

## APID 공정 내 공정진단을 위한 dynamic $\bar{x}-R$ 관리도의 적용

안상우 ·곽성근\* ·정영욱 ·정무근\* ·박재우<sup>†</sup>

한양대학교 건설환경공학과  
\*태화강제산업주)

### Application of Dynamic $\bar{x}-R$ Control Chart for Advanced Phase Isolation Ditch (APID) Process

Sang-Woo An · Sung-Keun Kwak\* · Young-Wook Jung · Mu-Keun Chung\* · Jae-Woo Park<sup>†</sup>

Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University  
\*Environmental Business Division, Taiwha Lease Industrial Co., Ltd  
(Received 27 May 2009, Revised 20 July 2009, Accepted 28 July 2009)

#### Abstract

Advanced Phase Isolation Ditch (APID) process was studied to develop economic retrofitting technology, for the plants where retrofitting of common activated sludge process is required. In this study, to evaluate and monitor the effluent water quality (BOD<sub>5</sub>, SS, T-N, and T-P) and operating conditions (Influent, SVI, SRT, and HRT) as process capable and stable parameters for treating municipal wastewater, a demonstration plant was installed and operated in the existing sewage treatment plant of P city. During this study, the average effluent BOD<sub>5</sub>, SS, T-N, and T-P concentrations were 7.7, 5.6, 10.8, and 1.6 mg/L. Trend analysis of influent BOD<sub>5</sub>, SS, T-N, and T-P in APID process were illustrated that APID process need for more strong APID process management on the winter session, such as developing new intermediated aeration mode, operating methods, and managements strategy. At the application of control chart, the signal of uncommon effects at APID process was determined much higher existing control chart than conventional control chart in this study. These results indicate that conventional control chart has been collected and determined clearly signal at only stable situation. Therefore, newly developed APID process of dynamic control chart can be one of the useful tool for monitoring and management process.

**keywords** : BNR, Dynamic control chart, Nitrogen, Phosphorous, Process management

### 1. 서론

최근 강화된 수질기준으로 인하여 하·폐수처리장을 대상으로 생물학적 질소, 인 제거가 가능한 고도처리공정의 도입이 활발하게 이루어지고 있는 실정이나(김한래와 이시진, 2008), 국내에서 가동 중인 하수처리공법은 대부분 표준 활성슬러지 공법이나 그 변형들이 주종을 이루고 있다. 또한, 하수관거의 정비미흡으로 인한 불명수의 유입 등으로 하수종말처리장의 유입 BOD<sub>5</sub>가 50 mg/L 이하로 운영되고 있는 하수종말처리장이 전체의 약 30% 정도인 것으로 조사되었다(환경부, 2006). 따라서 외국에서 개발된 생물학적 질소·인 등의 영양염류를 제거하기 위한 고도처리를 적용할 경우 우리나라에서는 안정적인 영양염류의 처리가 어려운 실정임으로, 우리나라 현실을 고려하여 기존 하수처리장의 생물학적 공정을 크게 변경하지 않고 고도처리를 운영해야 할 필요성이 있다(윤영한 등, 2007a).

일반적으로 생물학적 영양염류제거(Biological Nutrient

Removal, BNR)공법에서는 유기물 산화를 비롯한 질산화, 탈질산화, 인방출 및 섭취 등을 수행하기 위하여 각 관여 미생물들의 특성에 적합한 무산소, 혐기, 호기 조건이 공간적(spatial) 또는 시간적(temporal)으로 분할되며, 내부순환포함 다단 완전혼합형 BNR공정의 경우 대부분 공간적 분할 방식을 채택하고 있다(한국환경기술진흥원, 2002). 질소 제거과정은 질산화(nitrification)와 탈질(denitrification), 인 제거 과정은 인방출(release)과 인섭취(luxury uptake)과정을 거치면서 제거된다. 그러나 유입 유기물의 효율적인 이용이 요구되는 내부순환포함 다단 완전혼합형 BNR공법을 국내 하수원수와 같은 저농도 하수에 적용할 경우, 무산소 조건에서의 탈질 및 혐기 조건에서의 인 방출이 미비하여 전체 시스템의 질소·인 제거효율이 만족스럽지 않은 경향이 있으며, 특히 강우가 하절기에 집중되는 우리나라의 기후적 특성은 단기적 수리학적 충격부하에 의한 공정 안정성에 큰 영향을 미치게 된다(안상우 등, 2008). 그러므로 하수처리장의 공정 안정성을 유지하기 위하여 하수처리장에서는 유입수질, 성상 및 유량, 기대되는 처리수질 등에 따라 각 처리장에 맞는 처리공법과 운전조건으로 운영되고 있으며 미생물상을 정확하게 나타내는 변수가 불확실하여 처리수

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
jaewoopark@hanyang.ac.kr

의 BOD<sub>5</sub>와 같은 이화학적 분석결과를 바탕으로 경험에 의존하여 운영하는 경우가 많다(이찬형과 문경숙, 2005).

최근 하수처리장의 안정적이고 경제적인 운영을 위한 Instrumentation, Control and Automation(ICA)기술들은 빠르게 발전해왔으며(Kim, 2006), ICA 기술의 발전과 함께 효과적인 공정진단과 제어를 위한 하나의 수단으로 하수처리공정에 품질관리 공정에서 많이 쓰이는 통계적 공정관리 기법인 관리도(Control Chart)를 적용하여 연구하고 있다(Dixon et al., 2007; Rieger et al., 2005). 관리도는 1924년 미국 Bell연구소의 W.A. Shwhart에 의해 최초로 제안되었으며, 이후 많은 연구와 발전을 거듭하여 오늘날에는 제조공정에서 품질관리를 위한 중요한 도구로서 사용되고 있다. 관리도는 생산 공정을 통계적으로 관리하는데 널리 사용되어 왔으며, 또한 공정모수들을 추정하고 공정능력을 분석하는데 효과적인 장치라고 할 수 있다. 또한 공정능력(process capability)이란 관리도(control chart)와 더불어 제조공정에서 통계학적 품질 관리를 위한 중요한 도구로서, 공정이 제품을 생산하는데 있어서 원하는 특성을 설계된 대로 생산하는 능력을 뜻하며(고승곤 등, 2001; 유미정과 박창순, 2004; 윤영환 등, 2007b), 통계적 공정관리의 기법 가운데 가장 보편적이며, 계산이 용이하고 현장에서 사용하기 간편하다는 장점으로 인해 공정의 진단 및 평가의 척도로서 과거에서부터 널리 이용되고 있는 도구이다(안상우 등, 2008; An et al., 2007).

따라서 본 연구에서는 경기도 P시 하수처리장 내 일일 하수처리용량 10,000 m<sup>3</sup>/일 규모의 Advanced Phase Isolation Ditch(APID)공법의 실증시설 시공 이후, APID공법anced 관리도의 적용과 APID공법의 하수 고도처리 공정상태의 진단 및 관리도의 현장 적용성을 평가하고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1. APID공법 실증시설

P시 하수처리장 내 생물반응조(40,000 m<sup>3</sup>/일)의 총 8지중 2지(10,000 m<sup>3</sup>/일)를 대상으로 APID 실증시설을 시공하였다(Fig. 1). 최초 침전지에서 생물반응조로 유입되던 기존



(a) Bioreactor



(b) Inflow and RAS line

Fig. 1. Demonstration of APID process in P-WWTP. (a) Bioreactor, (b) Inflow and RAS line

유입라인을 선택적 유로변경 및 간헐포기를 위한 유입배관을 신설하였으며, 생물반응조의 상태에 따른 실시간 제어를 위한 수질상태를 실시간으로 확인할 수 있는 실시간 수질계측기(DO, ORP, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, PO<sub>4</sub><sup>3+</sup>-P, MLSS)를 생물반응조 수면으로부터 70 cm 깊이에 설치하였으며, APID공법의 자동제어에 의한 선택적 유로변경 및 간헐포기의 공정흐름도는 Fig. 2와 같다. APID공법은 교대 간헐포기공법의 변법으로써 유입위치변경(dynamic flow)을 이용하여 탈질 시 필요한 탄소원을 적절하게 생물반응조에 주입하는 공정으로 기존 및 변형 선택적 유로변경 및 간헐포기공정의 A, B, C, D 4개 기본모드로 구성되었으며 각 모드는 30분 간격으로 운영되었다. 또한, 실시간 계측기에서 관측되는 생물반응조의 수질상태에 따라서 각 모드는 실시간 제어시스템을 통하여 생물반응조의 선택적 간헐포기 및 유입위치 변경이 가능하도록 programing하였다.

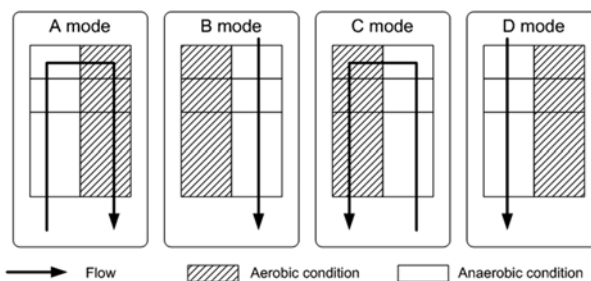


Fig. 2. Schematic flow diagram of intermittent aeration in APID process.

### 2.2. 측정항목 및 분석방법

본 연구에서 행한 수질측정법 및 항목은 다음과 같다. APID공법 실증화시설의 생물반응조 유입수 및 최종 침전조 유출수는 1일 1회 채취하였으며, 분석항목은 BOD<sub>5</sub>, SS, T-N 그리고 T-P였다. 시료분석 시 분석항목은 이온성물질인 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, PO<sub>4</sub><sup>3+</sup>-P를 분석하였으며, 0.45 um membrane filter(D= 47 mm)로 여과하여 측정하였으며, 모든 수질분석항목은 Standard Methods(APHA et al., 1985)에 준하였다.

2.3. APID공법 성능평가 분석방법

APID공법에 적용하기 위하여 dynamic 개량형 관리도 (dynamic  $\bar{x}$ -R 관리도)의 적용성 평가를 통하여 APID공법의 성능 평가를 실시하였다. 공정은 공정이 잘 설계되어 관리되고 있어도 공정 산포가 존재하기 마련이며 이러한 공정 내 산포는 안정적인 품질(방류수질)을 위해서는 공정에 이상이 발생하였을 경우 이를 신속하게 탐지하여 수정 조치를 취하여야 한다. 일반적으로 일정한 조건으로 공정을 운영하더라도 얻어지는 품질의 특성치는 어떤 값을 중심으로 산포하고 있으며, 품질의 변동원인은 우연원인(chance cause)과 이상원인(assignable cause)에 기인한다. 우연의 원인은 공정이 엄격하게 관리된 상태 하에서도 발생하는 어느 정도의 불가피한 변동으로 공정운영자의 숙련도의 차이, 작업환경의 차이 등이며, 이상원인이란 공정운영자의 부주의, 설비상의 이상 등 산발적으로 발생하여 품질의 변동을 일으키는 원인들을 뜻한다.

본 연구에서는 APID 공정의 산포를 측정하는 방법으로 관리도(control chart)를 사용하여 공정 내 관리 상태를 확인하였다. 관리도란 통계적 품질관리에서 어떤 값(공정 평균)을 중심으로 변동을 고려한 관리한계선을 작성하여 관리한계선을 벗어나면 이상원인에 의한 변동으로 간주하여 그 원인을 찾고 조치를 취할 수 있도록 도와주는 도구이다. 본 연구에서 성능평가를 위한 가정으로 APID 공법의 실증화시설의 생물반응조 유입수와 최종 방류수의 BOD<sub>5</sub>, SS, T-N, T-P의 이화학적 수질지표와 운영인자인 유입유량, SRT, HRT, SVI, F/M비를 개량형 품질특성으로 가정한 후 관리도를 작성하여 분석하였으며, 정규성 검토를 위하여 유의성(P-value)을 살펴보았다. 개량형 관리도란 어느 공정 내 연속적으로 변하는 수치를 갖는 데이터의 평균( $\bar{x}$ ) 및 산포(R)를 측정함으로써, 처리공정 유출수 수질의 정규성을 통한 대상 공정의 안정성을 평가하는 방법이다(Table 1).

일반적으로 개량형 관리도( $\bar{x}$ -R 관리도)의 경우 R 관리도의 공정의 산포를 반영하여 공정 상태를 파악하는데 사용된다.  $\bar{x}$ -R 관리도의 경우 모든 조건이 동일하게 유지되고 있는 공정에서만 관리상태를 파악할 수 있는 것으로 알려져 있다. 하지만 하수처리장과 같은 환경기초시설의 경우

모든 조건을 동일하게 유지할 수 없기 때문에 기존의  $\bar{x}$ -R 관리도로서 공정상태를 진단하는 것은 한계를 갖는다. 따라서 본 연구에서는  $\bar{x}$ -R 관리도의 단점을 최소화하기 위하여 공정 조건변화를 반영한 dynamic  $\bar{x}$ -R 관리도를 APID 공정에 적용하였다. Dynamic  $\bar{x}$ -R 관리도는 공정의 부분군의 공정평균( $\bar{x}$ )과 범위(R)를 공정 및 부분군의 변화에 따라 3σ 관리한계선을 작성하며, 작성된 관리한계선은 다음 측정값의 변화를 dynamic  $\bar{x}$ -R 관리도에 반영하여 새로운 3σ 관리한계선을 작성할 수 있도록 하였다. 각 그룹별 관리 한계선이 불연속적인  $\bar{x}$ -R 관리도에 비해 dynamic  $\bar{x}$ -R 관리도에서는 각 그룹별 관리 한계선이 이전이 그룹의 변수값을 연계하여 산정되기 때문에 보다 유기적으로 관리 한계선을 작성할 수 있다. 또한,  $\bar{x}$ -R 관리도에 비해 보다 능동적으로 공정의 이상 신호를 검출할 수 있다. 본 연구에서는 사용된 dynamic  $\bar{x}$ -R 관리도는 부분군(3일)을 기준으로 subgroup(Sk)에 대한 측정값을 { $x_k, x_{k+1}, \dots, x_{k+n-1}$ }로 변형하였으며, Table 2와 같은 방법으로 부분군의 평균과 범위(R)를 계산하였다.

공정의 품질특성치  $x_j$ 가  $N(\mu, \sigma^2)$ 의 분포를 따른다고 가정할 때 공정의 측정값( $x_k, x_{k+1}, \dots, x_{k+n-1}$ )의 평균  $\bar{x}$ 의 분포는 식 (1)과 같다. 대부분의 경우 공정평균  $\mu$ 와 공정산포  $\sigma$ 를 모르기 때문에 식 (2)를 이용하여  $\mu$ 와  $\sigma$ 의 추정치를 이용하여  $\bar{x}$ 의 중심선인  $\mu$ 와 3σ 관리한계선인 Upper Control Limits(UCL)과 Lower Control Limits(LCL)을 설정하였으며,  $\bar{x}$  관리도의 중심선과 관리한계선은 식 (3)과 같다.

$$\bar{x} \sim N\left(\mu, \frac{\sigma^2}{n}\right) \tag{1}$$

$$\hat{\mu} = \bar{\bar{x}}, \quad \hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2(n)} \tag{2}$$

$$UCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} + 3 \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} = \bar{\bar{x}} + 3 \frac{\bar{R}}{\sqrt{n}d_2(n)} \tag{3}$$

Table 1. Measure value, mean, and range at conventional control chart

| Subgroups (S) | Value (mg/L)                    | Mean (mg/L)                                | Range (mg/L)                   |
|---------------|---------------------------------|--|--------------------------------|
| 1             | $x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}$ | $\bar{x}_1 = \sum_{j=1}^n x_{1j}/n$        | $R_1 = x_{1,max} - x_{1,min}$  |
| 2             | $x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n}$ | $\bar{x}_2 = \sum_{j=2}^n x_{2j}/n$        | $R_2 = x_{2,max} - x_{2,min}$  |
| ⋮             | ⋮                               | ⋮  | ⋮                              |
| ⋮             | ⋮                               | ⋮  | ⋮                              |
| ⋮             | ⋮                               | ⋮  | ⋮                              |
| k             | $x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kn}$ | $\bar{x}_k = \sum_{j=1}^n x_{kj}/n$        | $R_k = x_{k,max} - x_{k,min}$  |
|               |                                 | $\bar{\bar{x}} = \sum_{i=1}^k \bar{x}_i/k$ | $\bar{R} = \sum_{i=1}^k R_i/k$ |

**Table 2.** Measure value, mean, and range at dynamic control chart

| Subgroups (Sk) | Value (mg/L)                     | Mean (mg/L)                            | Range (mg/L)                   |
|----------------|----------------------------------|--|--------------------------------|
| 1              | $x_1, x_2, \dots, x_n$           | $\bar{x}_1 = \sum_{j=1}^n x_j/n$       | $R_1 = x_{1,max} - x_{1,min}$  |
| 2              | $x_2, x_3, \dots, x_{n+1}$       | $\bar{x}_2 = \sum_{j=2}^{n+1} x_j/n$   | $R_2 = x_{2,max} - x_{2,min}$  |
| ⋮              | ⋮                                | ⋮                                      | ⋮                              |
| ⋮              | ⋮                                | ⋮                                      | ⋮                              |
| ⋮              | ⋮                                | ⋮                                      | ⋮                              |
| k              | $x_k, x_{k+1}, \dots, x_{k+n-1}$ | $\bar{x}_k = \sum_{j=k}^{k+n-1} x_j/n$ | $R_k = x_{k,max} - x_{k,min}$  |
|                |                                  | $\bar{x} = \sum_{i=1}^k \bar{x}_i/k$   | $\bar{R} = \sum_{i=1}^k R_i/k$ |

$$CL_{\bar{x}} = \bar{x}$$

$$LCL_{\bar{x}} = \bar{x} - 3 \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} = \bar{x} - 3 \frac{\bar{R}}{\sqrt{n}d_2(n)}$$

또한, 공정평균과 공정산포가 존재하므로 공정평균과 공정산포를 관리하기 위하여 공정산포관리도인 R 관리도를 이용하여 공정 내 발생하는 이상원인의 탐지 및 공정 수준과 공정변동도 추적하였다. R 관리도를 작성하기 위해 식 (4)를 이용하여 측정 데이터가 정규모집단에서의 표본일 때 범위  $R_{ij}$ 의 기대값과 표준편차를 계산하였다. 또한,  $\bar{x}$  관리도와 같이  $\hat{\sigma} = \bar{R}/d_2(n)$ 로  $\sigma$ 를 추정하여 식 (5)와 같이 UCLR과 LCLR을 작성하였다. 식 (2), (3), (4), (5)에서 사용한  $d_2, d_3, d_4$ 는 n에 의존하는 상수로써 부분군 크기 n=3일 때  $d_2, d_3, d_4$ 는 관리도계수표에 의해 1.6930, 0.8884, 1.5880의 값을 사용하여 계산하였다(이승훈, 2007).

$$\mu_R = d_2(n) \cdot \sigma, \sigma_R = d_3(n) \cdot \sigma \tag{4}$$

$$UCLR = [d_2(n) + 3d_3(n)]\hat{\sigma} = (1 + 3 \frac{d_3(n)}{d_2(n)})\bar{R}$$

$$CL_R = d_2(n)\hat{\sigma} = \bar{R} \tag{5}$$

$$LCLR = [d_2(n) - 3d_3(n)]\hat{\sigma} = (1 - 3 \frac{d_3(n)}{d_2(n)})\bar{R}$$

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. APID공법의 하수 고도처리효율

본 연구대상지역인 P시 하수처리장 유입수의 C/N(BOD<sub>5</sub>/T-N)비율이 3.3 정도로 안정적인 질소제거를 위한 C/N비율인 5 이상(동영탁 등, 2007)과 C/N(BOD<sub>5</sub>/TKN)비율인 3.5 이상(Grady et al., 1999)보다 낮은 P시 하수처리장의 경우 질소제거에 있어서 유기물이 부족한 것으로 나타났다(Table 3). 기존 BNR 공법의 경우 탈질 시 반드시 필요한 유기물이 호기조건에서 파괴되어 탈질 시에 이를 이용할 수 없기 때문에 본 연구에서 진행된 APID공법은 외부 탄소원의 투입 없이 비포기(무산소조건) 구간에 유입수 및 반송슬러지를 생물반응조 전단에 유입시켰다. 또한 포기 구간의 경우 유입 및 유출, 반송슬러지의 유입이 되지 않도록 하였으며 생물반응조 2지를 30분 주기로 교대 간헐포기를 실시하였다.

2008년 1월 1일부터 2008년 12월 31일까지 최종침전지 유출수의 산술평균은 BOD<sub>5</sub>, SS, T-N, T-P의 7.7, 5.6, 10.8, 1.6 mg/L로 강화되는 법적방류수질을 만족하였다. 또한 유입수질과 유출수질의 변동계수를 비교한 결과, 유입수의 BOD<sub>5</sub>, SS, T-N, T-P의 변동계수인 25.8, 32.7, 17.1, 18.3에 비하여 유출수의 BOD<sub>5</sub>, SS, T-N, T-P의 변동계수는 15.6, 38.4, 35.8, 24.1로 조사되었다. APID 공정운영 중 유기물질(BOD<sub>5</sub>와 SS)의 제거는 유입수질의 변동에 따라 유출수질의 변동(유기물질 처리능력)은 안정적인 것으로 조사되었으나 영양염류(T-N과 T-P)의 경우 유입수질의 변동은 유기

**Table 3.** Measure influent levels, effluent levels, and coefficient of variations at this study (unit: mg/L)

| Item                  | Influent         |       |      |      | Effluent         |      |      |      |
|-----------------------|------------------|-------|------|------|------------------|------|------|------|
|                       | BOD <sub>5</sub> | SS    | T-N  | T-P  | BOD <sub>5</sub> | SS   | T-N  | T-P  |
| Mean                  | 100.6            | 92.77 | 30.0 | 4.3  | 7.7              | 5.6  | 10.8 | 1.6  |
| Maximum               | 211.0            | 210.0 | 49.0 | 6.4  | 9.8              | 9.6  | 19.5 | 1.9  |
| Minimum               | 52.5             | 42.0  | 14.0 | 2.0  | 4.2              | 2.0  | 4.0  | 0.4  |
| StDev <sup>1)</sup>   | 26.0             | 30.3  | 5.1  | 0.8  | 1.2              | 2.1  | 3.9  | 0.4  |
| Variance              | 674.6            | 921.8 | 26.5 | 0.6  | 1.5              | 4.4  | 14.9 | 0.1  |
| CoefVar <sup>2)</sup> | 25.8             | 32.7  | 17.1 | 18.3 | 15.6             | 38.4 | 35.8 | 24.1 |

<sup>1)</sup> StDev : Standard Deviation, <sup>2)</sup> CoefVar : Coefficient of Variation

물질에 비하여 안정적이지만 유출수질의 변동은 유기물질에 비하여 불안정적인 것으로 나타나 공정운영은 영양염류의 안정적 제거에 중점을 뒀어야 하는 것으로 나타났다. 따라서 APID공법의 공정운영을 이화학적 분석결과를 바탕으로 한 경험적 공정운영에서 dynamic  $\bar{x}$ -R 관리도를 사용하여 공정의 이상신호를 공정운영자에게 즉각적으로 알려줘 공정 및 환경상황에 따라 공정운영을 적절하게 변화할 수 있는 지표가 되도록 설계하였다.

3.2. 시계열분석을 통한 유입수질의 추세분석

APID공법의 현황분석을 위하여 시계열 분석을 이용하여 유입수질의 추세분석(Trend Analysis)를 실시하였다. 추세분석은 유입수질은 일반적 추세모형인 선형, 2차식, 지수형 그리고 S-자형 모형을 사용하였다. 각 모형별 정확도를 측정하기 위하여 평균 절대 백분율 오차(Mean Absolute Percentage Error, MAPE), 평균 절대 편차(Mean Absolute Devi-

ation, MAD), 그리고 평균 제곱 편차(Mean Squared Deviation, MSD)을 이용하여 APID공법의 추세모형의 적합도를 판정하였다. 추세분석 결과 유입수의 SS(지수형 추세모형)를 제외한 수질항목들은 2차식 추세모형이 적합한 것으로 분석되었다(Table 4). 운영기간 중 유입수의 수질항목별 변화추세분석 결과 T-N과 T-P의 경우 하절기 운영기간 동안 감소하였으나 동절기를 접어들면서 증가하는 것으로 나타났다. BOD<sub>5</sub>의 경우 하절기동안 증가하였으나 동절기에는 감소하는 것으로 조사되었다. 하지만 SS의 경우 전체적으로 증가하는 경향을 보여주고 있었다(Fig. 4). 따라서 운영기간이 동절기로 들어서면서 수온의 감소와 C/N비 및 C/P비의 감소로 인한 질소와 인의 생물학적 제거능이 감소함으로 보다 효율적인 공정운영이 필요한 것으로 나타났다.

3.3. Dynamic 개량형 관리도의 적용가능성

관리도를 통한 APID공법의 공정 관리상태를 파악하기

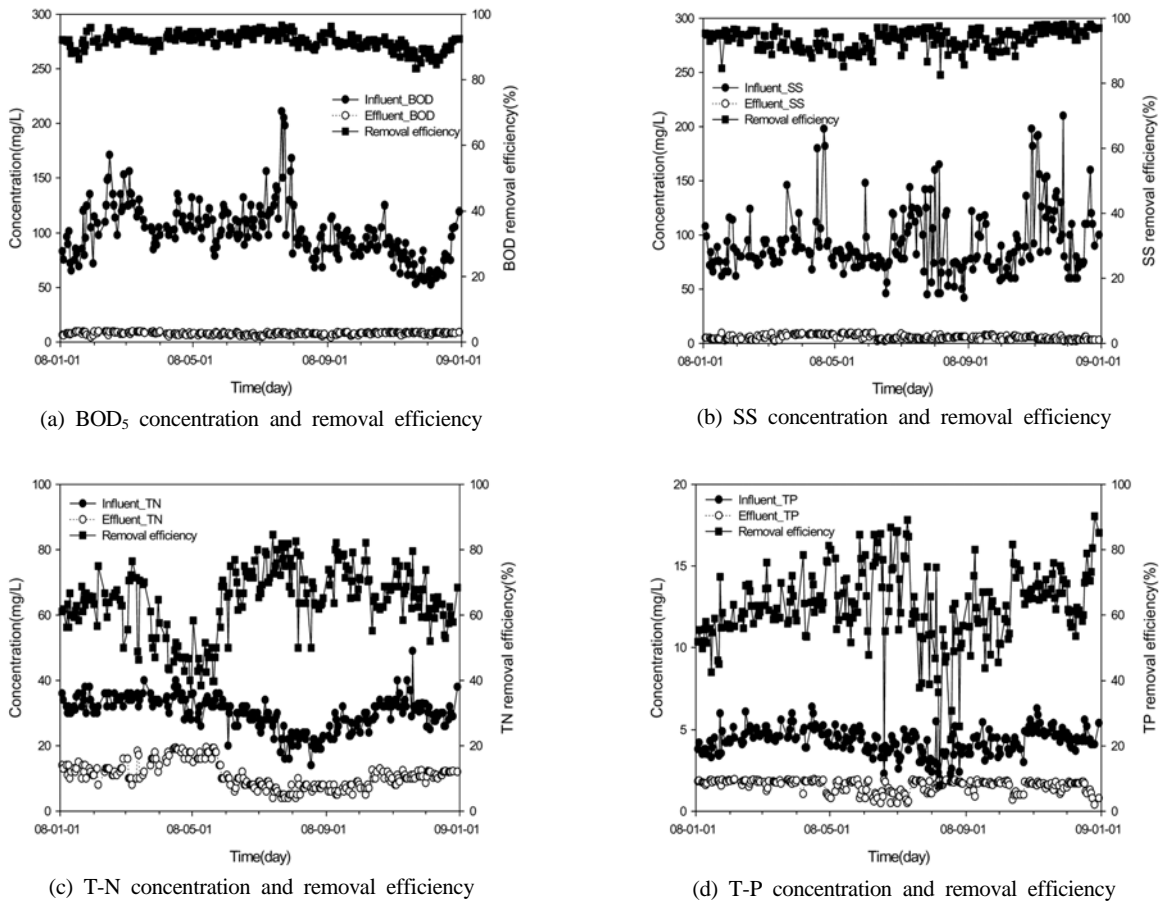


Fig. 3. Variation of concentration and removal efficiency in APID process.

Table 4. Time series analysis of influent water quality

|             | BOD <sub>5</sub>             | SS                            | T-N                          | T-P                         |
|-------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Trend model | Quadratic trend model        | Growth curve model            | Quadratic trend model        | Quadratic trend model       |
| Equation    | $Y_t=99.577+0.363t-0.002t^2$ | $Y_t=82.604 \times (1.001)^t$ | $Y_t=37.788-0.151t+0.001t^2$ | $Y_t=4.809-0.012t+0.001t^2$ |
| MAPE        | 15.639                       | 22.722                        | 12.416                       | 15.623                      |
| MAD         | 15.580                       | 21.367                        | 3.434                        | 0.616                       |
| MSD         | 465.236                      | 909.742                       | 19.022                       | 0.584                       |

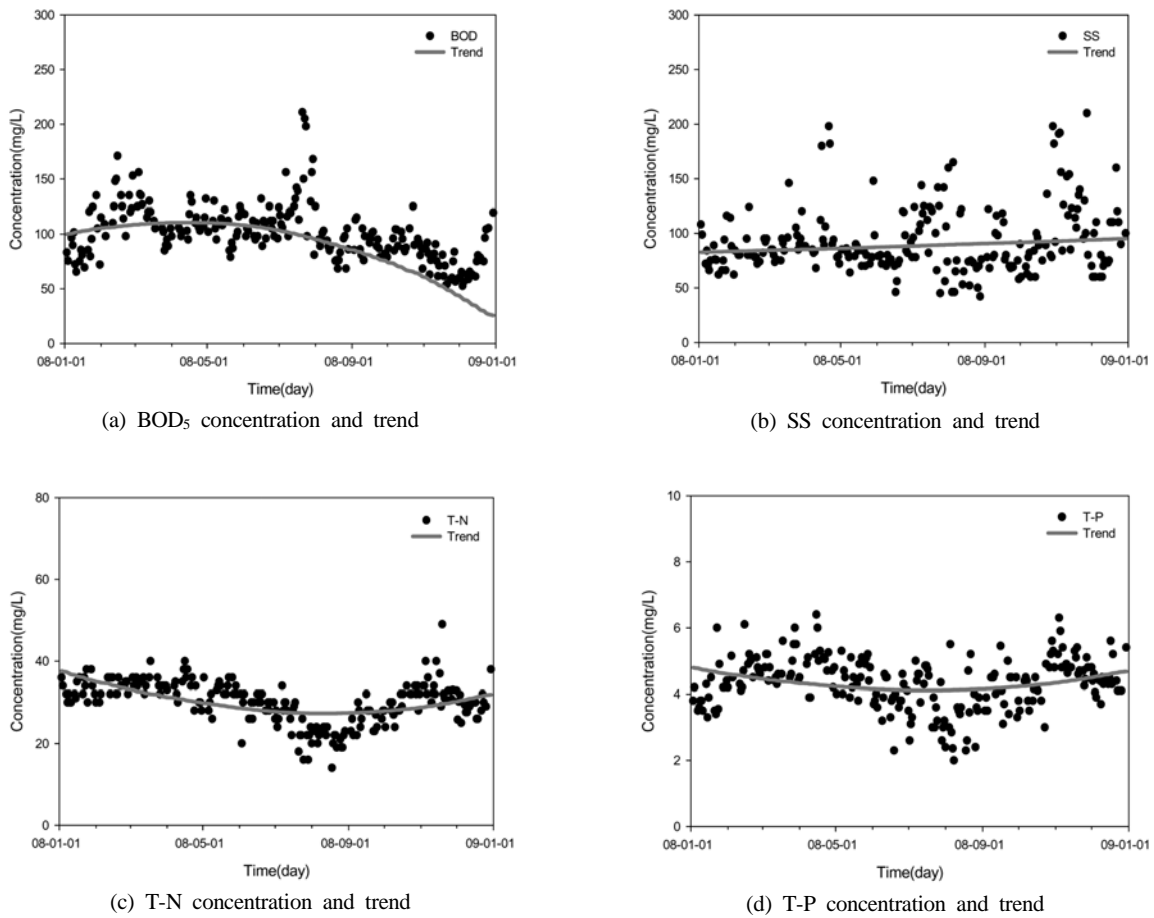


Fig. 4. Trend analysis of influent BOD<sub>5</sub>, SS, T-N, and T-P in APID process.

위하여  $\bar{x}$ -R 관리도와 dynamic  $\bar{x}$ -R 관리도를 동일한 데이터를 사용하여 상호 비교하였다.  $\bar{x}$ -R 관리도는 Table 1의 방법을 사용하여 BOD<sub>5</sub> 유출수질의 부분군의 유출 BOD<sub>5</sub> 평균( $\bar{x}$ )과 범위(R)를 공정 및 부분군의 변화에 따라 3 $\sigma$  관리한계선을 작성하였다. Fig. 5에서 보여주듯이 기존  $\bar{x}$ -R 관리도는 dynamic  $\bar{x}$ -R 관리도에 비하여 공정의 관리 상태 및 이상신호를 dynamic  $\bar{x}$ -R 관리도와 비교하였을

때 즉각적으로 표시하지 못하고 있는 것으로 나타났다. 이는 기존의 개량형 관리도는 제조공정에서 개발된 관리도로 품질의 특성치가 정규분포에 따른다고 하면 3 $\sigma$  관리한계선 밖으로 타점될 확률은 0.27%로 매우 희박하며(이승훈, 2007), 공정의 모든 조건이 동일하게 유지되고 유지할 수 있는 공정에서만 적용할 수 있는 관리도이기 때문에 하수처리공정과 같이 공정의 조건이 변화하는 경우는 공정의 이상신호 및 이상원인을 판별하기 어렵기 때문이다. 따라서

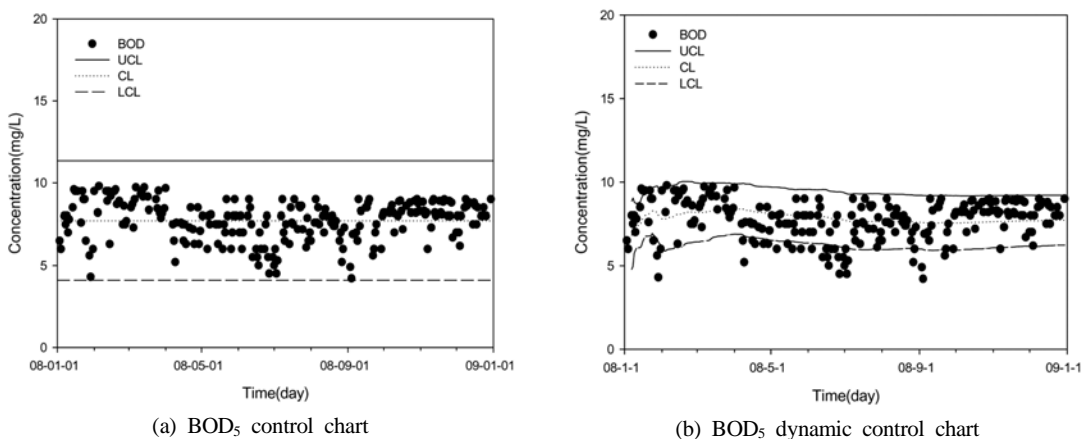


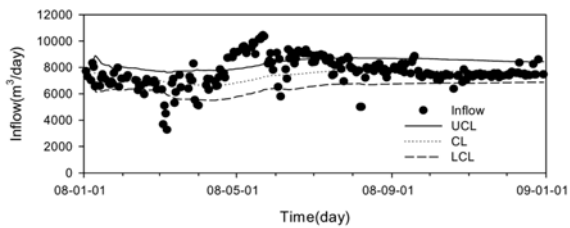
Fig. 5. Comparison effluent BOD<sub>5</sub> control chart and effluent BOD<sub>5</sub> dynamic control chart.

dynamic  $\bar{x}$ -R 관리도를 이용하여 APID공법의 공정상태를 해석하였다.

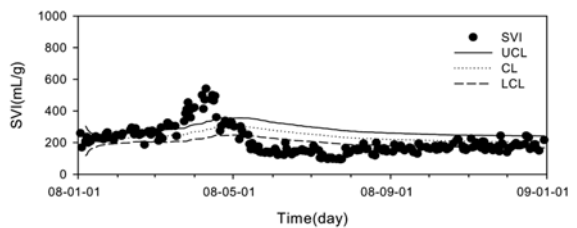
본 연구에서 적용한 dynamic  $\bar{x}$ -R 관리도는 해석용 관리도로 공정상태가 어떤지 모르는 상황에서 공정의 실태를 파악하여 어떤 원인에 의해 어떠한 산포가 발생하는지 알아 볼 목적으로 작성한 관리도이다. 해석용 관리도는 향후 관리용 관리도를 개발하기 위해 작성하는 관리도로 해석용 관리도에서 이상신호 및 원인을 판별 및 조치한 후 통계적으로 관리상태가 되면 이를 토대로 관리용 관리도를 운영하게 된다. 따라서 본 연구에선 공정운영일지를 바탕으로 해석용 관리도의 이상원인의 판별 및 조치사항들을 조사하여 공정특이점 및 dynamic  $\bar{x}$ -R 관리도의 이상신호를 상호 비교하였다.

Fig. 6은 APID공법의 공정운영인자인 유입유량(Inflow, m<sup>3</sup>/day), Sludge Volume Index(SVI, mL/g), Solid Retention Time(SRT, day), 그리고 Hydraulic Retention Time(HRT, hr)의 dynamic  $\bar{x}$ -R 관리도를 보여주고 있다. 유입유량의 경우 2008년 3월부터 4월 말까지 불안정한 상태로 생물반응조로 유입됨에 따라 SRT, HRT 그리고 SVI의 dynamic

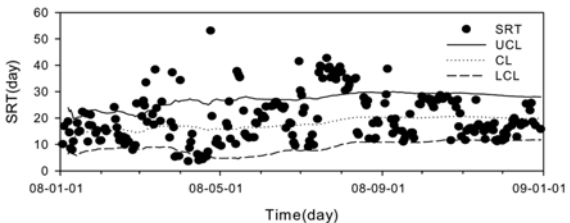
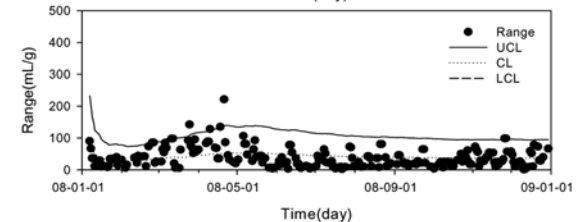
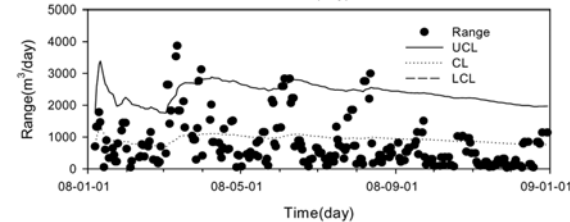
$\bar{x}$ -R 관리도도 불안정한 공정상태를 나타내고 있다. 유입유량의 dynamic  $\bar{x}$ -R 관리도에서도 2월 28일부터 3월 5일 동안 유입유량의 LCL 이하로 공정이상 신호를 표시하고 있는데 공정운영일지 분석결과 2월 28일부터 3월 5일까지 유입펌프의 기기이상으로 인하여 2개의 유입펌프 중 1개의 유입펌프만 사용하여 생물반응조로 유입한 것으로 조사되었다. 또한 관리한계선 내부에서는 2월 20일부터 27일까지 관리이상상태 증후(6개의 연속된 점이 모두 하락)가 발견되었으며, 유입유량과 밀접한 관계를 갖고 있는 HRT의 경우 유입유량의 이상증후와 dynamic  $\bar{x}$ -R 관리도의 추세가 비슷한 양상을 보여주는 것을 확인할 수 있었다. 생물반응조의 미생물의 상태와 미생물의 유기물 및 영양물질의 제거와 밀접한 관계를 갖는 인자인 SRT와 SVI의 dynamic  $\bar{x}$ -R 관리도를 살펴보면 3월 20일부터 4월 10일까지 SRT는 짧아지고 SVI는 증가하는 양상을 보여주고 있다. 공정운영일지에서 확인해본 결과, 동일 시점에서 초침 율류부하와 함께 생물반응조의 사상성 미생물이 출현한 것으로 되어 있었다. 따라서 사상성 미생물로 인한 SVI의 증가와 사상성 미생물의 제거를 위한 폐슬러지유량의 증가로 인한



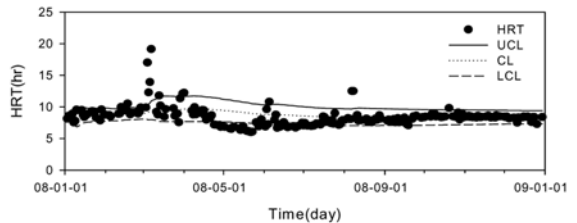
(a) Inflow dynamic control chart



(b) SVI dynamic control chart



(c) SRT dynamic control chart



(d) HRT dynamic control chart

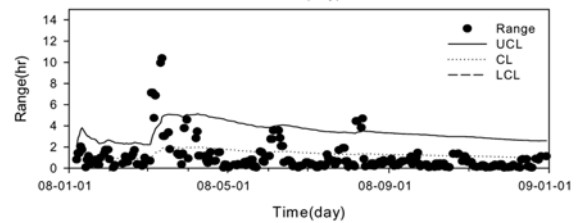
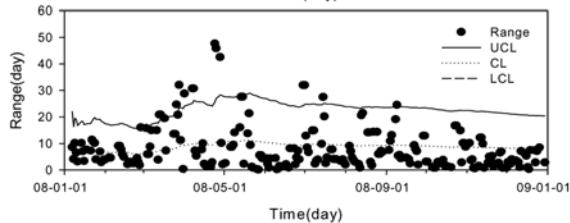


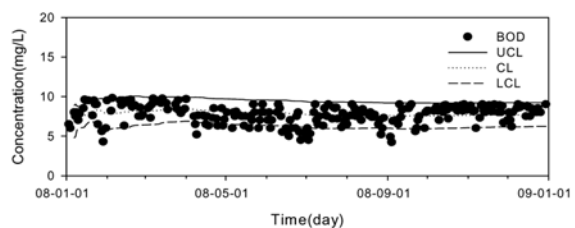
Fig. 6. Variation of operating parameters dynamic control chart at this study.

SRT의 감소로 dynamic  $\bar{x}$ -R 관리도에서 관리한계선을 벗어난 이상신호 및 관리한계선 내에서 이상증후를 감지하고 있는 것으로 나타났다.

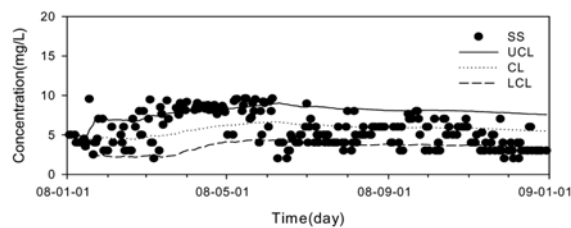
Fig. 7은 APID공법의 방류수의 BOD<sub>5</sub>, SS, T-N, 그리고 T-P의 dynamic  $\bar{x}$ -R 관리도를 보여주고 있다. 공정운영인자 dynamic  $\bar{x}$ -R 관리도의 이상신호와 상호·비교해본 결과 사상성 미생물의 출현 시점인 3월 20일부터 4월 10일까지 SRT의 감소와 SVI의 증가로 인하여 방류수의 BOD<sub>5</sub>, SS, T-N, 그리고 T-P의 증가의 방류수질의 악화를 보여주었으나 법적방류수질기준은 만족한 것으로 나타났다. 이후 생물반응조의 안정화를 위하여 생물반응조의 전면포기를 실시하였으며, P시 하수처리장의 농축슬러지를 일정량 식종과 함께 반송율을 증가시켰다. 이러한 이유로 SRT의 경우에 4월 10일 이후 관리한계선을 벗어나는 이상신호와 관리한계선 내에서의 이상징후(6개의 연속된 점이 모두 상승 및 하락)를 보여주고 있으며, 방류수질 항목 영양염류(T-N과 T-P)의 제거가 불안정하였다. 하지만 적절한 공정운영조치로 인한 생물반응조의 생물반응이 안정화와 수온상승으로 인한 생물반응의 활성화의 요인으로 인하여 방류수질은 안정적으로 방류되고 있는 것을 확인할 수 있었다.

### 4. 결론

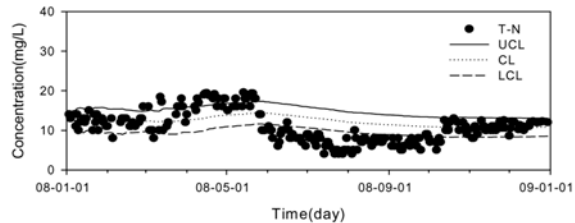
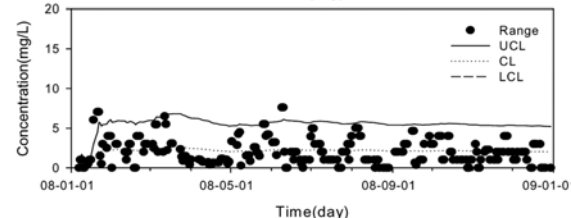
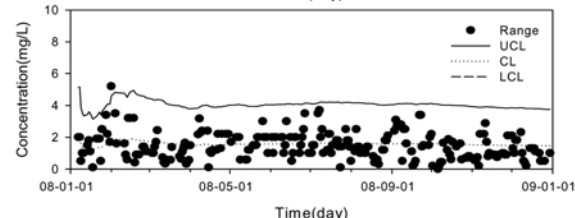
본 연구에서는 APID공법의 공정상태를 파악하기 위하여 현황분석과 더불어 기존  $\bar{x}$ -R 관리도를 하수처리공정에 적합하게 개량한 dynamic  $\bar{x}$ -R 관리도의 적용가능성을 검토하였다. APID공법의 2008년 1월 1일부터 2008년 12월 31일까지 공정운영결과 최종침전지 유출수의 산술평균은 BOD<sub>5</sub>, SS, T-N, T-P의 7.7, 5.6, 10.8, 1.6 mg/L로 강화되는 법적방류수질을 만족한 것으로 조사되었다. APID 공정운영 중 영양염류(T-N과 T-P)의 경우 유입수질의 변동은 유기물질에 비하여 안정적이지만 유출수질의 변동은 유기물질에 비하여 불안정적인 것으로 나타났으며, 시계열 분석을 통한 유입수질의 현황을 분석한 결과 동절기에 적합한 공정운영이 필요한 것으로 나타났다. 또한, APID공법의 공정운영을 보다 효율적이며 즉각적인 공정운영 전략을 수립하기 위한 방편으로 dynamic 개량형 관리도와 기존의 개량형 관리도의 공정운영결과에 적용하여 살펴본 결과, 하수처리공정과 같이 공정의 조건이 변화하는 경우는 공정의 이상신호 및 이상원인을 기존의 개량형 관리도를 적용하였을 경우 판별하기 어려운 것으로 조사되었다. 하지만 본 연구에서 적용



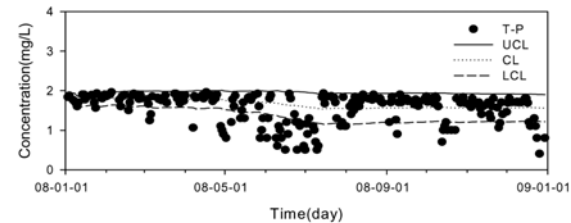
(a) BOD<sub>5</sub> dynamic control chart



(b) SS dynamic control chart



(c) T-N dynamic control chart



(d) T-P dynamic control chart

Fig. 7. Variation of effluent water quality dynamic control chart at this study.



한 dynamic 개량형 관리도의 경우 APID공법의 공정 운영 중 발생한 이상징후(초침 월류부하, 생물반응조의 사상성 미생물이 출현, 유입펌프 이상 등)를 기존 개량형 관리도에 비하여 민감하게 검출하는 것으로 조사되었다. 따라서 공정 운영인자의 dynamic  $\bar{x}$ -R 관리도와 방류수질의 dynamic  $\bar{x}$ -R 관리도를 공정운영일지와 비교하여 분석한 결과 하수처리 공정의 상태를 간접적으로 해석 및 확인하는데 사용할 수 있을 것으로 사료되며, 향후 공정운영인자와 방류수질의 상관관계 및 패턴 분석을 통하여 관리용 dynamic  $\bar{x}$ -R 관리도를 적용할 예정이다.

### 참고문헌

- 고승근, 황재문, 김응석(2001). 공정능력지수의 실무활용지침. *한국품질경영학회지*, **2**(1), pp. 23-33.
- 김한래, 이시진(2008). NADH 센서를 이용한 생물학적 동시탈질, 질산화공정에서 질소, 인 제거 영향인자 및 거동평가. *한국환경보건학회지*, **34**(5), pp. 374-381.
- 동영탁, 서동환, 배유진, 박주석(2007). 질산화균 활성화조를 이용한 하수처리 공정에서의 유기물 및 질소, 인 제거에 관한 연구. *상하수도학회지*, **21**(6), pp. 727-735.
- 안상우, 광성근, 윤영한, 정무근, 박재로, 박재우(2008). Advanced Phase Isolation Ditch 공정에 의한 하수 고도처리 성능평가. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(5), pp. 618-625.
- 유미정, 박창순(2004). 지속적으로 향상되는 공정에서 기하조정 관리한계를 사용한 X관리도. *한국품질경영학회지*, **34**(4), pp. 125-132.
- 윤영한, 박재로, 안상우(2007a). HASP 공정의 동역학적 질산화와 탈질산화 효율 연구. *대한토목학회논문집*, **27**(4B), pp. 469-474.
- 윤영한, 안상우, 박재로, 고평백, 이효범, 지재성(2007b). 선택적 간헐포기 및 유입위치변경에 따른 생물반응조 내 질소 거동 및 성능평가. *한국수처리학회지*, **15**(2), pp. 25-34.
- 이승훈(2007). *Mintab*을 이용한 공학통계 자료분석. 이레테크.
- 이찬형, 문경숙(2005). 고도하수처리장 운전조건의 통계분석. *한국환경과학회지*, **14**(2), pp. 251-258.
- 한국환경기술진흥원(2002). *환경공학기술개발연구보고*.
- 환경부(2006). 2006년 상반기 하수처리시설 지도점검결과, *환경부 생활하수과*.
- An, S. W., Park, J. W., Cho, I. H., Cang, S. W., Yoon, Y. H., and Park, J. R. (2007). Process evaluation of advanced wastewater treatment process with IMET system for statistical control. *14th International Symposium on Health-related Water Microbiology*, Japan.
- APHA, AWWA and WPCF (1985). Standard Methods for the examination of water and wastewater. 16th ed., Washington D. C., USA.
- Dixon, D., Gallop, J. R., Lamvert, S. C., Lardon, L., Healy, J. V., and Steyer, J. P. (2007). Data mining to support anaerobic WWTP monitoring. *Control Engineering Practice*, **15**, pp. 987-999.
- Grady, C. P. L., Daigger, G. T., and Lim, H. C. (1999). Biological wastewater treatment, 2nd ed., Marcel Dekker INC., New York.
- Kim, Y. J. (2006). Development of inference models and diagnosis algorithms using intelligent methods for sequencing batch reactor operation. Ph. D. thesis, Pusan National University, Korea.
- Rieger, L., Thomann, M., Gujer, W., and Siegrist, H. (2005). Quantifying the uncertainty of on-line sensors at WWTPs during field operation. *Water Research*, **39**, pp. 5162-5174.