

실험반응조를 이용한 하수관에서의 재포기현상 재현 가능성에 관한 연구

Reproducibility of Reaeration in Sewer using Batch Reactor Test

황 환 국¹⁾ · 민 상 윤²⁾ · 조 진 규[†]

Hwankook Hwang · Sangyun Min · Jinkyu Cho

Received: May 8th, 2014; Revised: May 15th, 2014; Accepted: July 1st, 2014

ABSTRACT : The microorganism decomposition experiment of sewage in the underground sewer has the limit of experiment condition and time. The way to reproduce the microorganism decomposition in the underground sewer was studied using batch reactor setting up the DO as a limiting condition. The DO concentration in the sewer is controlled by reaeration. It is possible to obtain correlation between flow condition and reaeration coefficient through the reproduction of reaeration phenomenon by controlling the flow condition in the sewer using this phenomenon. And it is possible to set the flow condition and agitation intensity (velocity gradient) that has the same reaeration coefficient using the correlation between the reaeration coefficient with the flow condition and reaeration coefficient with the agitation intensity. The circumstances in the sewer system was reproduced using batch reactor setting up the DO as a limiting condition from these results.

Keywords : Sewer, Batch Reactor, Reaeration coefficient, Velocity Gradient

요 지 : 하수관 내에서의 하수와 미생물의 반응에 대한 실험은 이미 매설된 하수관에 적용할 경우 실험조건의 변화가 제한적이며 실험시간에도 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 하수관 내에서의 하수와 미생물의 반응에 대하여 DO를 제한 조건으로 설정하였을 경우, 실험실 내에서 실험반응조를 통해 재현하는 방법에 대하여 연구하였다. 하수관 내에서의 DO 농도는 기상 중의 산소가 하수 내로 이동하는 재포기현상에 의해 조절된다. 이러한 현상을 이용하여 임의로 실험반응조에서 하수관 내의 유하조건을 조절하고 재포기현상을 재현하여 유하조건과 재포기계수와 상관관계를 얻을 수 있으며, 교반강도(속도경사)에 따른 재포기계수와 하수관에서의 유하조건에 따른 재포기계수의 상관관계를 통해 동일한 재포기계수 값을 갖는 교반강도와 유하조건을 설정할 수 있다. 이러한 결과를 통해 재포기계수를 제한인자로 설정하여 실험을 실시할 경우 하수관에서의 상황을 실험반응조를 통해 재현할 수가 있었다.

주요어 : 하수관거, 실험반응조, 재포기계수, 속도경사

1. 서 론

환경오염에 대한 사회적 관심과 생활의 질적 향상에 따른 토양과 지하수 오염의 심각성이 높아져 이에 대한 관심을 기울이고 있으나, 아직까지 국내에서는 급속한 산업화와 도시화로 인한 토양과 지하수의 적절한 관리를 소홀히 하여 환경 파괴와 지표면 아래의 깨끗한 물 자원이 오염되고 있다. 특히 이러한 오염원 중 하수관 내에 하수가 유입된 후 하수처리장까지 하수가 유하되는 동안 하수는 하수관 내에서 미생물과 반응을 일으키게 된다. 이때 하수는 재포기되는 산소의 양과 미생물에 의해 소비되는 산소의 양에 따라 호기 상태와 혐기 상태가 된다.

미생물의 활동에 의해 산소가 소비되는데 이러한 미생물의 활동은 온도, 유기물, pH, 영양염류 등에 영향을 받는다.

그러나 산소의 재포기는 미생물의 영향이 아니라 하수관에서의 수리조건에 의해 결정된다. 압송관과 같은 압력식 하수관이나 만관으로 흐르는 하수관이 아닌 이상, 일반적인 하수관은 하수층과 공기층이 존재하는 개거 흐름이다.

재포기 현상은 공기층의 산소가 액체인 물로 전달되는 현상으로 기체전달 현상이다. 기체전달이론은 대표적으로 이중격막이론과 표면재생모델로 나뉘어 설명된다. 이러한 이론에 산소를 적용하여 재포기 현상을 나타낼 수 있는데, 하수관에서의 재포기에 대하여 관거흐름에서 재포기계수를 계산하는 공식은 이전의 여러 연구(Huisman et al., 2004; Jensen, 1995; Parkhurst & Pomeroy, 1972; Thackston & Krenkel, 1969)에서 제시되었다.

하수에 관한 연구를 진행 시, 하수처리분야에서는 실험실 내에서 실험반응조를 이용하여 하수처리현상을 재현하

1) Construction Environment Research Division, Korea Institute of Construction Technology

2) Samchully Environment & Biotech Technology Institute

† Department of Civil Engineering, Kimpo College (Corresponding Author : sanjuk@kimpo.ac.kr)

고 기초실험을 실시한다. 그러나 하수관 내에서의 하수와 미생물 반응에 대한 부분은 실험실 내에서 재현이 어렵고 설령 재현을 하더라도 많은 공간을 필요로 한다. 이러한 이유로 실제 하수관을 대상으로 실험이 진행되는 경우가 대부분이다. 실제 하수관을 대상으로 할 경우 이미 매설된 하수관에서 실험을 진행하여야 하므로 실험조건의 변화가 제한적이며 적용시간이 길어짐에 따라 실험이 진행되는 하수관로의 연장 또한 길어지게 된다는 문제점이 있다.

따라서 본 연구에서는 하수관 내에서의 하수와 미생물 반응에 대한 실험에 대하여 재포기계수를 실험의 제한조건으로 설정하였을 경우 실험반응조를 통하여 하수관 내의 상황을 재현하는 가능성에 대하여 평가하였다. 실험반응조에서 하수관 내의 유하조건을 재현하기 위해 교반기를 이용하였다.

2. 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구를 수행하기 위해 제작한 실험반응조로 직경 200 mm, 높이 250 mm인 아크릴 반응조이며 덮개가 있고 측면에 밸브가 있다. 실험 시에는 수심을 80 mm로 유지하였다.

수심비는 동일하게 하고 반응조 내의 교반속도만을 변화시켜 실험을 하기 때문에 실험의 제한조건인 교반속도를 임의로 조절할 수 있는 교반기를 설치하였다. 교반날개의 형상은 직사각형이고 가로 60 mm, 세로 15 mm이다. 재포기계수 값을 계산하는데 DO 농도가 필요하기 때문에 DO 미터(YSI 5000)를 설치하였다. 그리고 재포기계수 값이 온도에 따라 달라지기 때문에 보정을 위하여 온도계를 설치하였다.

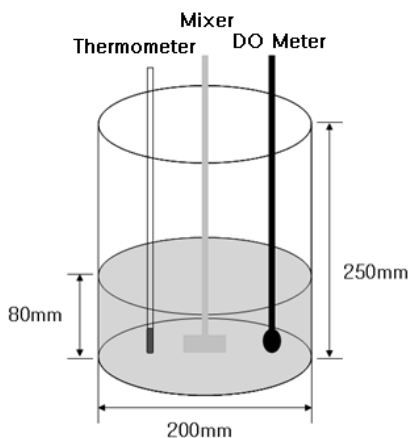


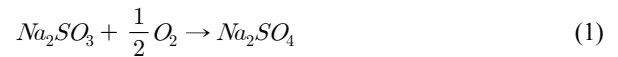
Fig. 1. Schematic diagram of the reaeration reactor

2.2 실험반응조에서의 재포기계수 측정

본 실험은 교반속도에 따른 재포기계수를 측정하기 위한 실험으로 증류수를 사용하였으며 교반속도를 50, 100, 150, 200, 250, 300 rpm으로 설정하여 교반속도별로 시간 경과에 따라 DO 농도의 변화량을 측정하고 그 결과값을 이용하여 교반속도별 재포기계수 값을 측정하였다.

시간 경과에 따라 DO 농도의 변화량을 측정하여 재포기계수 값을 측정하기 위해서는 초기 DO 농도를 0.5 mg/L 이하로 낮춰야 하는 과정이 필요하며 시료의 DO를 낮추는 방법에는 질소가스를 주입하는 방법과 아황산소다(Na₂SO₃)를 이용하는 방법이 있다.

아황산소다를 이용할 경우 염화코발트(CoCl₂)를 촉매로 써 사용하여야 하며 Eq. (1)은 아황산소다를 이용할 경우 DO 농도가 낮춰지는 원리를 나타내는 반응식이다(ASCE, 1992).



반응식에 나온 것과 같이 DO 농도 1 mg/L를 저하시키는데 7.9 mg/L의 아황산소다가 필요하며 염화코발트는 반응을 촉진시키기 위해 1.5 mg/L 정도가 되게 주입하여야 한다.

아황산소다를 이용하는 방법은 실제 하수나 합성 하수를 이용하여 실험을 진행 시에 아황산소다와 염화코발트가 미생물과 합성 하수의 성장에 영향을 미칠 수 있기 때문에 본 연구에서는 질소가스를 주입하는 방법을 사용하여 DO 농도를 낮추었다.

DO 농도를 낮춘 시료를 반응조에 넣은 후 실험 초기 온도와 DO 농도를 측정하고 시간 경과에 따라 10분 단위로 온도와 DO 농도를 측정하였으며 측정결과를 이용하여 교반속도별 재포기계수 값을 계산하였다.

2.3 교반속도의 교반강도로의 변환

실험반응조에서 교반속도의 재포기계수에 대한 영향은 교반날개의 형상에 의해 달라질 수 있기 때문에 교반날개의 형상과 교반속도를 모두 고려하는 교반강도로 제한조건을 표현하였다.

속도경사(Velocity Gradient) G는 교반강도를 나타내는데 사용되는 것으로 Camp & Stein은 Eq. (2)를 제시하였다(Metcalf & eddy, 2003).

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad (2)$$

여기서 G = 속도경사(S^{-1})
 P = 교반기 동력($kg\ m\ s^{-1}$)
 μ = 유체의 점성계수($kg\ s\ m^{-2}$)
 V = 유체체적(m^3)

$$\rho = 9.998395369 \times 100 + (6.798299989/100) \times T - 9.106025564/1000 \times T^2 + 1.005272999/10000 \times T^3 - 1.126713526 \times 10^{-6} \times T^4 + 6.591765606 \times 10^{-9} \times T^5 \quad (5)$$

동력 P 는 Eq. (3)을 이용하여 구한다.

$$P = \frac{C_D A_H \rho v^3}{2g} \quad (3)$$

여기서 C_D = 교반날개 형상계수
 A_P = 교반날개 단면적(m^2)
 ρ = 유체의 밀도($kg\ m^{-3}$)
 v = 교반날개의 상대속도($m\ s^{-1}$)
 g = 중력가속도($m\ s^{-2}$)

또한 물의 점성계수는 온도에 따라 변하게 되는데 Eq. (4)에 의해 계산할 수 있다.

$$\mu_T = \frac{\mu_0}{1 + 0.03368 T + 0.000221 T^2} \quad (4)$$

여기서 μ_T = T °C에서의 물의 점성계수($kg\ s\ m^{-2}$)
 μ_0 = 0 °C에서의 물의 점성계수($0.00179\ kg\ s\ m^{-2}$)
 T = 온도(°C)

Eq. (2)의 점성계수 단위와 Eq. (4)의 점성계수 단위는 중력가속도의 고려여부에 따라 차이가 난 것이다.

물의 온도에 따른 밀도는 PTB 공식에 따라 계산이 가능하다. Eq. (5)는 온도에 따른 물의 밀도를 계산하는 공식이다.

상기의 식들을 이용하여 실험에 사용된 교반날개와 교반 속도에 따른 교반강도를 계산하였다.

2.4 관거에서의 재포기계수

하수관에서의 재포기에 대하여 관거흐름에서 재포기계수를 계산하는 공식은 여러 연구(Huisman et al., 2004; Jensen, 1995; Parkhurst & Pomeroy, 1972; Thackston & Krenkel, 1969)에서 제시되었는데, 본 연구에서는 Parkhurst & Pomeroy (1972)에 의해 제시된 Eq. (6)을 이용하여 관거흐름에 따른 재포기계수를 계산하였다.

$$k_a = 0.96(1 + 0.17Fr)(S \times U)^{3/8} H^{-1} \quad (6)$$

여기서 Fr = Froude number
 S = 관거 경사
 U = 유속($m\ s^{-1}$)
 H = 평균수심(m)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 교반강도 산정

교반속도의 재포기계수에 대한 영향은 교반날개의 형상에 따라 달라지기 때문에 교반날개의 형성과 교반속도를 모두 고려하는 교반강도(속도경사 G : Velocity Gradient)로 제한조건을 표현하였으며, 속도경사에 관련된 계수들은 Kim(2002)의 연구를 참고하였다.

교반속도는 50, 100, 150, 200, 250, 300 rpm에 대하여 앞서 언급한 Camp & Stein식을 이용하여 계산하였고 Table 1

Table 1. Velocity gradient according to the mixing velocity

Input	Coefficient of viscosity (μ)	1.04×10 ⁻⁴ kgsm ⁻²					
	Reactor volume (V)	2 L					
	Coefficient of drag of paddle moving perpendicular to fluid (C_D)	1.9					
	Cross-sectional area of paddles (A_P)	0.0009 m ²					
	Mass density of fluid (ρ)	998.2018 kgm ⁻³					
	Mixing velocity (rpm)	50	100	150	200	250	300
	Relative velocity (ms ⁻¹)	0.1021	0.2041	0.3062	0.4082	0.5103	0.6123
Output	Velocity gradient (s ⁻¹)	21	60	109	168	235	309

에 계산결과를 나타내었다.

Fig. 2는 교반속도와 속도경사 사이의 관계를 나타낸 그래프로 교반속도가 증가함에 따라 속도경사도 증가하는 매우 정확한 상관성을 보였는데, Lee(1999)의 연구에서는 교반속도와 산소전달계수 사이의 관계에서 이와 유사한 경향

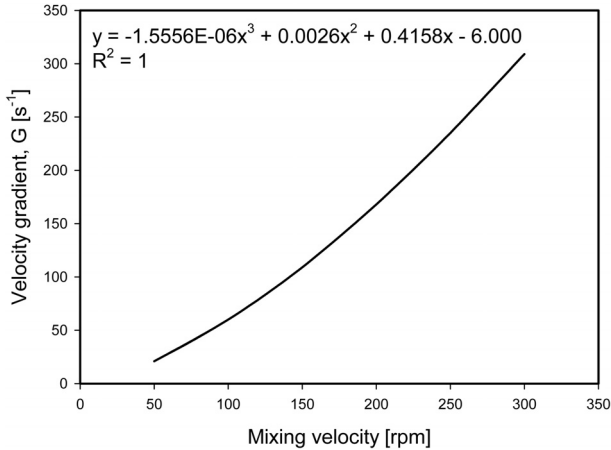


Fig. 2. Correlation between mixing velocity and velocity gradient

의 결과를 나타내었다.

3.2 실험반응조에서의 재포기계수 측정

속도경사(21, 60, 109, 168, 235, 309 s⁻¹)에 대하여 재포기계수 측정실험을 통하여 속도경사별로 재포기계수를 측정하였으며, 그 결과를 Table 2~7에 나타내었다.

Table 8은 속도경사에 따른 재포기계수 실험 결과를 종합한 것으로, 속도경사가 증가함에 따라 재포기계수 또한 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

Fig. 3은 속도경사에 따라 측정된 재포기계수 값을 이용하여 속도경사와 재포기계수와의 상관관계를 도출해 낸 그래프로 도출된 상관관계식은 Eq. (7)이며, 이 수식을 이용하여 임의의 재포기계수를 갖는 속도경사를 결정할 수 있다.

$$y = 8.6852 \times 10^{-7}x^2 + 0.0023x + 0.1799 \quad (7)$$

여기서 y = 재포기계수(hr⁻¹)

x = 속도경사(s⁻¹)

Table 2. Results of measuring the reaeration coefficient in the velocity gradient of 21 s⁻¹

Velocity gradient (s ⁻¹)	21						
Temp. (°C)	20						
Elapse time (min)	0	10	20	30	40	50	60
DO (mg/L)	0.5	0.71	0.99	1.29	1.59	1.92	2.2
Reaeration coefficient (hr ⁻¹)	0.215						

Table 3. Results of measuring the reaeration coefficient in the velocity gradient of 60 s⁻¹

Velocity gradient (s ⁻¹)	60						
Temp. (°C)	23.5						
Elapse time (min)	0	10	20	30	40	50	60
DO (mg/L)	0.5	0.92	1.39	1.87	2.24	2.62	3.03
Reaeration coefficient (hr ⁻¹)	0.339						

Table 4. Results of measuring the reaeration coefficient in the velocity gradient of 109 s⁻¹

Velocity gradient (s ⁻¹)	109						
Temp. (°C)	20						
Elapse time (min)	0	10	20	30	40	50	60
DO (mg/L)	0.5	0.97	1.52	2.07	2.60	3.10	3.57
Reaeration coefficient (hr ⁻¹)	0.429						

Table 5. Results of measuring the reaeration coefficient in the velocity gradient of 168 s⁻¹

Velocity gradient (s ⁻¹)	168						
Temp. (°C)	20						
Elapse time (min)	0	10	20	30	40	50	60
DO (mg/L)	0.5	1.3	2.05	2.74	3.36	3.92	4.42
Reaeration coefficient (hr ⁻¹)	0.590						

Table 6. Results of measuring the reaeration coefficient in the velocity gradient of 235 s⁻¹

Velocity gradient (s ⁻¹)	235						
Temp. (°C)	20						
Elapse time (min)	0	10	20	30	40	50	60
DO (mg/L)	0.5	1.42	2.27	3.20	3.92	4.56	5.12
Reaeration coefficient (hr ⁻¹)	0.745						

Table 7. Results of measuring the reaeration coefficient in the velocity gradient of 309 s⁻¹

Velocity gradient (s ⁻¹)	309						
Temp. (°C)	20						
Elapse time(min)	0	10	20	30	40	50	60
DO (mg/L)	0.5	1.67	2.78	3.76	4.60	5.31	5.95
Reaeration coefficient (hr ⁻¹)	0.966						

Table 8. Reaeration coefficient according to the velocity gradient

Velocity gradient (s ⁻¹)	21	60	109	168	235	309
Reaeration coefficient (hr ⁻¹)	0.215	0.339	0.429	0.590	0.745	0.966

Table 9. Reaeration coefficient according to the velocity of flow

Velocity of flow (ms ⁻¹)	0.13	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
Reaeration coefficient (hr ⁻¹)	0.204	0.237	0.328	0.424	0.526	0.628

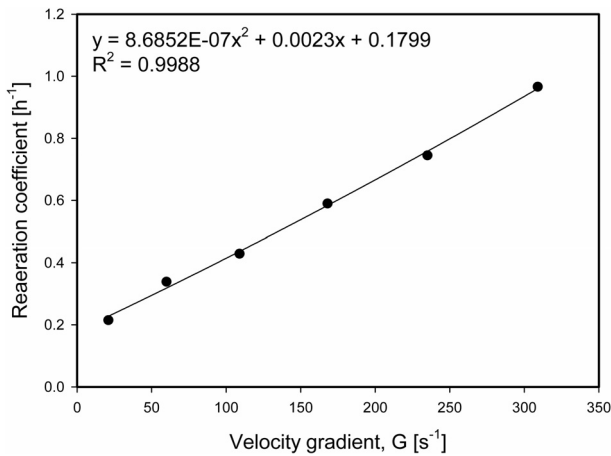


Fig. 3. Correlation between velocity gradient and reaeration coefficient

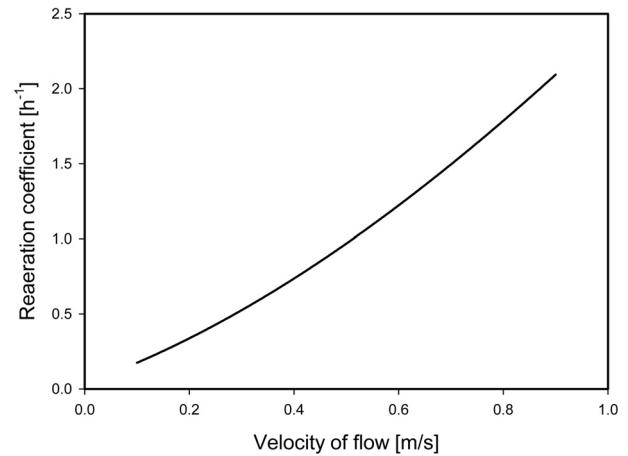


Fig. 4. Reaeration coefficient according to the velocity of flow

3.3 관거에서의 재포기계수

앞에서 언급하였듯이 본 연구에서는 Parkhurst & Pomeroy (1972)에 의해 제안된 재포기계수 공식(Eq. (6))을 이용하여 관거의 재포기계수를 계산하였다.

Fig. 4는 실험반응조에서 물이 차지하는 체적비에 맞추어 관경 300 mm의 관에서 수심비율이 35 %일 경우의 유속에 따른 재포기계수 값을 계산한 결과로 유속이 증가함에 따라 재포기계수 값이 증가함을 알 수 있었다.

Table 9는 계산결과를 이용하여 설정하고자 하는 임의의

유속(ms⁻¹) 0.13, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35에 대한 재포기계수 값을 나타낸 것이다.

3.4 속도경사와 유속의 상관관계

재포기계수 측정 실험에서의 속도경사에 따른 재포기계수와 관거에서의 유속에 따른 재포기계수 결과를 이용하여 속도경사와 유속의 상관관계를 유추할 수 있다.

Fig. 5는 실험반응조에서 속도경사에 따른 재포기계수와 관거에서의 유속에 따른 재포기계수의 상관관계를 나타내는 그래프이다.

Table 10. Velocity gradient according to the arbitrary flow velocity condition

Velocity of flow (ms ⁻¹)	0.13	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
Reaeration coefficient (hr ⁻¹)	10	26	67	111	157	203

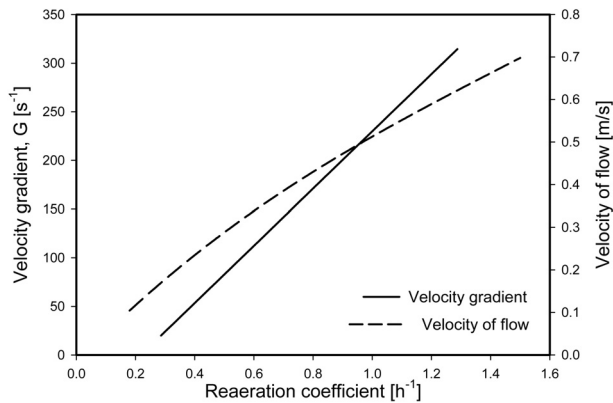


Fig. 5. Correlation between reaeration coefficient of velocity of flow and velocity gradient

이상에서와같이 관거에서의 유속에 따른 재포기계수 값과 실험반응조에서의 속도경사에 따른 재포기계수값을 이용하여, 서로 재포기계수 값이 동일한 조건을 알아낼 수 있으며, Table 10과 같이 임의의 유속조건에 따른 반응조에서의 속도경사를 결정하고 결정된 속도경사에 상응하도록 교반기의 교반속도를 조절함으로써 재포기계수에 대하여 하수관 내의 유하조건을 반응조에서 재현할 수 있었다.

4. 결 론

하수관 내에서의 하수와 미생물 반응에 대한 부분은 실험실 내에서 재현이 어렵고 설령 재현을 하더라도 많은 공간을 필요로 한다. 이러한 이유로 실제 하수관을 대상으로 실험이 진행되는 경우가 대부분이다. 따라서 본 연구에서는 하수관 내에서의 하수와 미생물 반응에 대한 실험에 대하여 재포기계수를 실험의 제한조건으로 설정하였을 경우 실험 반응조를 통하여 하수관 내의 상황을 재현하는 가능성에 대하여 평가하였다. 본 실험적 연구에서 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 실험반응조에서 교반강도(속도경사)별 재포기계수는 교반강도가 커질수록 증가하는 양상을 보였다. 이러한 결

과값을 이용하여 교반강도와 재포기계수 사이의 관계를 유추할 수 있었고 둘 사이의 일정한 상관식도 얻을 수 있었으며, 얻어진 상관식을 통하여 임의의 교반강도에 따른 재포기계수를 계산할 수 있었다.

- (2) 교반강도에 따른 재포기계수와 하수관거에서의 유하조건에 따른 재포기계수의 상관관계를 통해 동일한 재포기계수 값을 갖는 교반강도와 유하조건을 설정할 수 있다. 이러한 결과를 통해 재포기계수를 제한인자로 설정하여 실험을 실시할 경우 하수관거에서의 상황을 실험 반응조를 통해 재현할 수 있었다.
- (3) 본 연구의 결과를 기초자료로 하여 하수관거에서의 상황을 알아보기 위한 실험을 실시할 때 실제 매설된 하수관에서 실험하기 전에 실험반응조를 통하여 기초실험을 실시함으로써 시간과 경비 등 여러 측면에서 효율적 실험이 될 수 있을 것으로 기대된다.

References

1. ASCE (1992), ASCE standard- measurement of oxygen transfer in clean water, ANSI/ASCE 2-91, pp. 3~7.
2. Huisman, J. L., Weber, N. and Gujer, W. (2004), Reaeration in sewers, Water Research. Vol. 38, No. 5, pp. 1089~1100.
3. Jensen, N. A. (1995), Empirical modelling of air-to-water oxygen transfer in gravity sewers, Water Environment Research, Vol. 67. No. 6, pp. 979~991.
4. Kim, K. H. (2002), Evaluation of velocity gradient with impeller type of rapid mixer, Master's thesis, Pukyong National University, pp. 17~33 (in Korean).
5. Lee, M. S. (1999), Studies on the overall oxygen transfer rate and mixing effect in a pilot scale oxygen activated sludge system using surface aerator, Master's thesis, Yonsei University, pp. 15~20 (in Korean).
6. Metcalf & eddy, Inc. (2003), Wastewater engineering: treatment and reuse, 4th Edition, McGraw-Hill, N.Y., pp. 348~358.
7. Parkhurst, J. D. and Pomeroy, R. D. (1972), Oxygen absorption in streams, Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol. 98, No. 1, pp. 101~124.
8. Thackston, E. L. and Krenkel, P. A. (1969), Reaeration prediction in natural streams, Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol. 95, No. 1, pp. 65~94.