

## Off-gas Column Test를 이용한 하수처리장 심층포기시스템의 산소전달 매개변수( $\alpha$ 와 F)의 산정

김철웅 · 임세호 · 신동록\* · 이지영 · 박재한 · 안윤희\* · 고희백

연세대학교 공과대학 토목공학과 환경공학연구소실

\* (주) EcoOne Corp. 환경사업본부

## Evaluation of the Oxygen Transfer Parameters ( $\alpha$ and F) of a Coarse Bubble Aeration System by Off-gas Column Test

Chul Woong Kim · Se Ho Lim · Shin Dong Rok\* · Lee Ji Yong ·

Park Jae Han · Ahn Yoon Hee<sup>†</sup> · Kwang Baik Ko

School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University

\* Environmental Dept., EcoOne Corp.

(Received 17 January 2006, Accepted 20 October 2006)

### Abstract

Aeration by using diffusers usually requires approximately 50~90% of the total electricity needed to operate WWTP (WasteWater Treatment Plant)s. Accurate evaluation of the oxygen transfer efficiency for an aeration system, and recommendation of a better alternative may help saving WWTP operational costs. Appropriate techniques and methods to achieve this purpose have not been introduced in Korea. In this study, in-process analysis was performed for a coarse bubble aeration system by the off-gas method to evaluate its applicability in Korea. To accomplish this analysis, an off-gas test, unsteady-state clean water test and steady-state off-gas column test was conducted and comparisons to other aeration systems were made. The  $\alpha$  and the F estimated from the results of the unsteady-state clean water test and the steady-state off-gas column test were 0.61 and 0.90 respectively in a coarse bubble aeration system. The comparison of P.E tube diffusers laid out single spiral roll and ceramic dome diffusers laid out full floor coverage showed that the oxygen transfer efficiency of the coarse bubble aeration system was less than or similar to other aeration systems. But, airflow rates per unit area were 4~5 times greater than other aeration systems. In regards to the oxygen transfer efficiency for airflow rates per unit area, a retrofit to higher efficiency diffusers was urgently needed. This study showed proved that off-gas methods can apply to evaluate diffuser performances to estimate operating factors and to compare other aeration systems in Korea.

**keywords** : Fouling factor (F), Off-gas Method, Off-gas Column Test, Oxygen transfer efficiency (OTE), Standard oxygen transfer efficiency (SOTE), Ratio of  $K_{La}$  in process water ( $\alpha$ )

### 1. 서론

일반적으로 하수처리장 총 에너지 사용량의 약 50~90%를 호기조내 산기장치의 포기를 위해서 사용되고 있다. 따라서 포기시스템의 산소전달 효율에 대한 정확한 평가가 이루어지고 개선방향이 제시된다면 하수처리장의 운영관리에 들어가는 비용을 상당히 절감할 수 있다.

하수처리장마다 달라지는 산소전달 특성을 설명하는  $\alpha$ 와 F(Fouling factor)를 산출하는 방법으로, 1980년대 미국 환경청과 미국 토목학회의 연구 결과로 개발된 off-gas method가 현장에서 하수를 대상으로 결과를 도출하는 표준 방법으로 공인되어 있다(ASCE, 1988; 한국표준협회, 2002).

하지만 우리나라의 경우는 새로 제작된 산기기를 대상으로 하수가 아닌 깨끗한 물에서 unsteady-state clean water test만을 실시하고 있기 때문에 하수처리장에 설치된 산기기가 어떠한 산소전달 특성을 나타낼 것인지에 대해 정확한 지표가 될 수 없다.

따라서 본 연구에서는 off-gas method를 사용하여 국내 하수처리장에 설치되어 있는 심층포기 형태의 대형 기포 산기 시스템(coarse bubble aeration system)의 산소전달 상태를 진단하기 위하여,  $\alpha$ , F 값을 추정하는 현장실험 방법을 제시하였다. 본 연구에서 도출한 방법을 통해 현장에서 설치·운전되고 있는 산기 시스템의 상태에 대해 신빙성 있는 자료를 얻을 수 있다면, 이를 통해 적절한 공기공급량으로 산소전달시스템을 유지하고, 정기적인 개·보수를 통한 효율적인 운영을 기대할 수 있을 것이다.

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
reallove1210@hanmail.net

## 2. 재료 및 방법

본 연구에서 제안한 off-gas method를 통한  $\alpha$ 와 F 값의 산정은 다음과 같은 과정으로 이루어졌다. 첫 번째로 unsteady-state off-gas clean water test를 통해  $K_{La}$ 와  $SOTE_{cw}$ 를 구한다(고 등, 1994). 두 번째로 steady-state off-gas column test를 통해  $K_{Laf}$ 와  $SOTE_{pw}$ 를 구한다. 마지막으로 앞선 두 실험의 결과와 관계식으로부터  $\alpha$ 와 F를 구한다.

### 2.1. Unsteady-state off-gas clean water test

clean water test는 ASCE standard에 제시되어 있는 unsteady-state method에 따라서 이루어졌다(ASCE, 2001). 먼저 공기공급을 위해 공기압축기에서 공기공급량 조절을 위한 control panel까지, 그리고 control panel에서 실험 대상 산기기까지 연결관을 설치하고 공기가 누출되는 곳이 없는지 점검하였다. 그 후에 공기주입관이 연결되어 있는 산기기를 수조의 바닥에 설치하였다. 수조에는 깊이 1.3 m인 수심의 1/4지점(probe 1)과 4.0 m인 수심의 3/4지점(probe 2)에 DO meter probe를 설치하여 DO를 측정하였다. 이와 같이 장치한 후 설치된 산기기의 수중깊이가 5.0 m가 되도록 수조에 깨끗한 물을 채웠다. 그리고 공기 압축기를 가동시켜 통기량을 조절하였다. 통기량에 대한 조절이 끝나면 공기공급을 중단하고, 수조내 염화코발트( $CoCl_2$ )와 무수아황산소다( $Na_2SO_3$ )를 주입하여 DO를 1.0 mg/L 이하까지 낮추었다. 염화코발트는 무수아황산소다가 DO를 제거하는데 촉매로서 작용하며 때 실험마다 주입하였다. 염화코발트의 투입 후 수조내 균일한 확산을 유도하기 위해 30분간 포기시스템을 지속적으로 가동시켰다. 이론적인 무수아황산소다의 주입량은 1.0 mg/L의 DO를 낮추기 위해서 7.88 mg/L 정도이다(ASCE, 1996). 일반적으로 20~250% 과량의 무수아황산소다가 투입되며, 산소전달률이 높은 시스템의 경우 더 증가될 수 있다. 본 실험에서는 과량의 무수아황산소다를 주입하여 충분한 DO 감소가 일어나도록 유도하였다. 무수아황산소다는 정량펌프를 통해 농축액의 형태로 수조에 주입되었다. 수조내 DO가 최소화된 후 미리 정한 공기량을 주입하여 시간에 따라 증가하는 수조내 DO 농도의 변화를 DO meter로 측정하였다. 이렇게 측정된 시간에 따른 DO의 변화를 나타낸 자료를 비선형 회귀분석 프로그램에 입력하여  $K_{La}$ ,  $SOTE_{cw}$  등을 측정하였다.

### 2.2. Steady-state off-gas column test

steady-state off-gas column test 장치는 참고문헌에 제시되어 있는 Redmon 등(1992)의 method에 따라서 이루어졌다(Redmon et al., 1992). 먼저, off-gas analyzer의 밸브의 초기설정에 따라서 column의 맨 위에 있는 off-gas 포집 후드와 연결된 호스를 거쳐 진공펌프에서 보내는 진공압력으로 인해 가스가 흡입된다. 대기 중 공기(reference air)가 먼저 off-gas analyzer안의 분석 회로 내부로 흡입되고 압력과

센서가 공기 중에 함유되어 있는 DO의 몰 농도(%)를 연속적으로 약 2분 동안 감지하여 디지털 및 아날로그 신호로 나타낸다. 이 후에 column 안에서 발생한 off-gas가 약 5~10분 동안 analyzer안으로 흡입된다. 이 시간 동안 포집 후드로부터 끌어당겨진 off-gas의 부피에 대해서 후드 아래, 즉 column 안쪽에서도 대기압과 같은 평형대기 압력을 유지한다. 포집 후드 부근의 off-gas 압력, 센서 값과 혼합액의 DO 농도를 기록한다. 일단 안정한 off-gas 값이 얻어진 후에 reference air는 분석회로를 통해서 다시 한번 들어간다. 이러한 방법으로 off-gas와 reference air의 흐름 사이에서 산소의 부분압 차이를 측정하는 데 있어서 오차를 줄일 수 있다. column test에서는 column의 두경을 column의 지름에 맞게 제작하여 수조의 상부에 장착되며 이것으로 완전히 밀봉된다. 이렇게 되면 수조에서 포기가 이루어지고 나오는 off-gas는 전량 hood에 연결된 관을 통해 off-gas analyzer로 유입되게 된다. clean water test의 경우와 마찬가지로 공기 압축기와 연결된 공기 공급량 control panel과 산기기 사이를 공기 관으로 연결하고 이렇게 연결된 산기기는 수조의 바닥에 설치된다. 이렇게 장치한 후, 수중펌프를 사용하여 포기조의 혼합액을 수조 안으로 유입시켰다. 이때 유입유량은 121.5 L/min이었다. 수조를 채우고 남은 혼합액은 설치되어 있는 웨어를 통해 다시 포기조로 유입되게 하였다. DO meter는 수조 안과 포기조의 수중펌프가 설치되어 있는 지점, 두 곳에서 동시에 측정하였다. column 안에 수중펌프를 가동하고, 산기기로의 공기 공급을 원하는 유량에 맞게 조절하고 나서 실험을 시작하였다. unsteady-state clean water test와 steady-state off-gas column test가 거의 동시에 이루어진 하수처리장의 운영상태는 Table 1과 같다.

**Table 1.** Water quality of aeration tank in clean water test and off-gas column test

	BOD <sub>in</sub>	COD <sub>in</sub>	SS <sub>in</sub>	DO	MLSS
1st	158.8	80.9	218	0.2	2171
2nd	120.1	64.9	265	0.2	2103

\* in : influent

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. Unsteady-state off-gas clean water test

Fig. 1과 2에는 수심의 1/4지점(probe 1), 3/4지점(probe 2)에서 측정된 시간에 따른 DO 농도의 변화를 예로 나타내었다. 실험 후에 비선형분석으로 부터 나온  $K_{La}$ 와  $C_{\infty}^*$  값으로 실험 수조의 다른 지점에서도 일정한지, 실험을 반복했을 때 재현성이 있는지가 평가된다. 여기에는 실험 수조에서 최소 4개의 결정점이 필요하기 때문에 이와 같이 깊이를 4지점으로 나누었으며  $K_{La}$ 와  $C_{\infty}^*$  평균값의 변화가 제한된 범위를 가져야 하는데, 3/4의 값이 수조 전체 평균값의  $\pm 10\%$  이내이어야 한다(WPCF & ASCE, 1988).

이 자료와 Table 1의 실험조건을 바탕으로 비선형회귀

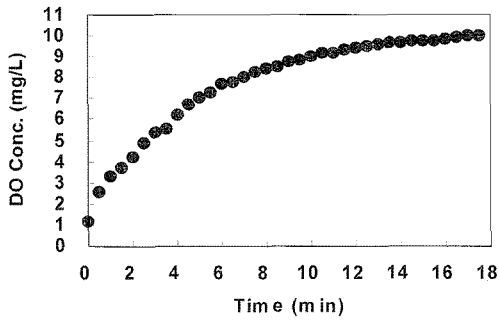


Fig. 1. DO concentrations during the unsteady-state clean water test(probe 1).

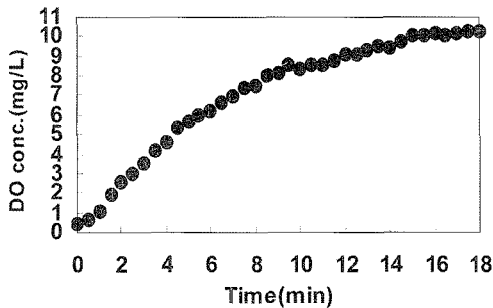


Fig. 2. DO concentrations during the unsteady-state clean water test(probe 2).

분석 프로그램을 사용해  $K_{La}$ ,  $C_{\infty}^*$ 와 같은 산소전달관련 계수들의 값을 구할 수 있다(고 등, 1994, 2001).

Table 2에는 본 연구에서 선정한 bowl snapper형 산기기를 가지고 수행하였던 unsteady-state clean water test 결과가 요약되어 있다. 실험결과를 살펴보면  $K_{La}$ 는 12.97(1/hr),  $C_{\infty}^*$ 는 9.32 mg/L, SOTE는 17.6%, SOTR은 1.11 lb/hr로 나타났다. 이러한 값들은 수조 안에 설치된 두 개의 DO probe에서 측정된 자료를 산술평균 함으로서 얻어졌다. 이 경우에 통기량은 172 L/min이었다.

Table 2. Results from the unsteady-state clean water test

probe	$K_{La}$ (1/hr)	$C_{\infty}^*$ (mg/L)	SOTE (%)	SOTR (lb/hr)
1	13.69	8.94	17.89	1.12
2	12.24	9.70	17.36	1.09
Average	12.97	9.32	17.60	1.11

### 3.2. Steady-state off-gas column test

통기량으로 정한 172 L/min은 off-gas test 결과로 도출된 단위면적 당의 공기량(0.72 scfm/sq ft)에 맞추어 설정된 값이다. 172 L/min을 scfm 단위로 환산한 후(6.08 scfm), column의 면적인 8.45 ft<sup>2</sup>로 나누어 주면 하수처리장의 단

위면적 당 공기량과 같은 0.72 scfm/sq ft가 된다. 통기량은 공기 압축기에서 토출될 때의 공기압력과 공기관 내 온도를 고려하여 표준조건으로 보정된 값이다. Table 3에는 steady-state off-gas column test 결과를 종합적으로 수록하였다.

$O_{Te}$ 와  $SOTE_{pw}$ 는 각각 4.35%와 9.64% 이었다. off-gas column test에서 측정된  $O_{Te}$ 를 포기조 표면에서 배출가스를 직접 포집하는 방식으로 수행된 off-gas test의  $O_{Te}$ 와 직접 비교할 수는 없다. 대신  $SOTE_{pw}$  값을 기준으로 한다면 비교가 가능하다. 두 실험의  $SOTE_{pw}$ 는 각각 off-gas test가 8.6%, off-gas column test가 9.6%로 나타나, off-gas column test가 off-gas test의 산소전달 효율 경향을 유사하게 재현한 것으로 판단된다.

이 실험으로 측정된 OUR 값은 31.33 mg/L/hr로 별도로 실험실에서 측정된 OUR인 23.2 mg/L/hr와 차이를 보였다. 이것은 포기조 및 칼럼의 형태 차이와 온도, 습도 등의 실험조건 차이로 판단된다.

그중 가장 중요한 원인으로 생각되는 것은 column의 DO 농도인데, 실험한 column의 DO 농도는 5.7 mg/L로 상당히 높았다. 보통 column의 DO 농도가 높으면, 측정된 OUR도 증가하는 것으로 보고 되어 있다(Redmon et al., 1992).

Unsteady-state clean water test와 steady-state off-gas column test 결과로 도출된 실험대상 하수처리장의  $\alpha$ 값은 0.61,  $F$ 값은 0.90이며,  $\alpha F$ 로 나타내었을 경우 0.55이었다. 이 값들은 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\frac{SOTE_{pw}}{SOTE_{cw}} = \frac{(\alpha F)SOTE}{SOTE_{cw}} = \alpha F = 0.55 \quad (1)$$

$$\frac{K_{Laf}}{K_{La}} = \alpha = 7.89/12.97 = 0.61 \quad (2)$$

$$\frac{\alpha F}{\alpha} = F = \frac{0.55}{0.61} = 0.90 \quad (3)$$

공정수(process water)에서의 계면활성제의 존재, 용존 고형물의 농도 및 부유 고형물의 존재가 산소전달에 대한 저항성을 증가시키므로  $K_{Laf}$  값은 일반적으로 깨끗한 물에서 보다 작다. 이러한 영향을 보정하기 위해 사용되는 것이  $\alpha$ 로, 이 값은 보통 0.4~1.2의 범위이며 하수의 종류에 따라 다른 값을 나타낸다(Redmon, 1983). 실험한 하수처리장의  $\alpha$ 값은 0.61로 이 범위 이내였다. 처음 설치된 산기기의  $F$ 값은 1.0으로 공극의 막힘 현상으로 인한 산소전달률의 감소는 없지만, 시간이 지남에 따라 산기기의 표면에 생물막

Table 3. Results from the steady-state off-gas column test

Airflow rate, L/min	$O_{Te}$ , %	$SOTE_{pw}$ , %	$OTR_f$ , mgO <sub>2</sub> /hr	DO conc. in Aerobic reactor, mg/L	DO conc. in Column, mg/L	R(OUR), mg/L/hr	$K_{Laf}$ , 1/hr
172	4.35	9.64	169409	0.36	5.71	31.33	7.89

이 형성되며 작고 균일한 공기방울이 만들어지는 것을 방해하여 산소전달률이 감소한다(US EPA, 1989). 하지만, 이 처리장의 Fouling 계수 값  $F$ 는 0.9 정도로 높게 나타났는데, 이것은 Fouling 현상이 심하게 나타나는 미세기포 산기기에 비해서 상대적으로 fouling에 대한 영향이 작은 대형기포 산기기를 사용하기 때문인 것으로 생각된다. 일반적으로 미세기포 산기기는 공극의 크기가 작기 때문에 대형기포 산기기에 비해 공극의 막힘 현상으로 인한 영향이 크며, 이러한 점에서 대형기포 산기기가 유지관리에 유리한 것으로 알려져 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 off-gas method를 사용하여 침출포기 형태의 대형기포 산기시스템의 현장 운영상태를 진단하여 그 활용 가능성을 제시하였다. 이를 위해 수행된 clean water unsteady-state test와 steady-state off-gas column test를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 단일 선회류 방식 포기조는 현장운영 조건에서  $OTE_r$ 은 6.4~9.2%,  $SOTE_{pw}$ 은 7.5~10.3% 범위였으며, 미국 하수처리장  $SOTE_{pw}$  5.3~8.1%와 비교하여 볼 때 비슷하거나 다소 높게 운영되고 있었다.  $OTE_r$ 와 공기유량은 정확하게 반대로 작용하고 있음을 수식과 실험을 통해서 알 수 있었다.
2. Unsteady-state clean water test를 통해 도출된 bowl snapper형 산기기의  $SOTE$ 는 17.6%로 나타났으며, steady-state off-gas column test 결과로 도출된 하수처리장의  $\alpha$  인자는 0.61이었다. 일반적인  $\alpha$ 인자는 0.4~1.2의 범위로 실험한 하수처리장의  $\alpha$ 는 이 범위 이내이었다.  $F$ 인자는 0.90으로 높게 나타났는데, 이렇게 높은  $F$ 인자는 실험한 하수처리장의 산기기가 대형기포 시스템이므로 미세기포 산기기에 비해 상대적으로 산기기 공극 막힘 현상의 영향을 덜 받는 일반적인 경향을 나타내는 것이다.
3. 국내 하수처리장의 산기식 포기시스템의 진단 및 평가에서 off-gas test를 직접 적용하기 어려운 현장에는 column 장치를 추가로 활용하여 본 연구에서 제안한 steady state column test방법으로  $\alpha$ 와  $F$ 값을 동시에 효과적으로 추정할 수 있다고 판단된다.

#### 기호 및 약어

C: DO concentration

$C_{\infty}^*$ : DO saturation concentration as time approaches infinity

$C_{\infty f}^*$ : steady state DO saturation concentration at infinite time in process water

$C_{\infty 20}^*$ : steady state DO saturation concentration in clean

water at infinite time and 20°C

F: fouling factor

$K_{La}$ : apparent volumetric mass transfer coefficient of oxygen in clean water at temperature, T

$K_{Laf}$ : apparent volumetric mass transfer coefficient of oxygen in process water at temperature, T

OTE: oxygen transfer efficiency

$OTE_f$ : oxygen transfer efficiency under process conditions

OTR: oxygen transfer rate

$OTR_f$ : oxygen transfer rate in process water

OUR or R: oxygen uptake rate

SOTE: standard oxygen transfer efficiency in clean water at 20°C, DO of O mg/L

$SOTE_{pw}$ : standard oxygen transfer efficiency in process water at zero DO and standard conditions

SOTR: standard oxygen transfer rate in clean water at 20°C, DO of O mg/L

$\alpha$ : ratio of  $K_{La}$  in process water to  $K_{La}$  in clean water at equivalent conditions of T, geometry, mixing, etc.

#### 참고문헌

- 고광백, 최미영, 황성슬리지 하수처리장 포기조 내 산소 전달특성( $\alpha$ ,  $\beta$ 와 R)의 효율적 산정방안 개발, *대한토목학회지*, 14(4), pp. 989-997 (1994).
- 고광백, 정승균, Off-gas Analyser를 이용한 하수처리장 포기시스템 산소전달 효율의 진단 및 평가, *대한토목학회지*, 49(6), pp. 56-61 (2001).
- 한국표준협회, *산기관의 산소전달률 시험방법*, 한국표준협회, KSM 9244 (2002).
- American Society of Civil Engineers, Aeration, A Wastewater Treatment Process, *ASCE-Manuals and Reports on Engineering Practice*, 68 (1988).
- American Society of Civil Engineers, Standard Guidelines for In-Process Oxygen Transfer Testing, *ASCE*, 18(96), pp. 121-131 (1996).
- American society of civil engineers, Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water, *Standard ANSI/ASCE Second Edition*, 2(91) (2001).
- Redmon, D. T., Oxygen Transfer Efficiency Measurements in Mixed Liquor using Off-Gas Technique, *J. Water Pollution Control Federation*, 55, pp. 1338-1347 (1983).
- Redmon, D. T., Nessman, M., and Ewing, L., Pilot Studies and Full Scale Performance Evaluation of a Membrane Disc Aeration System Treating Coated Paper Mill Wastewater at Wisconsin, *TAPPI Env. Conf.*, 1, pp. 563-578 (1992).
- US EPA, *Design Manual, Fine Pore Aeration Systems*, EPA/625/1-89/023, Center for Environmental Research Information, Cincinnati, Ohio (1989).