

Off-gas Analyzer를 이용한 하수처리장 단일선회류 방식 포기시스템 산소전달 효율의 평가

박보화 · 고광백 · 박재한[†] · 임세호 · 신동록* · 윤혜정 · 이지영 · 문태훈

연세대학교 공과대학 토목환경공학과 환경공학연구소

^{*}(주) 에코원, 환경사업본부, 서울

Oxygen Transfer Efficiencies of A Single Spiral Roll Aeration System by the Off-gas Method

Bo Hwa Park · Kwang Baik Ko · Jae Han Park[†] · Se Ho Lim · Dong Rok Shin* ·

Hye Jung Yun · Ji Young Lee · Tae Hoon Moon

School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University

^{*}Environmental Department EcoOne Corp. Seoul

(Received 17 January 2006, Accepted 23 March 2006)

Abstract

The supply of oxygen for aeration is the largest energy consumer at activated sludge wastewater treatment plants. Replacement of less efficient aeration systems with fine pore aeration devices can save up to 50 percent of aeration energy costs. The purpose of this study was the diagnosis and evaluation of a domestic wastewater aeration system by the off-gas method which had been studied by US EPA and ASCE. For this study, an off-gas analyzer and its hood were made to collect off-gas. Also, a vacuum pump was connected to the analyzer to make suction of off-gas. Experiments were conducted at a domestic activated sludge wastewater treatment plant which had a single spiral roll aeration system installed with P.E tube diffuser. Data on OTE(f), SOTE(pw), OUR, and air flow rate were obtained from these experiments. In case of replacing an aeration system, it is recommended that it should be replaced with perforated membrane disc or ceramic disc fine bubble diffusers installed in a full floor coverage or grid pattern.

keywords : Aeration system, Off-gas analyzer, OTE, OUR, SOTE

1. 서론

도시하수 및 각종 산업폐수를 생물학적인 방법으로 효과적으로 처리하는 가장 대표적인 방법으로 활성슬러지 공정이 이용되어 왔다. 이러한 활성슬러지 공정의 운영에 있어서 가장 큰 전력을 사용하는 것이 포기 시스템이다. 미국의 경우에 하수처리장의 총 에너지 사용량의 약 50 - 90% 정도가 이 포기를 위하여 사용되고 있는 실정이고, 저효율의 포기시스템을 고효율 포기장치로 대체한다면 최대 50% 까지 에너지 사용비용을 절감할 수 있다고 알려져 있다 (Redmon, 1983). 따라서 본 연구는 국내의 활성슬러지 공법의 하수처리장을 대상으로 Off-gas Method를 이용하여 단일 선회류 방식 포기시스템의 산소전달 효율을 측정하고 전면 및 점감 포기 방식 시스템의 산소전달 효율을 비교하는 것을 목적으로 하고 있다. 또한 기존의 PE tube 산기기를 음향공진 산기기로 교체한 후의 산소전달 효율의 변화도 평가하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1. 실험 장치

Off-gas Analyzer를 이용하여 포기조로부터 배출되는 off-gas를 포집하기 위해서 0.6 mW × 2.4 mL의 크기로 hood를 제작하였다. hood와 Off-gas Analyzer사이에는 플라스틱 파이프를 연결하고, 진공펌프를 분석기의 끝에 연결하여 off-gas를 흡입할 수 있도록 하였다. hood는 물에 가라앉지 않도록 나무 합판으로 만들었으며, 안에는 스티로폼을 넣어 물과 포집된 off-gas가 새어나가거나 들어오지 않게 처리하였다. Off-gas Analyzer의 기본 구조는 Fig. 1과 같다(고 등, 2001; 김 등, 2001; 박 등, 2001).

2.2. 실험 방법

연구대상 하수처리장은 PE tube형 산기기가 포기조 측면에 부착되어 있는 단일 선회류방식(single spiral roll)의 포기시스템으로 운영되고 있었다. 효율 비교를 위해 PE tube형 산기기를 음향공진 산기기로 교체한 후 추가 실험도 실시하였다. 대상 하수처리장에 사용된 산기기 채원은 Table 1과 같다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
withpark79@hanmail.net

Table 1. Description of diffusers

Diffuser	Airflow (l/min)	Standard	Material	OTE (clean water 4.5m)	Strength (kgf/cm ²)	Bubble size (mm)
P.E Tube (single spiral roll)	100~150	Φ70×L500	P.E	14% ↑	450	Φ5mm
Acoustic resonance (single spiral roll)	100~150	Φ30×8mm×H38	STS 316	16% ↑	5500	·
Ceramic dome (full floor coverage)	30~40	Φ178×H38	Al ₂ O ₃	26% ↑	350	Φ1~3

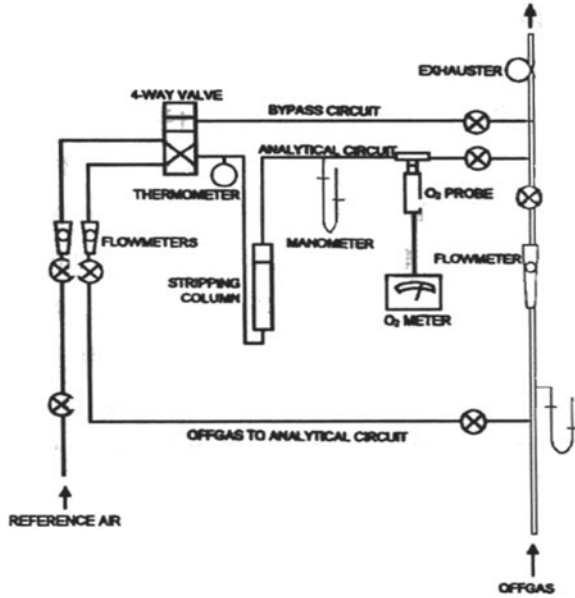


Fig. 1. Diagram of Off-gas Analyzer (ASCE, 1996).

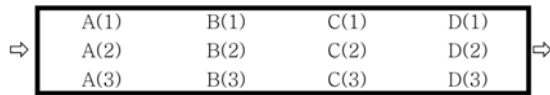


Fig. 2. Locations of the hood in an aeration tank (9 mL × 78 mL × 5.5 mH).

이 하수처리장은 총 32지의 동일한 규격(9 mW × 78 mL × 5.5 mH)의 포기조가 설치되어 있다. 이 포기조들 중에서 포기 시스템을 대표할 수 있는 1지, 2지, 5지 및 7지를 선정하여 실험을 실시하였다. 포기조 수표면에 완전 밀폐된 hood(0.6 mW × 2.4 mL)를 설치한 후수표면에서 배출되는 배출가스를 포집하고 이 포집된 가스를 Off-gas Analyzer로 진공 펌프를 이용하여 유입시켰다. 각 포기조에는 Fig. 2와 같이 총 12 지점에 hood를 설치하여 산소 전달효율을 측정하였다. 특히 (1)의 위치는 산기기가 부착되어 공기량이 대단히 큰 지점을 나타낸다. 단일 선회류 방식 포기조의 대형 공기방울이 배출되는 탱크에서는 (Hook et al., 1992)에서와 같이 본 실험에서도 hood를 난류 때문에 고정시키는 것이 용이하지 않았다.

Fine Pore Aeration Manual의 규정에 의하면 측정대상 면적은 최소한 포기조 총 면적의 2% 이상이어야 한다(U.S EPA, 1989). 본 실험에서는 포기조 면적이 702 m²이고, 1.44 m²의 hood로 12지점을 측정하였기 때문에 전체 면적에 대해 2.46%를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Oxygen Transfer Efficiency(OTE)와 Standard Oxygen Transfer Efficiency (SOTE, 20°C, 1 atm)의 비교와 포기조 운영상태

연구대상 4 포기조의 OTE(f)를 폐수 유입부(A)에서 유출부(D)쪽으로 모두 평균을 내서 그래프를 그려보면 Fig. 3과 같다. 이 그래프를 통해서 보면, OTE(f)는 유입에서 유출로 갈수록 높아지고 있는 것을 알 수 있다. 연구대상 이었던 4지의 평균 OTE(f)는 약 8.2%였다.

실험한 포기조 탱크를 각 위치별로 가중 평균을 내서 OTE(f)와 SOTE(pw)를 그래프로 그려봄으로써 포기조의 상태를 확인할 수 있었다. 4개의 실험 대상 포기조의 A, B, C, 및 D를 모아서 평균을 낸 그래프는 Fig. 4와 같다. 이 그래프를 보면 OTE(f)와 SOTE(pw)가 모두 2지에서 산소 전달 효율이 상당히 낮은 것을 알 수 있다. 육안으로 확인은 할 수 없지만, 산기기가 일부 파손 되었거나 아니면 공기를 공급해주는 header가 손상된 것으로 판단됨으로, 2지의 산기기가 교체나 header의 이상유무 파악 및 보수가 요구된다. 또한 OTE(f)보다 SOTE(pw)가 약간 높은 것을 알 수 있다. 이것은 OTE(f)를 20°C, 1 atm, 0 mgO₂/L의 표준 조건으로 바꿔줌으로써 발생하는 차이이다.

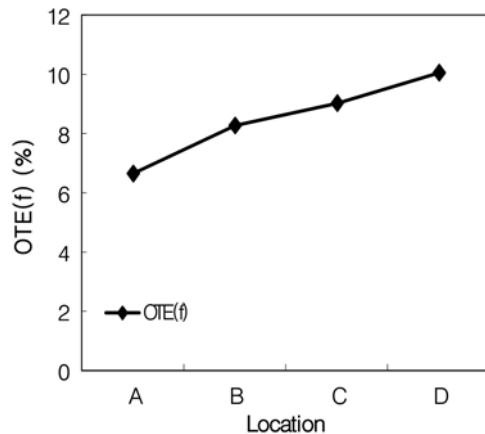


Fig. 3. Air flowrate-weighted average of OTE(f) for 4 aeration tanks.

3.2. 공기유량과 OTE(f)의 관계

공기유량과 OTE(f)는 밀접한 관계를 갖는다. 공기유량이 많으면 폐수안에 산소가 전달되고 남은 공기는 대기중으로 빠져나간다. 이때 호기성 미생물이 쓰지 못하고 남은 산소나 전달되지 않고 그냥 빠져나오는 산소가 많기 때문에 한

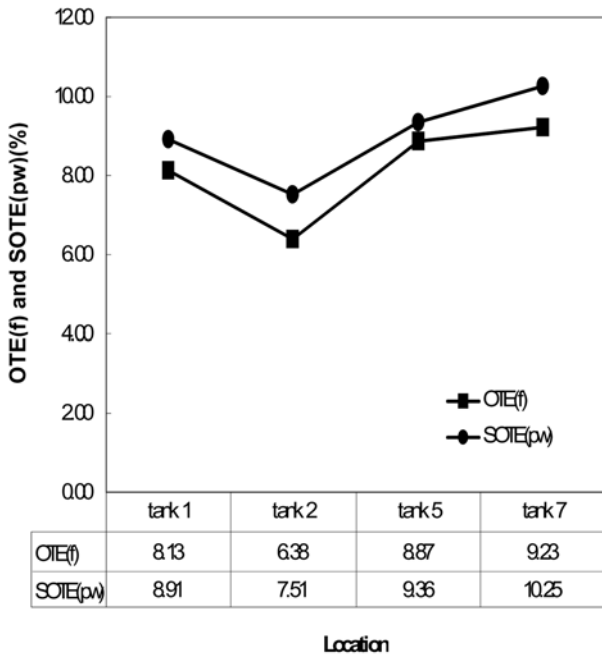


Fig. 4. Air flowrate-weighted average of OTE(f) and SOTE(pw) at Tank 1, 2, 5 and 7.

계 이상으로 공기유량을 많이 넣어줄 경우에는 산소전달 효율이 낮아진다. 이유는 넣어준 공기중의 산소에 대한 사용한 후의 남은 산소의 물분율로 OTE(f)를 계산하기 때문이다. 일반적인 공기유량(normal flux)과 낮은 공기유량(low flux)시스템을 비교해 보면 산소전달 효율은 low flux 시스템이 45-50% 정도 더 높게 나타난다고 보고되었다(Gillot et al., 2000). Fig. 5와 Fig. 6은 그 관계를 보여주는 그래프이다. 그림에서 보듯이 공기유량과 OTE(f)는 반비례하는 관계를 볼 수 있다. 포기조 위치에 따른 비교 결과에서도 공기유량은 유출부로 갈수록 감소하는 반면, 산소전달 효율은 증가하는 것을 볼 수 있다.

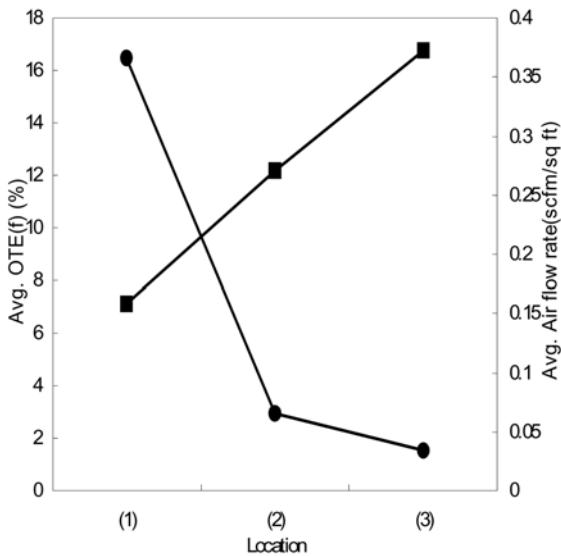


Fig. 5. Relationship of air flow rate to OTE(f) at various diffuser locations.

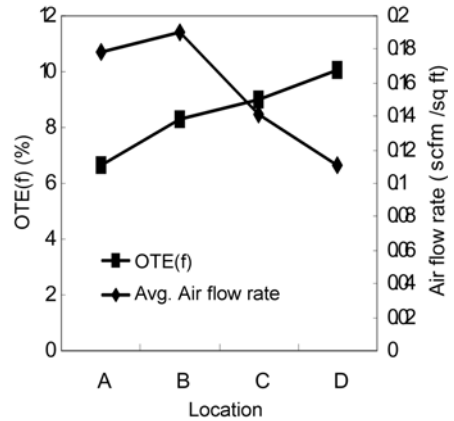


Fig. 6. Relationship of air flow rate to OTE(f) at various locations within aeration tank.

3.3. 공기유량과 Oxygen Uptake Rate (OUR)의 관계

OUR은 미생물에 의한 산소섭취율을 나타내므로, 산소섭취율이 높다면 미생물의 활동도가 높다고 할 수 있다. 그러므로, OUR값이 크다면 미생물에 의한 유기물의 섭취가 잘 일어난다고 할 수 있다. 또한 OUR값은 BOD부하와 밀접한 관계를 가지고 변동하기 때문에 예측하기가 쉽지 않다(Daugherty et al., 1995). 특히, 폐수가 과부하로 유입되는 하수처리장에서는 산소제한 조건일 때에 정확한 OUR를 측정하기 매우 어렵다(Stenstrom et al., 1997). Fig. 7은 공기유량과 OUR의 관계를 보여주는 그래프이다. 공기유량과 OUR이 완전히 일치하는 경향을 보이고 있다. Fig. 8은 산기기 위치에 따른 평균 공기유량과 OUR의 관계를 나타낸 그래프이다. 이 그래프 역시 공기유량이 많은 곳에서 OUR 값이 높게 나타나고 있음을 보여주고 있다. 이것은 OUR값이 DO에 제한을 받기 때문이다(Mark et al., 1997).

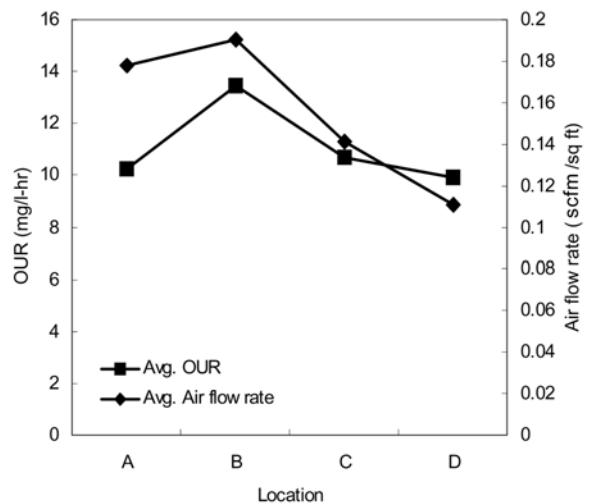


Fig. 7. Relationship of air flow rate to OUR at various locations within aeration tank.

3.4. PE tube와 음향공진 산기기의 산소전달 효율비교

하수처리장 내 총 32지의 포기조중 한 포기조의 PE tube형 산기기를 음향공진 산기기(acoustic resonance diffuser)로

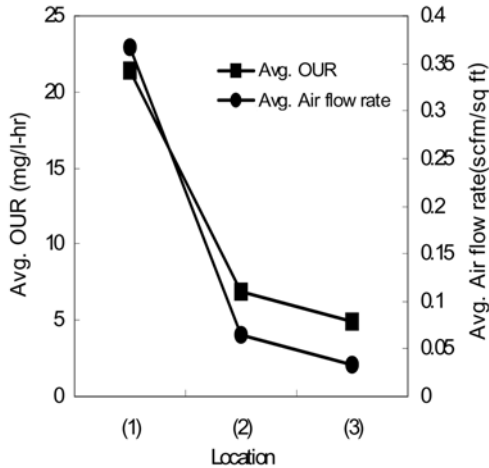


Fig. 8. Relationship of air flow rate to OUR at various diffuser locations.

Table 2. Experimental results from Tank 15 with PE tube-type diffusers

Location	OTE(f) (%)	SOTE (pw) (%)	OTR(f) (lbO ₂ /hr)	Air flux (scfm/ft ²)	DO (mg/L)	OUR (mg/L-hr)
A	6.35	6.51	21.16	0.19	0.14	10.85
B	11.22	12.27	35.45	0.18	0.90	18.18
C	7.21	10.99	30.89	0.25	3.74	15.84
D	6.44	11.23	20.21	0.18	4.67	10.36
Avg.	7.74	10.26	-	0.20	2.36	13.81

* With the exception of DO, all data are the weighted averages with respect to air flux

Table 3. Experimental results from Tank 16 with acoustic resonance diffusers

Location	OTE(f) (%)	SOTE (pw) (%)	OTR(f) (lbO ₂ /hr)	Air Flux (scfm/ft ²)	DO (mg/L)	OUR (mg/L-hr)
A	7.17	7.34	28.36	0.23	0.26	14.54
B	8.54	9.91	27.94	0.19	1.47	14.33
C	6.07	7.59	22.21	0.21	2.16	11.39
D	6.44	7.42	19.66	0.18	1.41	10.08
Avg.	7.04	8.03	-	0.20	1.33	12.58

* With the exception of DO, all data are the weighted averages with respect to air flux

교체했다. 음향 공진 산기기는 수명이 길고 유지보수가 간단하다는 장점을 가지고 있다. 이 두 가지 산기기의 산소 전달 효율을 비교하기 위해서 PE tube형 산기기가 있는 15지를 기존에 행하던 실험과 동일하게 실시하고 16지를 음향공진 산기기로 교체한 후 같은 실험을 실시했다. 각각의 결과는 Table 2, 3과 같다. 두 가지 산기기의 산소전달 효율을 비교해보면, 우선 OTE(f)는 기존의 산기기를 설치한 포기조가 7.74%이었고, 새로 교체한 포기조는 7.04%로 기존의 산기기가 다소 높은 OTE(f)를 보이고 있다. SOTE

(pw)는 기존의 포기조는 10.26%인데 반해, 교체한 포기조는 8.03%로 약 2%이상의 차이를 보이고 있다. 이것은 tank 15의 C와 D지점에서 포기조내의 용존 산소 농도가 음향공진 산기기로 상대적으로 높았기 때문이다. 공기유량은 두 산기기가 모두 동일한 조건으로 운영되고 있었으며, OUR값도 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이 결과로만 판단하면 기존의 산기기를 새로운 산기기로 교체한 것에 큰 의미를 찾아볼 수 없지만 기존의 PE tube형 산기기가 몇 년에 한번씩 교체를 해야 하고 마모 등으로 인해 포기조 운영의 문제가 발생해 왔기 때문에 수명이 길고 유지보수가 편한 음향공진 산기기로의 교체가 바람직할 것으로 판단된다.

3.5. 전면 및 점감식 포기 방식 포기조와의 비교

연구대상 하수처리장이 사용하고 있는 단일 선회류 방식 포기 시스템을 평가하기 위해서 국내 하수처리장중 전면 및 점감식 포기방식을 채택하고 있는 하수처리장을 대상으로 off-gas test를 실시하였다. Table 4는 그 실험 결과를 요약한 것이다. Tank 1, 2는 전면 포기 방식이고, Tank 3는 점감식 포기조이다. 두 포기조 모두 세라믹 돔형 산기기가 설치되어 있으며 산기기의 잠김 깊이는 15.5 ft였다. 실험 결과를 살펴 보면, 전면 포기 방식의 SOTE(pw)는 20.34%였고, 점감식 포기 방식은 14.7%로 전면 포기 방식이 더 높은 산소 전달 효율을 나타냈다. 이것은 단일 선회류 방식 포기 시스템으로 운영하고 있는 평가 대상이었던 산기기로 1.5배에서 2배이상 높은 산소전달효율을 보이고 있다. 공기유량은 전면 포기 방식이 0.13 scfm/sq ft이고, 점감식 포기방식은 0.26 scfm/sq ft로 전면 포기 방식 산기기로 두 배의 공기유량으로 운전되고 있는 것으로 나타났다. 이것은 더 많은 공기유량으로 운영하면서 더 낮은 산소전달 효율을 보이고 있기 때문에 전면 포기 방식 포기조로 포기 방식을 개선하는 것이 더 효율적이라는 것을 보여주고 있다. 또한, OUR은 25.38 mg/L-hr과 31.93 mg/L-hr로 단일 선회류 방식 포기 시스템에 비하여 2.5배에서 3배정도의 높은 수치로 운영되고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과를 토대로 보면, 지금 운영중에 있는 PE tube형 산기기를 설치한 단일 선회류 방식 포기 시스템을 세라믹 산기기의 전면 포기 방식 시스템으로 교체하는 것이 산소 전달에 효율적일 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 산소 전달 효율 측정 방법인 Off-gas Method를 도입해 단일 선회류 방식 포기조의 산소전달 효율을 측정해 보고 산소전달 매개변수들을 통해서 포기조의 문제점 및 개선 방안을 평가하기 위한 실험이었다. 이 연구를 통해 확보한 OTE(f), SOTE(pw), OUR, 및 공기유량 등을 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 단일 선회류 방식으로 운전되었던 포기조의 OTE(f)은 6.4~9.2%, SOTE(pw)은 7.5~10.3% 범위였으며 이는 동일한 방식으로 운영되고 있는 미국의 3개하수처리장

Table 4. Oxygen transfer characteristics for full floor coverage aeration system and tapered aeration system with ceramic dome diffusers

	Location	OTE(f) (%)	SOTE(pw) (%)	OTR(f) (lbO ₂ /hr)	Air Flux (scfm/ft ²)	DO (mg/L)	OUR (mg/L-hr)
Full floor coverage aeration	A	16.23	19.36	36.15	0.17	1.70	28.49
	B	17.43	18.69	30.52	0.14	0.82	24.04
	C	20.00	20.66	35.02	0.14	0.49	27.59
	D	17.96	18.05	16.19	0.07	0.23	12.76
	Avg.	17.77	19.35	-	0.13	0.81	23.19
Full floor coverage aeration	A	20.57	21.64	43.69	0.17	0.66	34.38
	B	21.21	22.14	34.94	0.13	0.59	27.48
	C	20.11	20.64	42.71	0.17	0.44	33.62
	D	20.83	20.73	18.77	0.07	0.16	14.80
	Avg.	20.62	21.32	-	0.13	0.46	27.58
Total Avg.		19.20	20.34	-	0.13	0.64	25.38
Tapered aeration	A	11.81	15.52	89.56	0.49	2.42	58.03
	B	10.49	13.25	59.55	0.37	2.13	38.59
	C	15.66	15.78	39.42	0.16	0.29	25.53
	D	13.70	13.62	8.80	0.04	0.17	5.73
	Avg.	12.01	14.70	-	0.26	1.25	31.93

Table 5. Oxygen transfer characteristics for Porous Plastic Tubes (Spiral Roll) of USA

Plant	Diffuser placement	Diffuser submergence (ft)	Diffuser age (mon)	Airflow per diffuser (scfm/diffuser)	Airflow per sq ft of basin area (scfm/ sq ft)	Average SOTE(pw) (%)
Glastonbury, Connecticut	Single spiral roll	12.3	12	4.0 - 5.0	na	7.2
Vallejo	Spiral roll	13.8	36	4.2	0.35	8.1
Renton-pass 1	Spiral roll	13.7	33	2.91	0.51	5.3
Tested domestic WWTP	Spiral roll	17.2	60	2.38	0.16	9.0

의 SOTE(pw) 5.3~8.1%와 비교했을 때 주입 공기 유량과 산소전달 효율 등이 적절한 범위로 운영되고 있다고 판단된다. 미국 하수처리장 SOTE(pw)는 Table 5와 같다.

2) 포기조내 유입부에서 유출부로 갈수록 OTE(f)나 SOTE(pw)는 증가하는 경향을 보였으며, 반대로 공기유량은 유입부에서 유출부로 갈수록 감소하는 경향을 보이고 있었다. 이는 유입부에 유기물의 부하량이 크므로 유입에 공기 유량을 크게하여 포기조를 운전하기 때문이었다.

3) OUR은 포기조 유입에서 반송되어 들어온 미생물들이 아직 활성화되지 못해서 유입 지점에서 보다 중간 지점에서 더 높다가 유출부로 갈수록 유기물의 양과 공기량이 줄어들면서 OUR값도 줄어들었다. OUR이 공기량과 똑같은 증감을 나타내는 것은 OUR값의 대소가 공기 유량과 관계가 있음을 보여주고 있다.

4) 연구대상 하수처리장의 OUR은 평균 11.1 mg/L-hr 이었으며, 일반적인 OUR 값인 40~60 mg/L-hr보다 작았다. 이렇게 낮은 범위의 OUR값이 본 연구대상 하수처리장에서 나타난 주요 원인은 유입하수 내 낮은 유기물의 농도와 포기조 내 용존산소의 농도를 약 1.0 mg/L정도로 낮게 운전하고 있기 때문으로 판단된다.

현재 PE tube형 산기기를 설치한 단일 선회류 방식 포기조는 비교적 적절히 운영되고 있으나, 앞으로 개정될 방류수질을 맞추기 위해서 포기 시스템을 교체해야할 필요성도

있다. 향후 포기 시스템을 개량하고자 할 경우에는 천공성 박막 디스크형 혹은 세라믹 디스크형 미세기포 산기기를 격자형으로 배치한 전면 포기 시스템으로 교체해야 할 것으로 판단된다.

기호 및 약어

- C : 용존 산소 농도(mg/L)
- C*_∞ : 실험결과로 추정된 평균 포화용존 산소의 농도 (mg/L)
- OTE(f) : 산소전달효율(현장조건, %)
- OTR(f) : 산소전달율(lbO₂/hr)
- OUR : 산소섭취율(mg/L-hr)
- SOTE : 표준산소전달효율(현장조건, %)
(1기압, 20°C, 0 mgO₂/L)

참고문헌

고광백, 정승균, Off-gas Analyzer를 이용한 하수처리장 포기 시스템 산소전달 효율의 진단 및 평가, 기술기사, *Civil Engineering* 토목, *대한토목학회지*, 49(6), pp. 56-61 (2001).
 김철웅, 고광백, 정승균, 박보화, Off-gas Analyzer를 이용한 하수처리장 심층포기시스템 산소 전달효율의 진단 및

- 평가, 2001년도 대한환경공학회 추계 학술발표회 논문초록집(I), 대한환경공학회, pp. 123-124 (2001).
- 박보화, 고광백, 김철웅, Off-gas Analyzer를 이용한 하수처리장 단일선회류 방식 포기시스템 산소 전달효율의 진단 및 평가, 대한토목학회 창립 50주년 기념 2001년 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 56-61 (2001).
- American Society of Civil Engineers, *Standard Guidelines for In-Process Oxygen Transfer Testing*, ASCE- 18-96, pp. 9-40 (1996).
- Daugherty, J., Vik, T. E. and Redmon, D. T., Aeration System Retrofit Design Optimization Procedure, *Central States Water Environment Federaion Conference* (1995).
- EPA/ASCE 625/1-89/023, *Design Manual-Fine Pore Aeration Systems*, U. S Environmental Protection Agency (1989).
- Gillot, S. and Hedit, A., Effect of Air Flow Rate on Oxygen Transfer in an Oxidation Ditch Equipped with Fine Bubble Diffusers and Slow Speed Mixers, *Water Research*, **34**, pp. 1756-1762 (2000).
- Hook, R. L., Mierzynski, B. J., Robson, S. and Sanvido, J. A., A Full-Scale Side-by-side In-waste Comparison of Oxygen Transfer Efficiency for Fine Bubble and Coarse Bubble Systems, *the Water Environment Federation Annual Conference* (1992).
- Mark, J., Wilson, T. E., Boyle, W. C. and Redmon, D. T., Optimizing Step Feed Aeration Design Using Offgas Testing, *70th Annual WEF Conference* (1997).
- Redmon, D. T., Boyle, W. C. and Ewing, L., Oxygen Transfer Efficiency Measurements in Mixed Liquor Using Off-Gas Techniques, *Journal of the water Pollution Control Federation*, **55**, pp. 1338-1347 (1983).
- Stenstrom, M. K. and Redmon, D. T., Oxygen Transfer Performance of Fine Pore Aeration in ASBs - A Full Scale Review, *TAPPI International Environmental Conference* (1997).