

## BAF를 이용한 하수의 3차처리 및 by-pass된 우수의 처리

이광제 · 박재홍<sup>\*,†</sup>

한국종합기술개발공사

\*국립환경연구원 수질총량관리센터

## Tertiary Treatment of Municipal Wastewater and Bypassed Rainfall Treatment using by BAF

Kwang Je Lee · Jae-Hong Park<sup>\*,†</sup>

Korea Engineering Consultants Corporation

<sup>\*</sup>Watershed Management Research Division, National Institute of Environmental Research

(Received 12 January 2005, Accepted 16 May 2005)

### Abstract

The study was conducted with two laboratory biological aerated filter (BAF) reactors: denitrification filter (DF) and nitrification BAF. The influent flow (Q) was fixed to 48 L/d and total empty bed contact time (EBCT) was 1 hr. The flow direction was upflow with NRCY of 1 to 2Q. The secondary effluent was fed to the reactors and the influent concentrations were adjusted with some stock solutions to simulate by-pass concentration during rainfall. The study results indicate that COD and SS removal efficiencies were excellent and not influenced by temperature. Nitrification efficiency was over 90% at the influent loading less than 1.12 kg/media m<sup>3</sup>/d, but the efficiencies were decreased in low temperature. TN removal efficiencies were 10% to 60%.

**keywords** : Biological aerated filter, Bypassed rainfall, Media, Backwash

### 1. 서론

우리나라의 하수 관거는 대부분 합류식 하수 관거로 이루어져 있다.

이로 인해 강우 시에 합류식 하수 관거로 이루어진 지역의 하수처리장으로 설계유량(Q)의 3배에 해당되는 오수가 유입됨으로써 2차 처리시설의 설계유량(Q) 외 2Q는 1차 침전 후 별도의 처리없이 수계로 방류되고 있는 실정이다. 이로 인해 강우시 지표의 오염물질과 관거내의 퇴적물들이 적절히 처리되지 않고 방류되어 수계를 오염시키고 있다. 따라서 강우에 의한 오염물질을 저감시키기 위한 노력과 대책이 강구되어야 수계의 수질보전이 가능할 것으로 판단된다.

또한 처리수질 기준이 강화되어 기존의 처리시설만으로 처리수질 기준을 만족시키지 못할 경우 하수처리장의 개량 및 개선을 통해 처리수질 기준을 만족시켜야 한다. 이외에 우리나라의 기후 특징에 따른 기존 하수처리장의 동절기 질산화 저해 현상과 침전지 효율의 저하로 인한 SS 유출을 최소화하기 위한 방안도 강구되어야 한다. 이렇듯 전체적인 하수처리 효율을 안정시킬 수 있는 공정의 도입이 필요한 시점이다.

이러한 문제들을 해결하기 위한 하나의 대안으로서 BAF(Biological Aerated Filter) 공정을 고려할 수 있다. BAF 공정은 짧은 HRT로 인해 많은 유량을 처리할 수 있고(최, 2001), 고농도의 MLSS로 인해 충격부하에 강하며 media system으로 인해 높은 SS 제거 특성을 갖는다. 그리고, 동절기의 질산화 저해 현상을 최소화할 수 있는 이점(Chudoba et al., 1998; M'Coy, 1997; Rodgers, 1999; Pujol et al., 1994)도 얻을 수 있다.

BAF 공정은 일반적으로 기존의 활성슬러지 system의 대체 공정이면서, 강화된 수질 기준을 맞추기 위해 기존의 활성슬러지 system을 개선하기 위한 3차처리 공정으로 많이 사용된다. BAF는 1980년대에 유럽에서 시작되었고, 일반적으로 기존의 활성슬러지 system을 유기물 제거와 추가적인 질산화 효율을 향상시키기 위한 보다 향상된 공정으로 많이 사용되었다(Pujol et al., 1994; M'Coy, 1997; Rodgers, 1999).

따라서 본 연구는 재래식 활성슬러지 system을 개선하기 위한 3차처리공정으로서 BAF process를 적용한 기존의 연구와는 달리 앞에서 기술된 BAF process의 여러 장점들을 이용하여 평상시에는 활성슬러지 system을 보완하고 강우 시에는 by-pass된 우수를 처리하는 dual process로서 BAF의 적용에 관한 연구를 수행하고자 하였다.

<sup>\*</sup> To whom correspondence should be addressed.

jhong@korea.ac.kr

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 반응조 운전 조건

반응조(Fig. 1)는 denitrification filter(DF)와 질산화용 BAF(NBAF)로 구성되어 있으며, 2set이 각각 다른 대기 온도(15°C와 25°C 내외)에서 운전되었다. 저온에서 운전된 반응조를 R1, 상대적으로 높은 온도에서 운전된 반응조를 R2라 하였으며, 유입 유량은 48 L/d이고, 각 set당 DF와 NBAF의 media 부피는 각각 전체 반응조 부피 2 L의 45%, 70%로 맞추었다.

Empty bed contact time(EBCT)을 1시간으로, 상향흐름방식으로 운전하였으며, NBAF에서 1~2Q에 해당하는 유량을 DF로 반송하였다.

역세척 방법은 여재에 붙어있는 입자성 물질을 효율적으로 탈리시키는 "Collapse-pulsing" 현상(Hewitt et al., 1984)을 이용하였으며, 역세척 수의 수량은 전체 반응조 유량의 5~10%(2.4~4.8 L)를 처리수로 이용하였다.

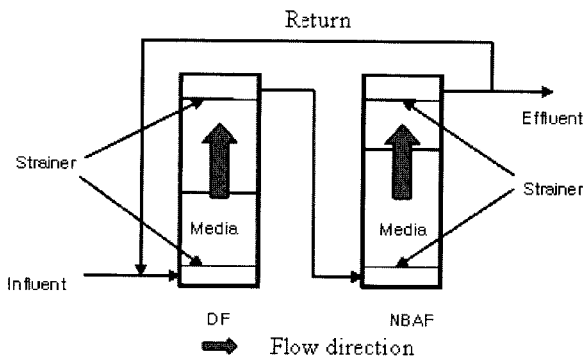


Fig. 1. Schematic diagram of the reactor.

사용된 media(Fig. 2)는 expanded clay 로서 저렴한 점토 질로 1,200°C 정도에서 소성시켜 팽창시킨 저비중의 소결 입자 형태로 Grain Size 2~6 mm, Density 1.3~1.4 g/cm<sup>3</sup>, Porosity 0.05~0.10, Pore Size 2.5~3 μm, 비표면적 1,000~4,000, Attrition 1~2%, Friability <5%, Acid Solubility 0.5~1%, 강도 >2.7의 물성을 지닌다.



### 2.2. 원수성상

실험에 사용한 원수(Table 1)는 Y 하수처리장의 2차처리

Table 1. Characterization of the influent

| Item                                  | Conc.         |
|---------------------------------------|---------------|
| T/SCODcr(mg/L)                        | 30~420/15~180 |
| NH <sub>4</sub> N(mg/L)               | 15~65         |
| NO <sub>3</sub> N(mg/L)               | 0~15          |
| pH                                    | 7~8.2         |
| T/SP(mg/L)                            | 1~9/0.3~8     |
| SS(mg/L)                              | 30~680        |
| TN(mg/L)                              | 21~94         |
| Alkalinity<br>(as CaCO <sub>3</sub> ) | 200~400       |

Table 2. Average influent concentration during rainfall

| Item              | Avg. Conc.(mg/L) |
|-------------------|------------------|
| SS                | 360(200~680)     |
| TCOD              | 280(200~420)     |
| SCOD              | 105(60~180)      |
| NH <sub>4</sub> N | 24(15~33)        |

를 거친 침전지 유출수를 사용했고, 강우시의 by-pass 흐름과 유사한 성상을 만들기 위해 필요시는 stock solution(COD, NH<sub>4</sub>N, alkalinity)용을 주입하여 농도를 증가시켜 이용하였다.

강우에 따른 평균 유입 농도는 J 하수처리장의 2001년, 2002년 자료를 기준으로 추정하여 Table 2에 제시한 농도로 운전하였다.

실제 처리장에서 by-pass 유량은 강우량에 따라 변화되지만 본 실험에서는 유량을 48 L/d로 고정시키고 농도를 변화시키며 실험하였다.

### 2.3. 분석 방법

모든 항목은 Standard Methods(APHA, 1998)에 준하여 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

실험에 사용된 반응조는 15°C, 25°C 내외로 운전된 R1, R2였는데 주로 유기물, SS, 질소제거 양상을 비교 분석하였다.

### 3.1. 유기물 제거

운전기간에 따른 R1과 R2의 COD profile을 Fig. 3과 Fig. 4에 각각 나타내었다.

운전기간 74일 이전(내부반송 1Q)에는 R1, R2 모두 T/SCOD가 각각 평균 90 mg/L, 25 mg/L로 유입되었다. 74일 이후(내부반송 2Q)부터 초기 강우 시 영향을 고려해 높은 SS와 acetate를 주입하였고, 이로 인해 74일 이후의 TCOD가 높게 유입되었다. 또한 SCOD도 74일 이후 74일 이전보다 높게 유지되었다. 이 때의 TCOD는 R1, R2 평균 180~200 mg/L, SCOD는 65 mg/L로 유입되었다. 평균농도는 위와 같지만, 이 때는 COD의 농도를 다양하게 변화시켰다.

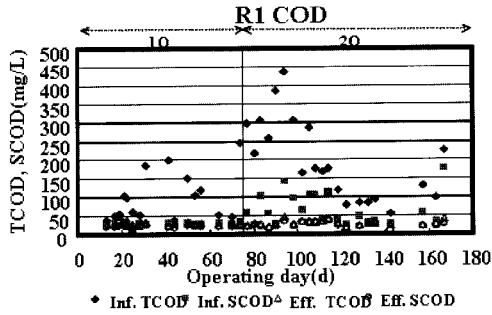


Fig. 3. COD profile of R1.

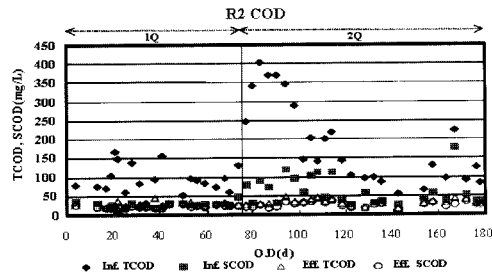


Fig. 4. COD profile of R2.

Fig. 3, 4에서 알 수 있듯이 유입 T/SCOD의 다양한 변화에도 유출수의 T/SCOD는 30 mg/L, 21~26 mg/L 정도로 안정적인 수질을 나타냈으며, 온도에 따른 영향도 나타나지 않았다.

### 3.2. SS 제거

Fig. 5, 6은 R1과 R2의 SS profile과 제거율을 각각 나타내었다.

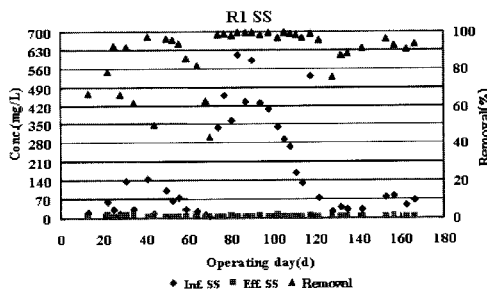


Fig. 5. SS profile of R1.

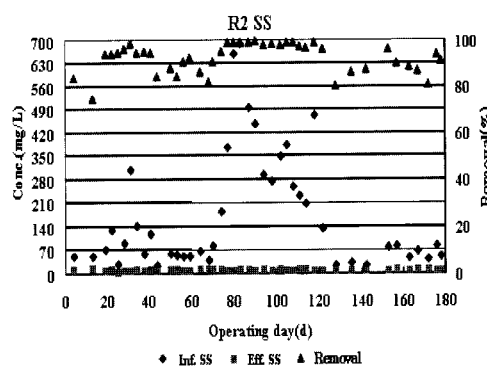


Fig. 6. SS profile of R2.

운전기간 74일 전에는 유입 SS농도는 높지 않게 운전되었는데 SS의 대부분은 2차처리시 유출된 미생물들이다. 74일 이후는 강우시 SS의 급격한 증가가 반응조에 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위하여 흙을 이용하여 SS농도를 높여주었다.

강우시 하수처리장 유입수 내에는 지표면 퇴적물의 세척에 의해 흙 성분이 많아진다. 이 중 입자가 큰 것들은 침사지나 1차 침전지에서 제거되고, 입자가 작은 것들이 by-pass되게 된다. 이런 이유로 유입수내의 SS농도를 높여주기 위해서 지표면의 흙을 물로 씻은 후 가라앉혀 그 상정액을 유입 원수내에 주입하였다. 따라서 흙의 FSS성분으로 인해 74일 이후의 유입수 VSS/SS는 평균 0.5으로 낮게 나타났다. 실제로 비가 왔을 경우 개수로의 물을 분석하였을 때 VSS/SS가 0.4~0.5로 관측되었다.

R1, R2 모두 600 mg/L 이상의 높은 농도의 SS 유입에도 불구하고 12 mg/L이하의 낮은 SS농도를 유지하였다. 이것은 BAF의 여과에 의한 제거로서 거의 모든 유입 SS가 제거되며, 유출수내의 SS와 VSS 비를 계산한 결과 0.8 정도로 유출수내의 SS는 NBAF에서 유실된 미생물이 대부분이라고 판단된다.

### 3.3. 질소제거

#### 3.3.1. NH<sub>4</sub>N 제거

Fig. 7, 8은 온도에 따른 NH<sub>4</sub>N의 농도 변화를 나타내었다.

R1은 낮은 온도로 인해 정상화 단계에 도달하는데 오랜 시간이 소요되었고, 제거효율 또한 낮은 온도로 인해서 좋지 않았다. 그러나 시간이 지날수록 미생물의 활동이 정상화되고, 온도가 증가하면서 제거량이 증가했다. R2의 경우는 R1과는 달리 상대적으로 높은 온도로 인해 쉽게 정상화가 되었다.

전체적으로 정상화된 후의 제거 가능량은 R1의 경우 평균 20 mg/L정도이고, 최고 33 mg/L이며, R2의 경우는 평균 27 mg/L이고, 최고 42 mg/L로 나타났다. 이것은 R1의 정상화 후 평균 운전 온도가 20°C, R2의 경우 26°C로 온도와 유입 NH<sub>4</sub>N 농도에 의한 영향으로 판단된다.

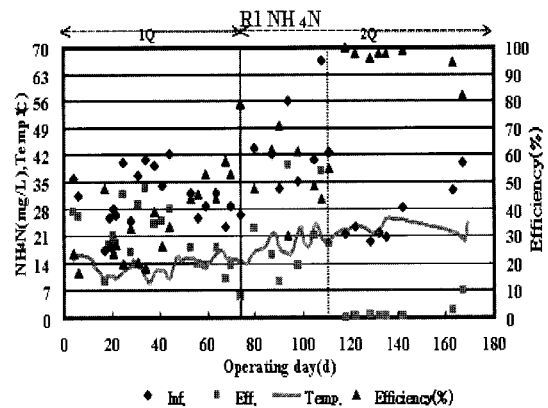


Fig. 7. NH<sub>4</sub>N profile of R1.

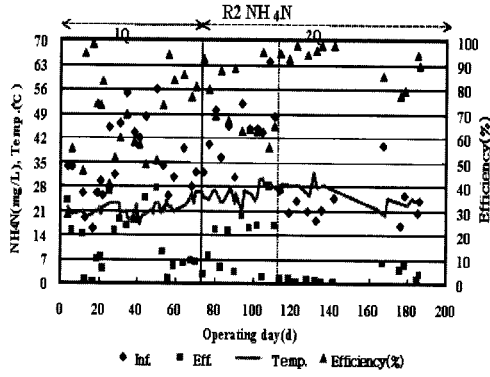


Fig. 8. NH<sub>4</sub>N profile of R2.

3.3.2. TN 제거

Fig. 9, 10은 R1과 R2의 TN 유입 및 제거 loading을 나타낸다. TN 제거율은 전적으로 유입 COD의 영향에 의해 결정된다. 유입 SCOD가 평균 43 mg/L로 매우 낮게 유입된 이유로 탈질 효율이 낮아 TN 제거율도 낮게 나타났다. 전체적인 TN 제거율은 10~60%로 나타났다. Fig. 9, 10의 타원 안 자료를 보면 비슷한 TN 부하가 유입되어도 유입수 내의 미생물이 쉽게 섭취 가능한 유기물의 양에 따라 제거율이 크게 달라지는 것을 볼 수 있다.

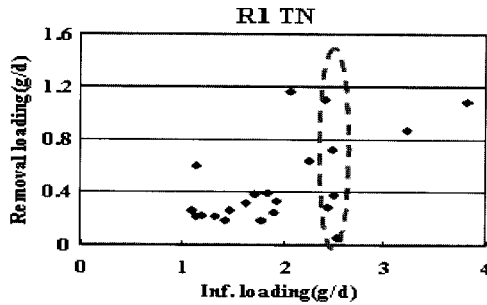


Fig. 9. TN removal loading according to influent TN loading in the R1.

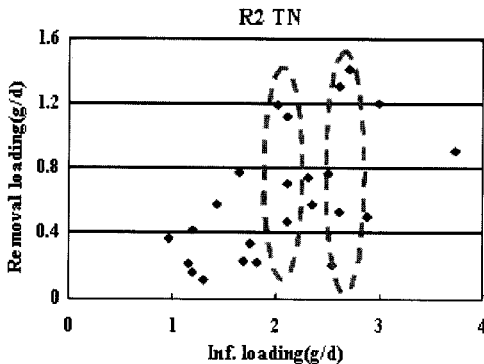


Fig. 10. TN removal loading according to influent TN loading in the R2.

3.4. 인제거

3.4.1. TP 제거

Fig. 11, 12는 R1과 R2의 TP 유입, 유출 부하를 나타낸다.

분석 결과 유출수 TP의 대부분은 SP로 나타났다. 본 반응조 system이 질소 제거를 위한 공정이기 때문에, 생물학적인 SP의 제거는 거의 일어나지 않는다고 할 수 있다. Fig. 11, 12의 타원 안 자료들에서 유출수 TP중 거의 대부분이 SP로 나타나 TP 제거는 크게 않는 것으로 나타났다.

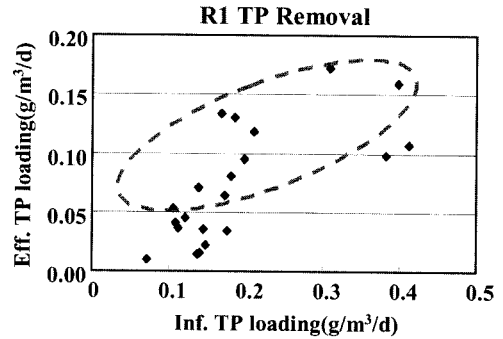


Fig. 11. Effluent TP loading according to influent TP loading in the R1.

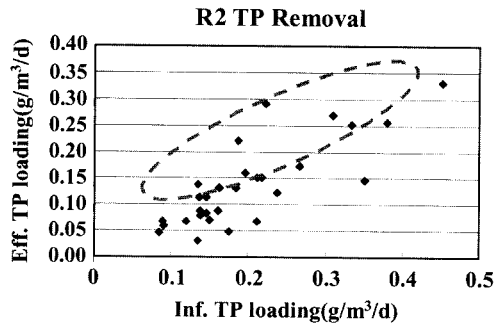


Fig. 12. Effluent TP loading according to influent TP loading in the R2.

3.4.2. SP 제거

Fig. 13, 14에는 유입 SP와 제거된 SP 농도를 나타내었다.

R1, R2 모두 SP제거량은 약 1 mg/L이하로 나타났다. 인축적 미생물이 활동하는데 필요한 혐기성조건이 없기 때문에 SP의 제거량은 크게 나타나지 않았고, 제거된 1 mg/L 이하의 SP는 미생물 성장시 cell 합성에 사용되어진 것으로 판단된다. 그러나 Aesøy 등(1998)의 연구에서도 알 수 있

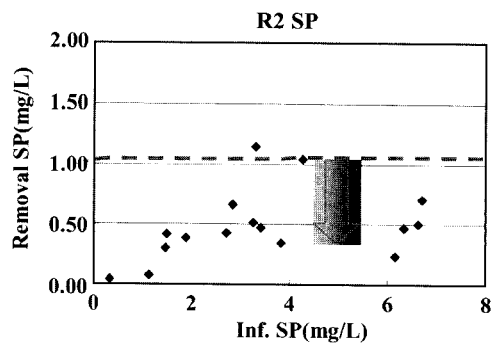


Fig. 13. SP removal according to influent SP concentration in the R1.

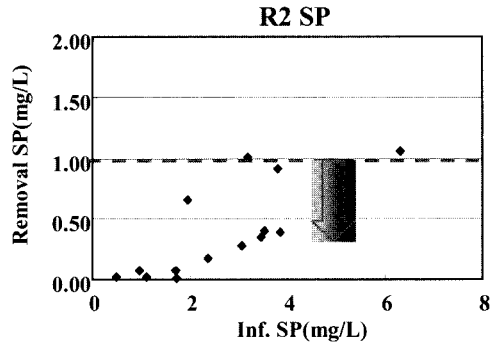


Fig. 14. SP removal according to influent SP concentration in the R2.

듯이 실제 미생물의 cell 합성에 필요한 양보다 더 많은 양의 SP가 제거 되는 경우를 볼 수 있었다. 따라서 최종 유출수내의 TP를 낮은 농도로 유지하기 위해서는 BAF 공정의 앞에 위치하는 BNR system에서 SP의 제거 효율이 높아야 한다. 만약 그렇지 못할 경우는 화학적인 인제거가 필요하다고 판단된다.

### 3.5. 역세척

#### 3.5.1. DF 역세척

공정상 유입수의 SS가 모두 DF에서 여과에 의해 제거된다. 따라서, DF는 media의 공극 폐쇄로 인한 수두의 증가로 media가 떠 오를 경우로 역세 주기를 결정하였다.

R1, R2 모두 운전 74일 전의 경우 평균 역세 주기는 8~10일이었고, 평균 역세 슬러지 발생량은 각각 0.8 g/d (0.36 g/media m<sup>2</sup>/d), 0.97 g/d(0.45 g/media m<sup>2</sup>/d)이었다. 초기 강우시 높은 SS의 영향을 보기 위한 실험을 시작한 74일 이후에는 평균 역세 주기는 3~5일이었고, 평균 역세 슬러지는 각각 2.63 g/d(1.17 g/media m<sup>2</sup>/d), 2 g/d(0.89 g/media m<sup>2</sup>/d)이었다.

#### 3.5.2. NBAF 역세척

NBAF 역세척은 유출수 수질을 기준으로 역세척을 하였다. 운전 중 유출수의 SS 농도가 10 mg/L 이상일 경우나 유출수 SP의 농도가 유입 SP보다 증가할 경우를 역세척 주기로 선택했다.

74일 이전과 이후를 비교할 때 DF와는 달리 큰 차이가 없었다. 운전 74일전 R1과 R2의 평균 역세 주기는 16일이었고, 평균 역세 슬러지 발생량은 각각 0.25 g/d(0.07 g/media m<sup>2</sup>/d), 0.24 g/d(0.07 g/media m<sup>2</sup>/d)이었으며, 74일 이후에는 평균 역세 주기는 15.7일이었고, 평균 역세 슬러지는 각각 0.37 g/d(0.11 g/media m<sup>2</sup>/d), 0.34 g/d(0.10 g/media m<sup>2</sup>/d)이었다.

## 4. 결론

BAF를 이용한 하수의 3차 처리와 강우 처리 실험을 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 유기물의 경우 전체 운전 기간동안 안정적인 유출수 수

질을 나타냈으며, 온도에 대한 영향은 나타나지 않았다. 3차 처리 시 유출수의 T/SCOD는 25 mg/L이하, 20~23 mg/L로 나타났으며, 강우 처리 시에는 유출수의 SCOD는 유입수의 SI 부분이 늘어나면서 증가하는 경향을 보였고, 이에 따라 TCOD도 증가하는 경향을 나타냈다. 80%의 확률을 갖는 유출수의 농도는 T/SCOD가 각각 41 mg/L이하, 35 mg/L이하로 나타났다.

2) SS의 경우 3차처리 유입수의 다양한 농도 변화와 강우 시 600 mg/L이상 고농도의 유입에도 관계없이 12 mg/L 이하의 매우 안정적인 제거 효율을 보여 주었으며, 온도에 대한 영향은 나타나지 않았다.

3) NH<sub>4</sub>-N의 경우 33 mg/L이하의 농도로 유입될 경우 누적확률 80%의 유출수 농도는 5.5 mg/L로 나타났으며, 84~100%의 높은 질산화 효율을 나타내었다. 또한 운전 온도가 평균 13°C의 낮은 경우 10 mg/L의 질산화가 가능하였고, 온도에 대하여 영향을 받는 것으로 나타났다. 전체적인 TN 제거에서는 10~60%로 나타났으며, 유입수 BDCOD의 농도에 따라 TN 제거율이 크게 달랐다. 또한 유입수 자체의 NO<sub>2</sub>-N과 NO<sub>3</sub>-N의 유입으로 인한 COD의 소모로 인해 실제 반응조 내의 탈질율이 크지 않았고, 초기 강우 처리시의 높은 SS 농도로 인해 DF의 축적된 SS로 인해 탈질 미생물과 기질간의 접촉 저하로 전체적인 TN 제거율이 높지 않았다.

4) 본 연구결과로부터 BAF 공정으로 기존의 하수처리장을 개선하거나 강우시의 by-pass되는 유량을 처리함으로써 앞으로 강화되는 수질기준을 만족시키고 수량과 수질변화에 보다 안정적으로 대응할 수 있는 하수 처리 system을 이룰 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- 최의소, 상하수도 공학, 청문각, p. 306 (2001).
- Aesøy, A., Ødegaard, H., Bach, K., Pujol, R. and Hamon, M., Denitrification in a Packed Bed Biofilm Reactor (BIOFOR)-Experiment with Different Carbon Sources, *Water Research*, **32**, pp. 1463-1470 (1998).
- APHA, AWWA and WEF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th edition, Washington D.C., USA (1998).
- Chudoba, P. and Pujol, R., A Three-Stage Biofiltration Process: Performances of a Pilot Plant, *Wat. Sci. Tech.*, **38**, pp. 257-265 (1998).
- Hewitt, S. and Amirtharath, A., Air Dynamic Through Filter Media during Air Scour, *J. Engng-ASCE*, **110**(3), pp. 591-606 (1984).
- M'Coy, W. M., Biological Aerated filter; a New Alternative, *Wat. Environ. And Tech.*, pp. 39-43 (1997).
- Pujol, R., Hamon, M., Kandal, X. and Lemmel, H., Biofilters; Flexible, Reliable Biological Reactors, *Wat. Sci. Tech.*, **29**, pp. 33-38 (1994).
- Rodgers, M., Organic Carbon Removal using a New Biofilm Reactor, *Water Research*, **33**, pp. 1495-1499 (1999).