수조 상단으로부터 약 30cm 아래쪽에 위치한 직경 약 10cm의 연결통로를 통해 두 수조의 수위차에 의해 낙하되도록 설계하였다. 폭기수조의 바닥 가장자리 둘레에는 다공성 배관을 설치하여 가압수와 섞인 공기가 분출되도록 설계하였다. 용존산소 측정기는 YSI사의 5B모델이 사용되었고, 폭기수조의 수면으로부터 30cm 지점에 설치하여 시간에 따른 용존산소 농도를 측정하였다.

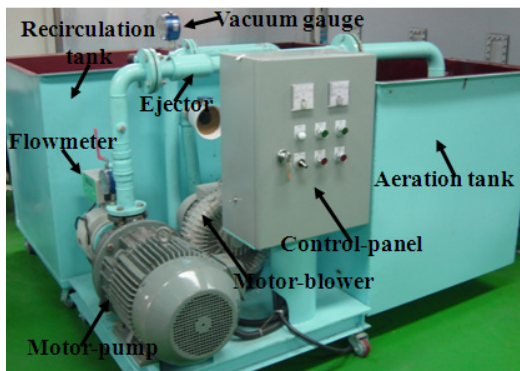
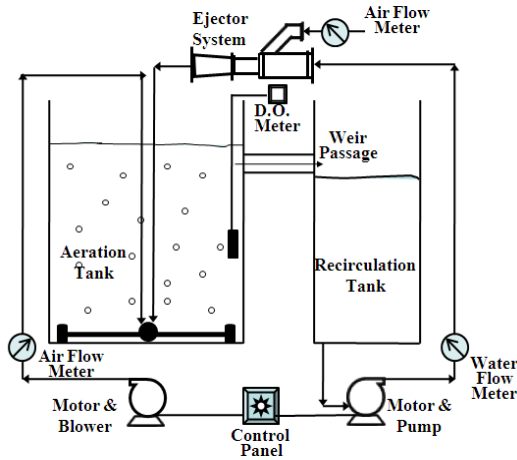


Figure 1: Schematic diagram and photograph of experimental ejector system.

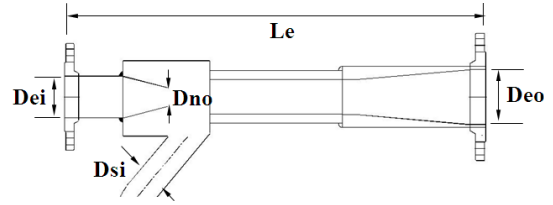


Figure 2: Schematic diagram of an ejector.

Table 1: Specifications of ejector.

Description	Value
Diameter of ejector inlet, Dei[mm]	53
Diameter of ejector outlet, Deo[mm]	66
Diameter of nozzle outlet, Dno[mm]	16
Diameter of suction inlet, Dsi[mm]	48.5
Total length of ejector, Le[mm]	865

Figure 2는 본 연구에서 이용한 이젝터의 개략도를 나타낸다. Table 1과 같이 이젝터의 입구(Dei)와 출구(Deo)직경은 53와 63mm이며, 이젝터 노즐 출구직경(Dno)과 흡입되는 공기 유입구 직경(Dai)은 각각 16와 48.5mm이고, 이젝터의 전체 길이(Le)는 865mm이다.

2.2 실험방법

용존산소량을 측정하기 위해 가장 일반적으로 이용되는 방법은 폭기수조 내의 탈 산소화된 물에 대한 비정상상태 재폭기(re-aeration) 방법이다 [18-19]. 이 방법에서는 아황산나트륨(Na₂SO₃)과 촉매인 염화코발트(CoCl₂)를 첨가하여 실험수를 탈 산소화시키게 되는데, 탈 산소화 반응식은 아래와 같다.



실제로 아황산나트륨은 20~30% 초과하여 주입하며, 코발트의 농도는 최소 0.5mg/L 이상이고, 최고 1.5mg/L을 초과하지 못하도록 하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 실험이 시작되기 전에 폭기수조와 순환수조에 약 1700 L의 순수한 수돗물을 채운 후 실험조건에 따라 염도를 조절하고,

위의 반응식에 의해 계산된 아황산나트륨과 촉매를 첨가하여 탈 산소화시켜 실험을 수행하였다.

본 연구의 실험변수는 처리수의 염도이며, 이젝터 폭기시스템의 성능평가를 위해서 블로어 폭기시스템에 대한 비교실험을 수행하였다. 일반적으로 블로어를 이용하는 폭기시스템에서는 유입공기를 미세화하기 위해서 멤브레인 산기관 등을 이용한다. 그러나 본 연구에서는 이젝터의 부압에 의해 흡입되는 공기량과 동일한 양의 공기가 유입되도록 블로어의 유입공기량을 조절하고, 블로어 시스템에서도 이젝터 시스템과 마찬가지로 폭기수조의 바닥 가장자리 둘레에 설치된 직경 5mm의 홀이 뚫린 다공성 배관을 통해 폭기시키며, 용존산소량을 측정하였다. Table 2는 실험변수 및 조건들을 나타낸다. 이젝터 시스템의 모터-펌프 가압유량은 0.45m³/min이며, 이때의 흡입 공기유량은 2.394m³/min이다.

산소전달 메커니즘을 설명하기 위하여 수많은 이론들이 제안되어 왔지만, 1924년에 Lewis와 Whitman에 의해 제안된 이중막 이론(two-film theory)이 가장 많이 이용되고 있다[20]. 액막의 저항이 산소 전달율을 제한한다고 가정한 난류 조건 하에서 공기기포로부터 물속으로의 산소 전달율은 총괄 물질전달계수 K_La와 산소부족량의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dC}{dt} = K_L a \cdot (C_S - C) \quad (2)$$

여기서 C는 측정된 임의의 시간 t에서의 물속의 산소농도, C_S는 일정한 온도 및 염도 조건에서의 수중 포화 용존산소 농도를 나타낸다.

총괄 물질전달계수 K_La는 다음과 같은 과정을 통해 계산할 수 있다.

$$C = C_S - (C_S - C_0) \exp(-K_L a \cdot t) \quad (3)$$

$$K_L a = \frac{\ln(C_S - C_0) - \ln(C_S - C)}{t_0 - t} \quad (4)$$

여기서 C₀는 초기 조건에서의 용존산소 농도를 나타낸다.

Table 2: Summary of test parameters.

Parameter	Value
Air flow rate[m ³ /min]	2.394
Air temperature[°C]	26.5
Water temperature[°C]	23.5
Water volume[m ³]	1.7
Water salinity[‰]	0 ~ 25

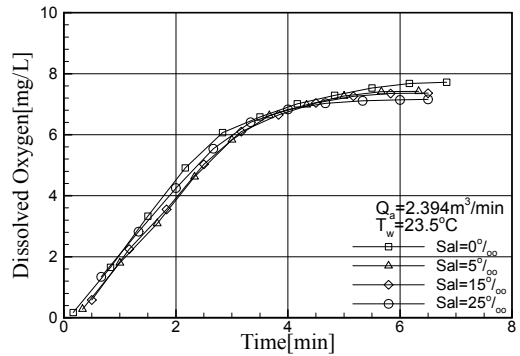


Figure 3: Dissolved oxygen concentrations of the ejector aeration system with the re-aeration time at varying water salinity.

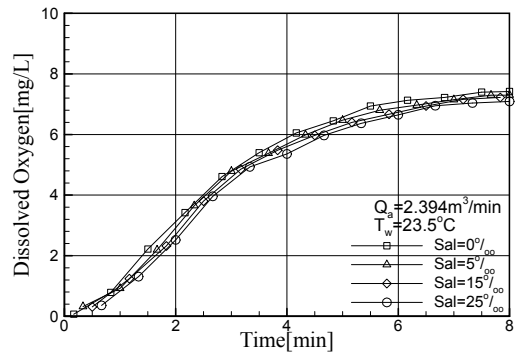


Figure 4: Dissolved oxygen concentrations of the blower aeration system with the re-aeration time at varying water salinity.

3. 결과 및 고찰

Figure 3과 Figure 4는 이젝터 및 블로어 폭기시스템에서 처리수의 염도에 따른 용존산소 농도변화를 나타낸다. 대기압 조건에서 처리수의 염도는 0, 5, 15, 그리고 25‰이며, 유량과 온도는 각각 2.394m³/min과 23.5°C이고, 흡입되는 공기의 온도는 26.5°C인 조건이다. Figure 3과 Figure 4의 결과를 통해서 처리수의 염도가 증가하면 포화 용존산

소량이 감소한다는 것을 알 수 있다. 이는 일정한 조건에서 물속에 용해될 수 있는 용질(solute)의 양은 증가된 염분량만큼 줄어들게 되므로 용해되는 산소량이 감소하기 때문이다. 정량적으로 고찰하면, 4가지 염도조건에서 이젝터 시스템의 평균적인 용존산소량은 2, 4, 6분경과 후에 약 4.2, 6.8, 7.4mg/L이며, 블로어 시스템의 경우에는 2, 4, 6, 8분경과 후에 약 2.8, 5.6, 6.8, 7.3mg/L로 나타났다. 따라서 블로어 시스템에 비해서 이젝터 시스템의 폭기 시간을 약 2분 정도 단축시킬 수 있다는 것을 알 수 있다. 이는 블로어 시스템에서와는 달리 이젝터의 노즐출구에서 고속으로 분사된 처리수와 흡입된 공기기포가 디퓨저의 평형부와 확대부를 통과하며 혼합되고, 공기기포가 미세화되기 때문인 것으로 사료된다.

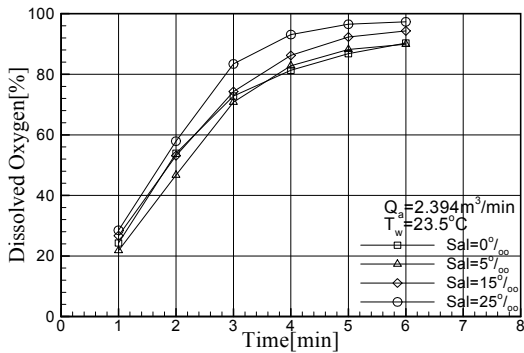


Figure 5: Percentage dissolved oxygen concentrations of the ejector aeration system with the re-aeration time at varying water salinity.

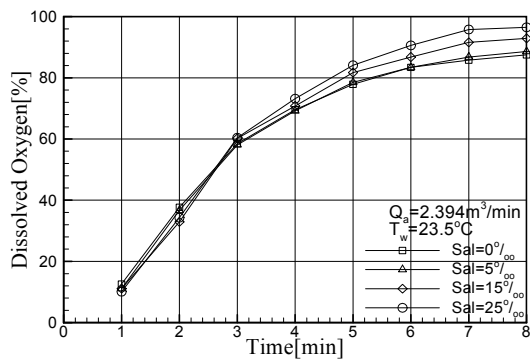


Figure 6: Percentage dissolved oxygen concentrations of the blower aeration system with the re-aeration time at varying water salinity.

Table 3: Saturated dissolved oxygen concentration [mg/L].

Temperature[°C]	Salinity[‰]			
	0	5	15	25
23.5	8.48	8.24	7.78	7.35

Figure 5와 Figure 6은 Table 3에 주어진 처리수의 염도 0, 5, 15, 25‰일 때의 포화 용존산소 농도 8.48, 8.24, 7.78, 7.35mg/L에 대한 폭기 시간에 따른 백분율 용존산소 농도를 나타낸다. Figure 5과 Figure 6의 결과는 10초 간격으로 측정된 Figure 3과 Figure 4의 용존산소량 자료 중에서 1분 간격으로 선택하여 백분율을 계산하였다. 염도가 높아지면 포화될 수 있는 산소량은 줄어들지만, 물에 용해된 소금성분으로 인해서 물의 밀도가 증가하여 폭기되는 기포의 크기와 부상속도가 감소하고, 기포와 처리수의 접촉 면적 및 시간은 증가하기 때문에 염도가 높을수록 시간당 용존산소 증가율은 커지고, 용존산소가 포화상태에 도달하는 시간이 짧아지는 것을 Figure 5와 Figure 6의 백분율 용존산소 농도결과를 통해서 알 수 있다. 정량적으로 고찰하면, 4가지 염도조건에서 6분경과 후의 이젝터 시스템의 백분율 용존산소 농도는 90.3~97.3%이며, 8분경과 후의 블로어 시스템의 백분율 용존산소 농도는 87.5~96.5%임을 알 수 있다.

Figure 7은 이젝터 및 블로어 시스템의 4가지 처리수 염도에 대한 총괄 물질전달계수 K_{La} 을 식(4)를 이용하여 계산한 결과를 나타낸다. Figure 5와 Figure 6의 결과를 통해서 고찰한 바와 같이 염도가 높아지면 시간당 산소 전달율이 커지기 때문에 총괄 물질전달계수가 증가하는 것을 알 수 있다. 정량적으로 고찰하면, 이젝터 시스템의 총괄 물질전달계수는 $10.29 \sim 7.29hr^{-1}$ 이고, 블로어 시스템은 $7.74 \sim 12.27hr^{-1}$ 의 범위임을 알 수 있다. 따라서 총괄 물질전달계수가 평균적으로 이젝터 시스템은 약 $13.2hr^{-1}$ 이고, 블로어 시스템은 약 $9.4hr^{-1}$ 이므로 이젝터 시스템의 총괄 물질전달계수가 블로어 시스템보다 평균적으로 약 40% 정도 높다는 것을 알 수 있다. 또한 염도가 5‰에서 15‰과 25‰로 10%와 20% 증가할 때, 이젝터 및 블로어 시스템의 총

괄 물질전달계수는 약 22%와 53% 정도 증가하는 것을 알 수 있다.

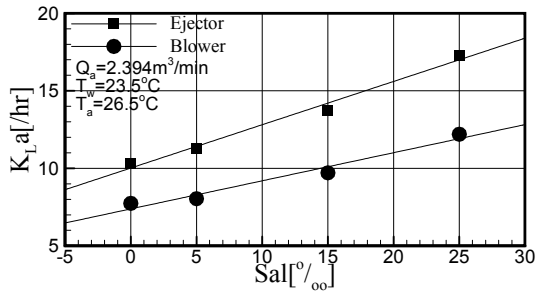


Figure 7: Effect of the water salinity on the volumetric mass transfer coefficient of the ejector and blower aeration system.

4. 결 론

이젝터 폭기 시스템의 산소전달 특성에 미치는 염도의 영향에 대한 연구결과를 종합하면 다음과 같다.

염도가 높아지면 포화 용존산소량은 감소하지만, 용해된 소금성분으로 인해 밀도가 증가하여 기포의 부상속도는 느려지고 공기기포와 처리수의 접촉 면적 및 시간이 증가하기 때문에 시간당 용존산소량 증가율은 커지고, 포화 용존산소에 도달하는 시간은 짧아졌다.

염도에 따른 총괄 물질전달계수의 평균치는 이젝터 시스템에서 약 13.2hr^{-1} 이고 블로어 시스템에서 약 9.4hr^{-1} 이므로, 이젝터 시스템의 총괄 물질전달계수가 블로어 시스템보다 약 40% 정도 높게 나타났다.

후 기

이 논문은 2009년도 전남대학교 특성화분야 연구비지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- [1] 이진영, 정윤진, “식품폐수 처리시스템의 최적화 방안 연구,” 대한환경공학회 추계학술발표대회, pp. 518-525, 2004.
- [2] 김지혜, 박상원, “폐염수 재이용을 위한 멤브레인 시스템 운전조건 도출,” 한국폐기물자원

순환학회지, 제28권, 2호, pp. 229-233, 2011.

- [3] J. A. Mueller, W. C. Boyle and H. J. Popel, AERATION: Principles and Practice, CRC Press, 2002.
- [4] C. Matter-Muller, W. Gujer and W. Giger, “Transfer of volatile substances from water to the atmosphere,” Water Research, vol. 15, pp. 1271-1279, 1981.
- [5] J. M. Chern and C. F. Yu, “Volatile organic compound emission rate from diffused aeration systems 1. mass transfer modeling,” Ind. Eng. Chem. Res., vol. 34, pp. 2634-2643, 1995.
- [6] Y. M. Chen and C. Y. Sun, “Experimental study of the performance characteristics of a steam-ejector refrigeration system,” Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 15, pp. 384-394, 1997.
- [7] A. Ben Brahim, M. Prevost and R. Bugarel, “Momentum transfer in a vertical down flow liquid jet ejector: Case of self gas aspiration and emulsion flow,” Int. J. Multiphase Flow, vol. 10, no. 1, pp. 79-94, 1984.
- [8] T. Utomo, Z. Jin, M. Rahman, H. M. Jeong, and H. S. Chung, “Investigation on hydrodynamics and mass transfer characteristics of a gas-liquid ejector using three-dimensional CFD modeling,” J. Mechanical Science and Technology, vol. 22, pp. 1821-1829, 2008.
- [9] J. Zahradnik, M. Fialova, V. Linek, J. Sinkule, J. Renickoca and F. Kastanek, “Dispersion efficiency of ejector-type gas distributors in different operating modes,” Chem. Eng. Sci., vol. 52, pp. 4499-4510, 1997.
- [10] N. N. Dutta and K. V. Raghavan, “Mass transfer and hydrodynamic characteristics of loop reactors with down flow liquid jet ejectors,” Chem. Eng. J., vol. 36, pp. 111-121, 1987.
- [11] M. I. Kim, O. S. Kim, D. H. Lee and S. D.

- Kim, "Numerical and experimental investigation of gas-liquid dispersion in an ejector," Chem. Eng. Sci., vol. 62, pp. 7133-7139, 2007.
- [12] M. Moresi, G. B. Gianturco and E. Sebastiani, "The ejector-loop fermenter: description and performance of the apparatus," Biotechnol. Bioeng., vol. 25, no. 12, pp. 2889-2904, 1983.
- [13] C. A. M. C. Dirix and K. van der Wiele, "Mass transfer in jet loop reactors," Chem. Eng. Sci., vol. 45, pp. 2333-2340, 1990.
- [14] 최용범, 권재혁, 임재명, "해산물 가공폐수내 염분농도가 혐기성 최종생분해도와 유기물 다중분해속도에 미치는 영향," 대한환경공학회지, 제32권, 11호, pp. 1038-1045, 2010.
- [15] L. Vinatea and J. W. Carvalho, "Influence of water salinity on the SORT of paddlewheel and propeller-aspirator-pump aerators, its relation to the number of aerators per hectare and electricity costs," Aquacultural Engineering, vol. 32, pp. 73-78, 2007.
- [16] J. L. Wang, X. M. Zhan, Y. C. Feng and Y. Qian, "Effect of salinity variations on the performance of activated sludge system," Biomedical and Environmental Science, vol. 18, pp. 5-8, 2005.
- [17] F. Kargi, "Enhanced biological treatment of saline wastewater by using halophilic bacteria," Biotechnology Letters, vol. 24, pp. 1569-1572, 2002.
- [18] 양희천, 정성원, 박상규, "에어레이션용 이젝터 시스템의 성능 특성," 대한기계학회 2009 추계 학술대회 논문집, pp. 2458-2462, 2009.
- [19] K. K. Al-Ahmady, "Analysis of oxygen transfer performance on sub-surface aeration systems," Int. J. of Environmental Research and Public Health, vol. 3, pp. 301-308, 2006.
- [20] 박성식, "수질오염처리용 포기조에서 산소의 물질전달특성연구," 대전대학교 석사학위 논문, 2001.

저자 소개



양희천(楊熙千)

1994년 중앙대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 전남대학교 기계자동차공학부(교수)



박상규(朴相圭)

1989년 인하대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 전남대학교 기계자동차공학부(교수)