

# 고도처리공법이 적용된 하수처리시설에서의 공법적용의 적정성 평가

안준수<sup>1\*</sup>, 박태술<sup>1</sup>, 조정호<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>대진대학교 환경공학과, <sup>2</sup>공주대학교 화학공학부

## Validity evaluation of wastewater treatment system applying advanced treatment processes

June-shu Ahn<sup>1\*</sup>, Tae-sool Park<sup>1</sup> and Jung-ho Cho<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Daejin University.

<sup>2</sup>Department of Chemical Engineering, Kongju National University.

**요약** 본 연구는 고도처리공법을 적용하여 수년간 가동 중인 하수처리시설에 대한 운전현황을 측정·분석하여, 고도처리공법 적용의 적정성을 평가하고자 하였다. 단위공정별 처리효율은, BOD의 경우 1차침전지 35, 생물반응조 87, 최종방류수 48 %, T-N의 경우 1차침전지 18, 생물반응조 40, 최종방류수 25 %, T-P의 경우 1차침전지 23, 생물반응조 38, 최종방류수 25 % 등으로, 각 단위공정별로 양호한 처리효율을 나타내었다. 생물반응조 내의 미생물 관측 결과, 다양한 종류의 세균과 원생동물 및 후생동물이 관측되었고, 담체의 세균 부착기능이 안정적으로 유지되고 있음을 알 수 있었다. 최종방류수질은 BOD 5.5, COD 9.9, SS 4.6, T-N 11.8, T-P 0.99 mg/L으로 방류수 수질기준보다 낮은 양호한 수질상태를 나타내었다.

**Abstract** In this study, validity of wastewater treatment system with advanced treatment processes was evaluated by studying its operational conditions by applying the advanced treatment to the wastewater treatment system which was operating for last several years. Study indicated a fair result for the removal efficiencies of BOD, T-P, and T-N for each unit operation. BOD removal efficiencies for primary clarifier, bioreactor, final effluent are 35, 87, and 48 % respectively. T-P(T-N) removal efficiencies for primary clarifier, bioreactor, final effluent are 18(23), 40(38), and 25(25) % respectively.

Further investigation of bioreactor showed that various microorganism such as bacteria, protozoa, and metazoa is present in the bioreactor, and the main function of the media, adhesion (adsorption) of microorganism onto the media, is stabilized. Final effluent quality was lower than the regulation, and BOD, COD, SS, T-N, T-P were 5.5, 9.9, 4.6, 11.8, 0.99 mg/L respectively.

**Key Words** : Advanced Treatment, Wastewater Treatment System.

### 1. 서론

'60~'70년대 우리나라는 급속한 산업화와 경제발전으로 인구의 급증과 도시집중화 현상 등으로 인하여 대량의 생활하수 발생을 초래하게 되었다. 생활하수 내에는

유기물, 질소 및 인 등의 오염물질들이 함유되어 있어 수역의 수질오염을 야기하게 되었다. 특히 오염물질 중 다량 함유되어 있는 생분해성 유기물은 분해 시 수중의 용존산소를 감소시켜 혐기성화에 의한 수중 생물의 질식사 및 부패현상을 야기할 수 있고, 질소·인 성분은 농도 증

본 논문은 2010학년도 대진대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

\*교신저자 : 안준수 (jsahn@daejin.ac.kr)

접수일 10년 08월 11일

수정일 10년 10월 13일

게재확정일 10년 10월 15일

가는 부영양화 현상으로 인한 녹조 및 적조 발생을 초래하여, 방류수역의 수환경 악화와 더불어 수자원 이용 등에 큰 피해를 끼치게 된다.

그러므로 이와 같은 생활하수는 적절한 처리공정을 거쳐 처리되어 적합한 수질상태로 방류되어야 하며, 현재 우리나라 하수처리장의 방류수 수질기준은 아래 표 1과 같다.

[표 1] 방류수 수질 기준 (단위 : mg/L)

항 목	SS	BOD	COD	T-N	T-P
수질 기준	10 이하	10 이하	40 이하	20 이하	2이하

한편, 우리나라 하수처리시설들의 처리공법은, '90년 대 중반까지는 SS와 생분해성 유기물을 주요 제거대상 물질로 한 공법들(활성슬러지법, 장기포기법 등)이 주로 적용되어 왔다. 하지만, 수계의 녹조 및 적조 현상의 발생이 빈번하고 심각해짐에 따라, 이와 같은 부영양화 현상의 주요 원인물질인 질소·인 성분을 제거하는 것이 절실하게 되었으며, 이에 따라서 우리나라는 1996년 1월 1일부터 방류수 수질 기준(T-N:60, T-P: 8 mg/L)으로 규제하기 시작하였으며, 더불어 하수처리공법들도 재래식 처리공법(활성슬러지법, 장기포기법 등) 대신 다양한 고도처리공법(A<sub>2</sub>O, SBR 등)을 적용하기 시작하였다.

우리나라에서 '08년말 현재 운영 중인 공공하수처리 시설은 총 403개소이며, 이 중에서 재래식공법(표준활성슬러지법, 장기포기법 등)은 94개소(23%)에 운영되고 있고, 여러 가지 고도처리공법이 309개소(77%)에서 적용되고 있으며, 재래식공법으로 운영되고 있는 기존의 하수처리장들도 시설 확충 및 개선을 통하여, 점진적으로 고도처리공법으로 전환되고 있는 추세이다.

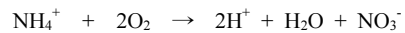
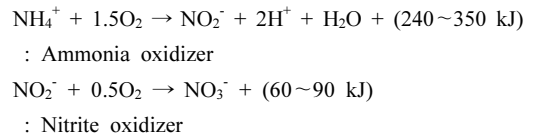
본 연구는 수년간에 걸쳐 실제 운영 중인 고도하수처리 시설 중, 운전기간이 길고 중규모의 고도하수처리시설(간헐포기 접촉산화 공법)에 대한 운전현황을 측정·분석하여, 고도처리공법 적용의 적정성을 평가하고자 하였다 [11,12].

## 2. 이론적 고찰

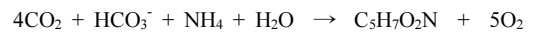
### 2.1 생물학적 질소 제거

질산화 과정은 호기성 상태에서 독립영양세균인 암모니아 산화균에 의해 암모늄(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)이 아질산성 질소(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)

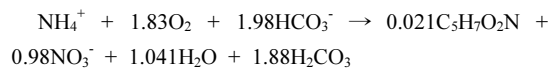
로 산화되는 과정과 아질산염 산화균에 의해 아질산성 질소(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)가 질산성 질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)로 산화되는 과정을 말하며, 이들 질산화 미생물은 질산화 과정에서 에너지를 얻으며 이 에너지와 무기탄소(CO<sub>2</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)를 이용하여 세포증식을 하게 된다.



에너지를 얻는 동안 암모니아 이온의 일부는 세포질로 동화된다. 미생물 합성반응은 다음과 같이 나타낼 수 있다.



총괄적인 산화와 합성반응은 다음과 같이 나타낼 수 있다.



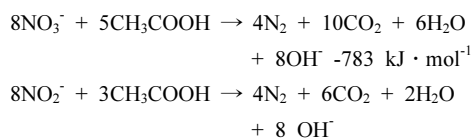
위 식에서 암모니아에서 질산염으로 산화되는데 필요한 산소량은 4.57mgO<sub>2</sub>/mgN이다.

암모니아 산화균인 *Nitrosomonas*와 아질산염 산화균인 *Nitrobacter*의 수율계수는 각각 0.05~0.29gVSS/gNH<sub>3</sub>-N과 0.02~0.08gVSS/gNO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N이며 설계 시에는 보통 0.15gVSS/gNH<sub>3</sub>-N이 사용된다. 결국 1g의 암모니아성 질소가 제거됨에 따라 4.33g의 산소, 7.1g의 알칼리도가 제거되며 0.15g의 새로운 세포가 생성된다. 이러한 질산화는 저온에서 활성도가 급격히 떨어지고, 유독 물질에 의한 저해를 많이 받고, 미생물 수율이 낮아 유기물을 분해하는 종속영양 미생물과의 성장 경쟁에서 매우 불리한 조건에 있어 보통의 폐/하수 처리에서 질소 제거에 어려움을 겪고 있는 상황이다 [1-4].

질산화에 영향을 끼치는 인자들로 온도, pH 및 알칼리도, DO농도, 유기물부하 및 질산화 방해물질 등이 있다[5-7]. 이들 인자들은 각각 독립적으로 질산화에 영향을 미치기 보다는 상호복합적인 관계를 보이면서 질산화에 영향을 끼친다. 독립영양 질산화 미생물의 최대 비성장율은 온도에 직접 연관되어있는 것으로 알려져 있다. 온도가 감소함에 따라 *Nitrosomonas*보다 *Nitrobacter*가

더욱 크게 영향을 받게 되어 저온에서 질산성 질소의 생성속도가 전체 질산화 속도를 결정한다. 질산화에 있어 최적온도는 30℃로 알려져 있으나 이 값은 실제로 하수처리시설에서는 너무 높은 값이며 25℃일 때는 30℃일 때에 비해 80%, 20℃일 때는 60%, 15℃일 때는 48%, 10℃일 때는 27% 정도 질산화가 이루어진다고 알려져 있다. 암모니아성질소는 질산화되는 과정에서 pH를 저하시키므로 일반적으로 활성슬러지법에 있어서는 pH가 질산화에 상당히 큰 영향을 미친다고 알려져 있다. 즉, pH가 낮은 조건일 경우 암모니아가 산화되어 질산성질소로 되는 정반응이 저해를 받게되어 질산화율이 저하된다. 일반적으로 활성슬러지의 경우 pH5~5.5일 때 질산화는 더 이상 이루어지지 않으며, 질산화의 최적 pH는 8.4 정도이며 이보다 높거나 낮을 때에는 질산화율이 감소한다.

탈질화 반응은 무산소 상태에서 *Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Bacillus*, *Micrococcus* 등의 혐기성 종속 영양 미생물에 의해 산화질소(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)를 분자상의 질소가스(N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, NO)로 환원시키는 과정을 말하며 이 과정에서 전자공여체로 유기탄소원을 필요로 한다. 유기탄소원은 메탄을 기준 약 1.9g/gNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N을 필요로 한다. 일반적으로 폐수중의 COD/N의 비율이 3~3.5 사이에서는 외부 탄소원 없이도 탈질이 가능하며 COD와 산화질소의 비율이 3~6.6 범위에서 탈질이 일어나기에 적당한 비율이다. 외부 탄소원으로는 메탄올, 글루코스, 아세테이트 등이 있다[1-3].



탈질과정에 있어 용존산소가 저해요인으로 작용하는 것은 통성혐기균에 의한 질산성질소의 환원속도가 산소 호흡 속도에 비해 현저히 떨어지기 때문이다. *Pseudomonas* 탈질균의 경우 0.2mg/L의 낮은 용존산소 농도에서도 유기물을 정상적으로 산화시키기 때문에 탈질반응이 일어나지 않는다. 탈질에서 유기물은 전자공여체로서 중요한 의미를 가지며, 주로 메탄올과 같은 C1~C5의 저분자량 탄소원을 사용해 왔다. 그러나 최근에는 하수중의 SS와 같이 생물학적으로 난분해성 물질도 충분한 발효를 통해 탄소원으로 사용 될 수 있다고 알려져 있으며, 이 밖에도 슬러지의 내생호흡을 통한 탈질도 많은 연구가 진행되고 있다. 간헐 포기 SBR공정에서 내생호흡과 같이 내부 탄소원을 사용하여 탈질하는 경우, 3시간 포기 / 3시간 비포기 사이클에서 92% 이상의 질소 제거

효율을 가질 수 있다는 보고도 있다. 탈질반응에서 최적 pH는 7.0~7.5 으로 알려져 있으며, pH가 6.0 이하거나 8.0 이상인 경우는 탈질이 저해를 받는다. 탈질반응은 미생물에 의한 생물학적 반응이기 때문에 온도의 영향을 받게 된다. 12℃까지는 크게 영향이 없지만 10℃ 이하에서는 탈질효율이 현저히 감소하는 것으로 밝혀졌다. 하지만 5℃에서 탈질율은 20℃일 때에 비해 1/5 정도에 불과하지만 미생물 농도가 높아짐에 따라 1~100mgN/L 정도로 상당한 탈질이 일어날 수 있는 연구결과도 있다[4-7].

## 2.2 생물학적 인의 제거

일반 활성슬러지 공정에서 인은 미생물의 증식, 침전, 흡착 등의 기작에 의해 주로 제거된다. 특히 미생물의 성장에 필요한 인함량은 1~2%로 그 이상의 인이 제거되는 것을 생물학적 과잉 인제거라 하고, 이에 대하여 80년대 이후부터 선진 외국을 중심으로 연구되고 있다. 즉, 일반적으로 받아들여지는 생물학적 인 제거 메커니즘은 미생물이 혐기-호기조건에 교차적으로 노출되면서 미생물종 간의 경쟁적인 기질 이용으로 인해 인을 축적하는 미생물의 선택이 일어난다는 것이다. 많은 연구결과를 종합하면 혐기/호기가 교차되는 반응시스템에서 혐기 상태에서는 용존성 탄수화물이 소비되면서 미생물이 인을 방출하는 것이 밝혀졌다. 이때 미생물 안으로 들어간 탄수화물은 저장되는 것으로 알려졌는데 주로 PHB(poly-hydroxybutyrate)로 세포내에 저장되는 것으로 밝혀졌다. 호기 단계에서는 저장된 기질을 소비하면서 인을 흡수한다. 흡수된 인은 다중인산염의 형태로 저장된다. 인 축적 미생물이 혐기성 상태에서 발효산물을 흡수할 수 있기 때문에 다른 미생물 중에 비하여 성장 속도면에서 우위에 있게 된다[1,8,9].

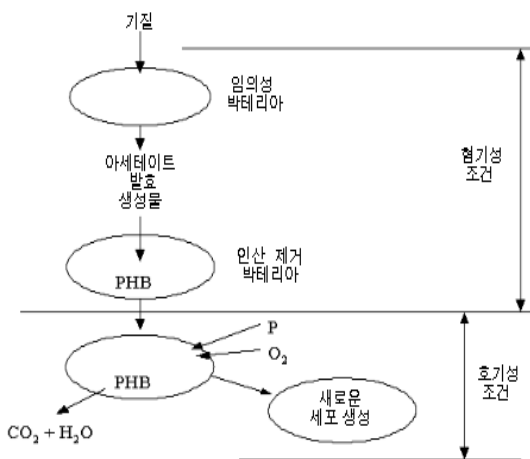
생물학적 인 제거에 대한 연구는 초기에 생물학적인 질소제거를 연구하는 중에 인 제거와 질산성질소와의 상관관계를 주목하여 인 제거를 위한 혐기성조건의 필요성이 강조되었다. 그 후에 저급지방산 특히 아세테이트를 이용하여 미생물을 배양한 경우 *Acinetobacter ssp*에 의한 인 과잉 축적을 확인하였다. *Acinetobacter*는 짧고 막대형이며, 크기가 1~1.5μm의 그람 음성이다. *Acinetobacter*는 보통 쌍이나 체인 또는 무리형태를 짓고 있으며 혐기성 조건에서 발효된 물질을 기질로 사용한다. 아세테이트와 같은 저급지방산은 혐기성조건에서 발효반응의 결과로서 생성되고, 세포내에서 PHB로 저장되며 이러한 기작은 *Acinetobacter*에 의한다. 또한 아세테이트는 호기조건에 이르러 때까지 세포내부에 PHB로 저장되며, 호기조건하에서 PHB는 신진대사 되어지고 모든 이용 가능한 ortho-P의 섭취를 위한 에너지를 제공한다. PHB는 혐기

성조건에서 세포 내로 들어가는 아세테이트나 프로피오네이트로부터 형성되며, 세포 성분의 50%까지 달한다고 한다.

생물학적 인 제거 영향인자로는 수온, pH, DO, MLSS, HRT, SRT, 유입수 중의 유기물, 질소 및 인 성분의 농도 등이 있다[8-10].

포기조의 DO 농도의 경우, 1.5~3.0 mg/L 정도를 유지해야만 질소, 인 동시제거 공정에서 인 제거율이 저하되지 않으며, DO 농도가 너무 낮으면 인 제거 효율이 저하되고 질산화가 이루어지지 않고 침전성이 악화되며, 반대로 DO 농도가 너무 높으면 무산소에 반송되는 혼합액의 DO 농도가 필요이상으로 높게 되어 무산소조에서의 탈질에 악영향을 미치게 된다. 궁극적으로 이는 혐기조에서의 인 방출을 억제함으로써 인 제거 효율을 저하시킨다. 따라서 생물학적 질소, 인 제거공정에서는 질소와 인의 동시제거를 고려할 때 포기조의 DO 농도를 2 mg/L 정도로 유지하는 것이 적절하다. 호기조에서 pH에 따른 인의 침취속도 영향은 pH 7에서 가장 침취속도가 빠르고, pH 6.5에서 7.0 사이에서는 큰 차이가 없었으며, pH 6.5 이하에서는 일정하게 감소하는 결과를 보이다 pH 5.2 이하에서는 활성도가 거의 없어진다. 이와 같이 유입수의 pH가 7 전후일 때는 인 제거에 별다른 영향을 미치지 않는다.

생물학적 인 제거 공정에 가장 큰 영향을 미치는 것은 유입수 중의 생분해성유기물 농도인데, 이는 인 제거 공정이 중속영양 박테리아에 의해 이루어짐으로 이들의 성장을 위한 유기물질이 필수적이기 때문이다. 인 제거 실험을 한 결과, 아세트산이 생물학적 인 제거를 위해서 가장 우수한 유기물질로 나타났다.



[그림 1] 생물학적 인제거 메카니즘

### 3. 결과 및 고찰

대상 하수처리시설은 수도권에 위치한 P-하수처리시설로서, 도심권에서 배출되는 생활하수가 대부분을 차지하고, 도축시설등 소규모 개별공장폐수가 일부 유입되고 있다. 본 처리시설에 대하여 11개월( 2008년 10월부터 2009년 08월까지) 동안 유입수, 1차침전지, 생물반응조, 2차침전지 및 최종방류수의 운전현황과 수질특성을 측정 및 분석하여 처리시설의 적정성을 평가하였다.

#### 3.1 유입하수량

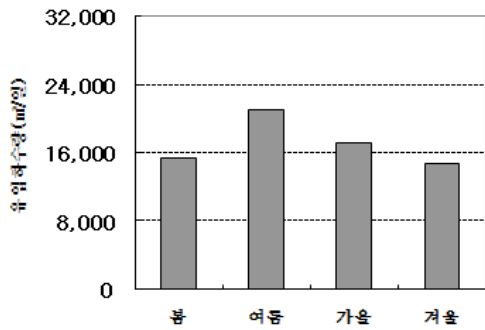
대상 하수처리시설의 설계용량은 16,000 m<sup>3</sup>/일이며, 2008년 1월부터 2009년 8월까지 월평균 하수량을 표 2에 수록하였다. 표에서 볼 수 있는 바와 같이, 연평균 유입하수량은 2008년도 16,930m<sup>3</sup>/일, 2009년도엔 17,581m<sup>3</sup>/일로 나타나, 평균 유입하수량이 설계 처리용량을 다소 초과하여 유입되는 것으로 나타났다. 1일 유입하수량은 최고 31,430m<sup>3</sup>/일에서 최저 11,970m<sup>3</sup>/일을 나타내고 있었다.

월평균 하수량이 가장 많은 기간은 하절기로서 7~9월에 하수량이 증가되는 것으로 나타났다. 하절기인 8월 일평균 유입하수량의 경우, 각각 설계용량의 151, 131% 초과하여 유입되는 것으로 나타나, 하수처리시설의 시설 용량을 크게 초과하고 있었다.

[표 2] 대상하수처리시설의 월평균 하수 유입량 (단위 : m<sup>3</sup>/일)

구 분	유 량	유 량
평 균	16,914	17,581
1월	14,633	14,864
2월	14,061	14,363
3월	15,119	15,379
4월	14,563	15,233
5월	14,730	17,054
6월	18,450	18,731
7월	19,998	23,680
8월	24,154	20,994
9월	19,005	-
10월	17,071	-
11월	15,563	-
12월	15,625	-

그림 2는 계절별 유입하수량의 변화를 나타내었으며, 하절기에 우수 및 불명수 유입으로 최고 유량을 나타내었고, 겨울철에 최저 유량을 나타내었다.



[그림 2] 계절별 유입하수량 변화 특성

실험기간 동안 유입된 하수의 수질현황을 아래 표 3에 나타내었다. 유입수질 조사 분석 결과 5개항목 모두 수질 변화폭이 크게 나타났으며 하절기로 접어들면서 전체적으로 유입농도가 낮아지는 것으로 나타났다. 이는 장우에 의한 우수유입의 영향으로 판단된다.

[표 3] 월별 유입수질 측정 결과  
(단위 : mg/L)

구분	BOD	COD	SS	T-N	T-P
10월	129.5	103.3	138.1	28.4	5.29
11월	130.9	94.8	141.8	40.2	4.22
12월	154.9	107.3	166.8	44.1	4.04
01월	158.6	123.0	124.0	41.5	3.43
02월	127.1	105.0	127.5	32.1	2.44
03월	152.3	132.0	127.8	29.1	3.35
04월	171.2	108.0	166.5	22.5	2.47
05월	199.7	86.7	119.0	36.6	2.78
06월	149.3	80.7	104.0	29.3	2.48
07월	81.8	77.0	82.5	23.4	2.04
08월	74.9	71.0	79.5	20.7	1.85
평균	134.6	99.0	123.1	32.0	3.1

### 3.2 생물반응조 운전현황

생물반응조 유입수에 대한 수질현황을 아래 표 4에 나타내었다. 함유 유기물 특성으로서 BOD와 COD의 상관관계를 산출한 결과, BOD가 COD보다 평균 1.4배 높아 일반적인 하수성상(1.2~1.5배)과 유사하게 나타나고 있었다.

생물반응조 유입 C/N비 및 C/P비를 산출한 결과, 유입 C/N비는 낮게 나타났으며, 유입 C/P는 높게 나타났다. 이와같이 유입하수성상 중 T-N은 높게 유입되며, T-P는 상대적으로 낮게 유입되므로 고농도 T-N이 유입될 경우 외

부탄소원을 투입하여 안정적인 질소 제거를 도모해야 할 것으로 판단된다.

[표 4] 월별 생물반응조 유입수 수질측정 결과  
(단위 : mg/L)

구분	BOD	COD	SS	T-N	T-P	C/N	C/P
10월	66.7	68.8	74.4	25.5	3.29	2.6	59.8
11월	86.8	71.3	94.5	31.2	2.56	2.8	66.2
12월	109.5	69.8	89.5	35.5	3.12	3.3	78.6
01월	115.8	90.5	65.3	29.5	2.41	4.1	87.7
02월	89.4	84.0	76.3	25.6	1.93	3.5	77.0
03월	96.9	78.5	84.8	24.7	2.20	3.9	65.9
04월	133.4	78.0	93.0	18.6	1.79	7.1	115.7
05월	177.9	52.0	70.7	30.6	2.39	6.0	153.7
06월	93.5	49.0	59.9	24.8	2.19	2.9	47.4
07월	37.8	46.0	46.0	20.1	1.77	1.9	32.4
08월	46.6	43.5	51.5	18.4	1.56	2.6	40.3
평균	90.5	66.6	72.3	26.0	2.3	3.5	72.0

대상하수처리시설에 설치된 생물반응조는 간헐포기접 촉산화조로 동일 반응조를 포기/비포기 교반을 반복하는 간헐포기공정과 유동상의 미생물담체를 투입하여 부유미생물과 부착미생물의 복합증식을 유도하는 공정이 결합되어 운영되고 있다. 또한 간헐포기조 2~3조는 생슬러지 발효액을 투입하여 탈질 및 인 방출반응이 원활히 이루어 질 수 있도록 되어 있다.

아래 표 5에서는 실험기간 동안 월평균 생물반응조 운전조건에 대한 측정결과를 나타내었다.

수온의 경우 11~22℃ 범위를 나타내었다. 특히 동절기에도 10℃이하로 강하하지 않고 있었으며, 이는 생물반응조가 덮개로 밀폐되어 있기 때문에 외기온도가 -10℃ 이하에서도 수온이 10℃ 이하로 떨어지지 않고 있는 것으로 관측되었다.

DO의 경우, 포기시 1~3mg/L 범위로서, 설계기준인 2mg/L를 크게 벗어나지 않고 있었다. MLSS 농도는 처리효율에 직접적인 영향을 미치게 되며, 또한 SRT와도 연관성이 있어 처리효율을 향상시키기 위해 MLSS 농도를 증가시키려면 SRT가 길어지게 되므로, 적절한 농도유지가 필요하다. 한편 동절기에는 수온이 낮아 미생물 활성이 떨어지므로 MLSS 농도를 다소 높게 유지해야 하는데, 본 측정결과로 부터도 확인할 수 있었다. 표에서 볼 수 있는 바와 같이 MLSS의 경우 2,100~3,400mg/L 범위로서, 설계기준인 4,100mg/L 보다 다소 적은 값을 나타내고 있었다. 설계농도 보다 낮은 상태를 유지하고 있으면

서도, 대체로 양호한 처리효율을 나타내고 있는 것은, 본 측정농도는 생물 반응조내의 부유성 MLSS 농도 측정값이며, 여기에 담체에 의한 부착 MLSS 농도의 효과가 부가된 결과에 기인한 것으로 판단된다. SVI는 슬러지 침강성을 나타내는 지표로서 일반적으로 50~150 범위가 양호한 기준인데, 본 측정결과 90~160 범위로, 비교적 양호한 상태를 나타내고 있었다.

[표 5] 월별 생물반응조 운전조건 측정 결과(1)

구분	수온(°C)	pH	DO (mg/L)	MLSS (mg/L)	HRT (hr)
설계기준	15	-	2.0	4,100	6.0
10월	19.9	6.4	3.1	2,422	5.8
11월	16.8	6.0	1.6	2,159	6.3
12월	13.5	6.1	1.3	3,428	6.3
01월	11.4	6.3	2.7	2,535	6.6
02월	11.2	6.5	2.2	2,504	6.9
03월	12.0	6.6	2.5	2,821	6.4
04월	13.5	6.8	0.8	2,183	6.5
05월	15.8	6.7	1.2	2,118	5.9
06월	19.5	6.8	1.1	2,121	5.3
07월	21.3	6.9	3.6	2,193	4.3
08월	22.0	7.1	1.1	2,249	4.8
평균	16.1	6.5	2.0	2,459	5.9

[표 5] 월별 생물반응조 운전조건 측정 결과(2)

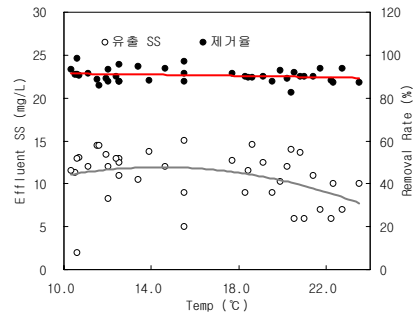
구분	SRT (day)	SVI	용적부하 (kg BOD/m <sup>3</sup> ·일)	F/M ratio (kg BOD/kg MLSS·일)
설계기준	9.3	-	0.489	0.119
10월	8.6	123	0.210	0.120
11월	10.9	152	0.317	0.148
12월	8.3	161	0.405	0.125
01월	12.6	153	0.422	0.170
02월	11.8	145	0.304	0.122
03월	13.6	122	0.403	0.147
04월	12.5	147	0.483	0.219
05월	11.5	128	0.720	0.323
06월	12.2	125	0.292	0.138
07월	14.7	90	0.253	0.118
08월	17.4	101	0.259	0.114
평균	12.2	138.2	0.357	0.153

### 3.3 운전인자별 영향조사

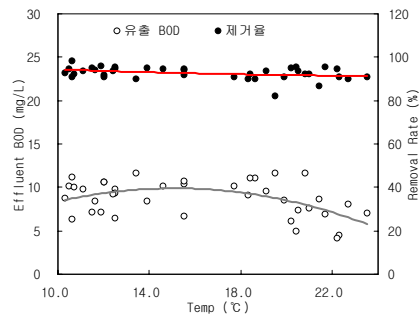
#### 3.3.1 수온의 영향

반응조내 수온변화에 따른 오염물질별 처리효율을 아래 그림 3에 나타내었다. 그림에서 보면 실험기간 동안 수온은 11.0~23.0°C 범위의 분포를 나타내었으며, 실험기간이 동절기로 접어들면서 수온저하 현상이 두드러지게

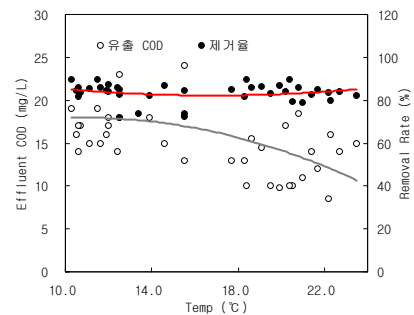
나타나고 있었지만 10°C 이하로는 내려가지 않고 있었다. 오염물질농도별 처리효율을 보면 수온에 따른 제거효율에는 큰 변화가 없었으나 방류수 농도는 수온에 따라 낮아지는 경향을 보였다. 이는 수온이 높은 여름철 강우에 의한 우수의 유입으로 유입하수 농도가 감소하여 방류수 농도는 감소하나 처리효율에는 큰 변화는 없는 것으로 판단된다. 실험기간 전체 평균 제거효율은 BOD 93, COD 84, SS 91, T-N 51, T-P 56 %로 나타났다.



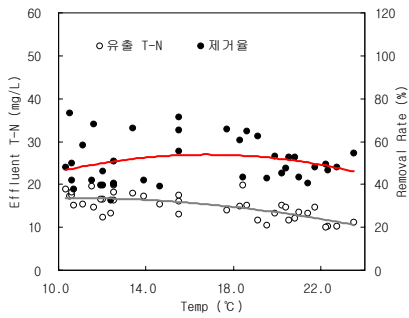
[그림 3a] 수온 변화에 따른 SS 제거효율



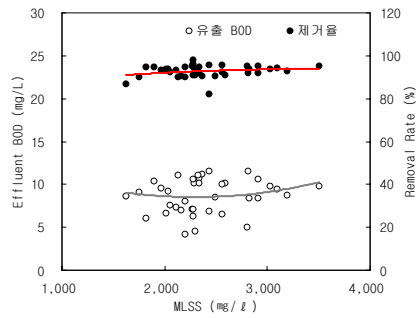
[그림 3b] 수온 변화에 따른 BOD 제거효율



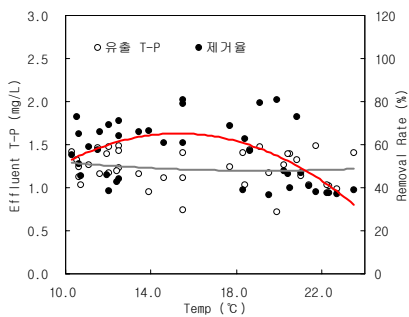
[그림 3c] 수온 변화에 따른 COD 제거효율



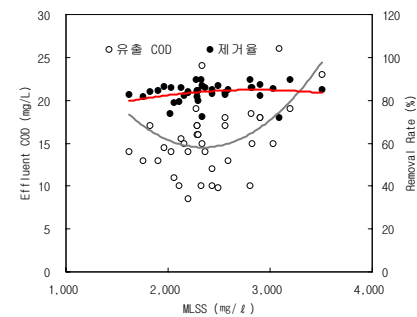
[그림 3d] 수온 변화에 따른 T-N 제거효율



[그림 4b] MLSS 변화에 따른 BOD 제거효율



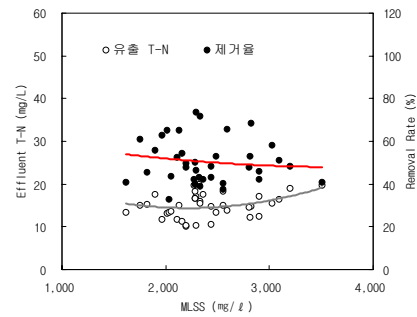
[그림 3e] 수온 변화에 따른 T-P 제거효율



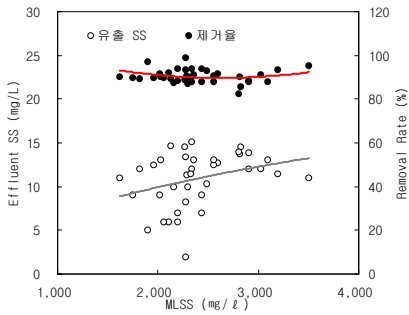
[그림 4c] MLSS 변화에 따른 COD 제거효율

### 3.3.2 MLSS의 영향

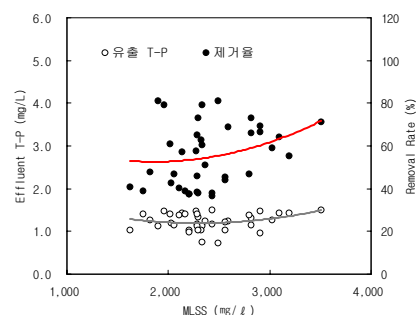
생물반응조 MLSS 변화에 따른 오염물질별 처리효율의 변화추이 보면 실험기간 동안 MLSS는 2,000 ~ 3,000mg/L 범위에서 주로 운전되었다. 각각의 처리효율을 분석해 보면, 오염물질별 상관관계에서는 T-P 항목을 제외한 나머지 항목에서는 반응조내 MLSS 증가에 따른 처리효율에는 큰 변화가 없었으며, 이와 같은 현상은 MLSS 증가 시기가, 대부분 수온이 낮은 시점이었기 때문으로 분석된다. 3,000mg/L 이상에서는 2차침전지 고�형물 부하율 증가로 슬러지가 월류되는 경우가 관측되었다.



[그림 4d] MLSS 변화에 따른 T-N 제거효율



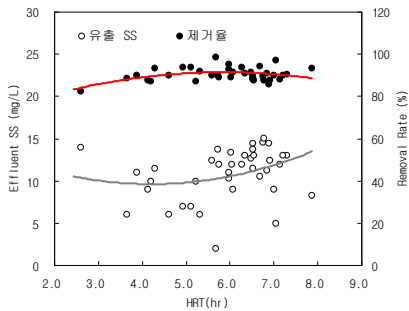
[그림 4a] MLSS 변화에 따른 SS 제거효율



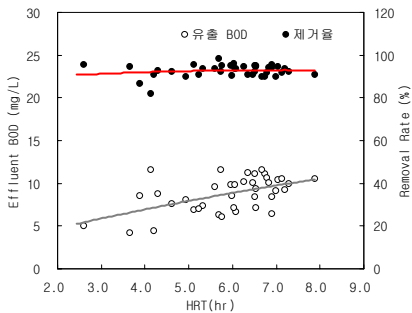
[그림 4e] MLSS 변화에 따른 T-P 제거효율

### 3.3.3 HRT 영향

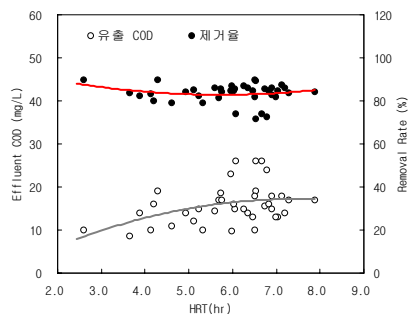
실험기간 동안 수리학적 체류시간(HRT)은 4~7 시간의 범위에서 운전되었다. 아래 그림 5에 수리학적 체류시간에 대한 처리효율의 상관관계를 나타내었는데, T-N, T-P 항목에서는 HRT가 증가할수록 처리효율이 약간 높아졌으나 나머지 항목에서는 HRT에 따른 처리효율의 변화가 나타나지 않았다. 통상적으로 HRT가 증가할수록 오염물질의 처리효율은 증가하는 것이 일반적이거나 본 실험에서 HRT는 일 평균값을 적용하고, 실험 분석은 특정 시간에 이루어져 연관성이 미약한 것으로 판단된다. 그러므로 대상하수처리장에서의 실험기간 동안에는 이러한 특징이 나타나지 않고 있었다.



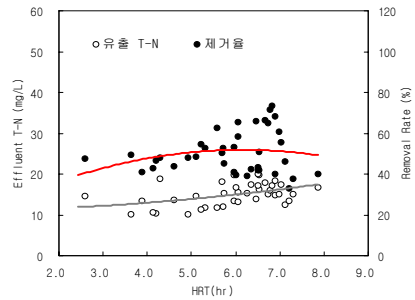
[그림 5a] HRT 변화에 따른 SS 제거효율



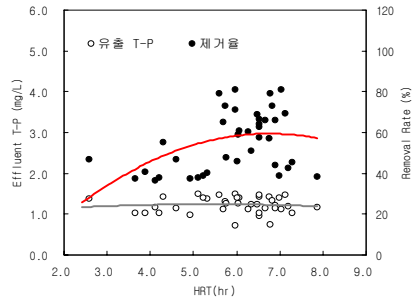
[그림 5b] HRT 변화에 따른 BOD 제거효율



[그림 5c] HRT 변화에 따른 COD 제거효율



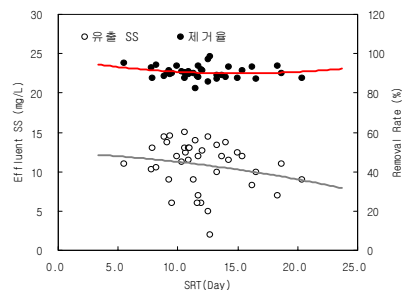
[그림 5d] HRT 변화에 따른 T-N 제거효율



[그림 5e] HRT 변화에 따른 T-P 제거효율

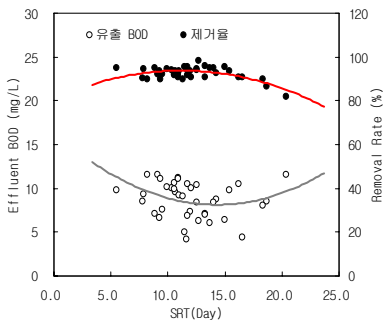
### 3.3.4 SRT 영향

SRT는 미생물 체류시간으로서 실험기간 동안 약 5~20일에 걸쳐 운전 되었으며 아래 그림 6에 SRT 변화에 대한 처리효율의 변화추이를 나타내었다. 전체적으로 SRT 증가에 따라 처리효율에는 큰 변화가 없는 경향을 나타내었으나, SRT가 긴 시점에서는 2차침전지에서 Pin-floc.이 다소 많이 관측되곤 하였다. T-N, T-P 항목의 경우 SRT가 증가할수록 제거효율이 감소하는 경향을 보였으나 방류농도 역시 떨어지는 경향을 나타내었다. 인제거 효율을 향상시키기 위해서는 SRT를 짧게 유지하는 것이 바람직하나, 반면에 질소제거율이 낮아짐으로 고도처리에 있어서는 적절한 SRT 유지관리가 중요하다. 따라서 본 처리장의 경우 적정 SRT로서는 9~13일 정도가 적합한 것으로 판단된다.

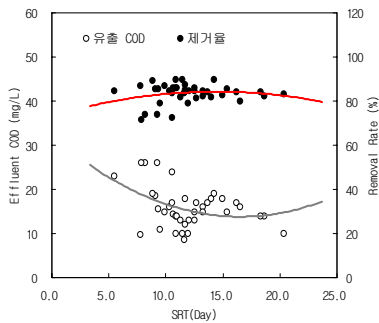


[그림 6a] SRT 변화에 따른 SS 제거효율

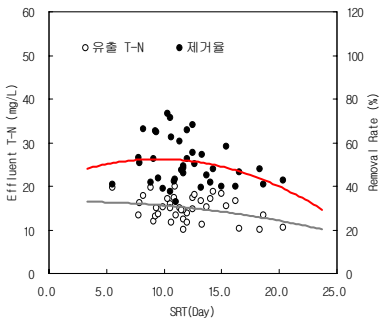




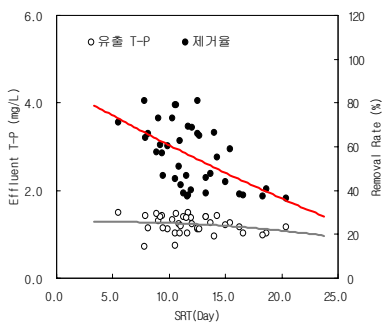
[그림 6b] SRT 변화에 따른 BOD 제거효율



[그림 6c] SRT 변화에 따른 COD 제거효율



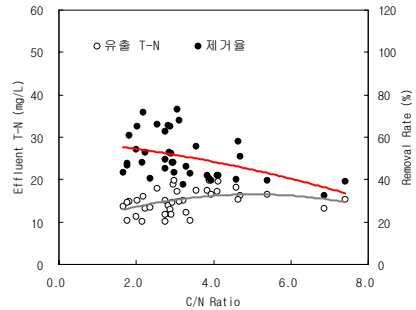
[그림 6d] SRT 변화에 따른 T-N 제거효율



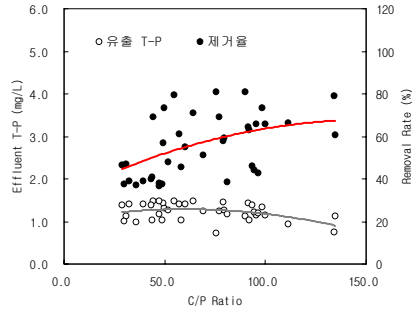
[그림 6e] SRT 변화에 따른 T-P 제거효율

### 3.3.5 C/N, C/P비 영향

실험기간 동안 생물반응조 유입수의 평균 C/N비 및 C/P비는 각각 3.3, 64.9 정도의 구성비로 나타났다. 타 처리장에 비해 C/N비는 상당히 낮게 유입된 반면 C/P비는 높게 유입되었다. C/N비 증가에 따라 처리효율이 감소하는 경향을 보였으나 낮은 C/N비에서도 처리수 T-N농도는 방류수 수질기준 이내로 처리되었고 C/P비 증가에 따라서는 T-P제거효율 증가 및 방류수 농도도 낮아지는 결과를 나타내었다.



[그림 7a] C/N비 변화에 따른 T-N 제거효율

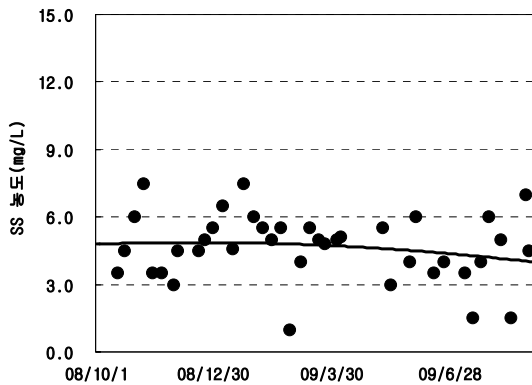


[그림 7b] C/P비 변화에 따른 T-P 제거효율

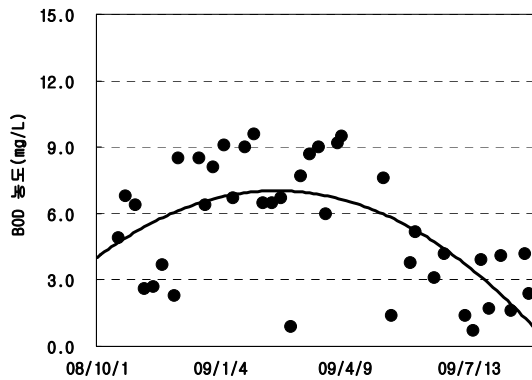
실험기간 동안 방류수질 현황에 대하여, 월별 평균값을 표 6에, 그리고 변화 특성에 대하여 그림 8에 나타내었다. 방류수 수질 측정 결과, 5개 항목 모두 방류수 수질기준 이내로 처리되었다. 하지만, BOD, T-N 항목은 동절기 12~3월 기간 동안 높게 방류되었으며, 특히 BOD 항목은 방류수 수질기준인 10.0mg/L에 근접하여 방류되었다. 동절기 BOD의 처리효율이 낮은 이유는 낮은 수온으로 인한 불완전한 질산화 반응으로 인한 NBOD 발생 영향이 가장 큰 것으로 판단된다.

[표 6] 월별 방류수질 측정 결과  
(단위 : mg/L)

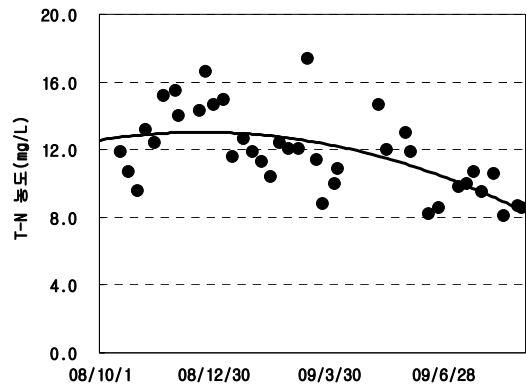
구분	BOD	COD	SS	T-N	T-P
방류수 수질기준	10.0	40.0	10.0	20.0	2.0
10월	6.0	8.6	4.7	10.7	0.83
11월	2.8	8.5	4.4	14.0	1.16
12월	7.9	10.8	4.9	14.9	1.15
01월	9.3	13.1	6.2	12.7	1.00
02월	5.2	11.9	4.3	11.5	0.76
03월	7.9	13.9	4.8	12.4	1.01
04월	9.9	12.0	5.1	10.4	1.08
05월	4.3	7.5	4.2	13.2	1.11
06월	4.2	7.8	4.4	10.4	1.10
07월	1.9	7.2	3.8	10.0	0.90
08월	3.1	7.0	4.5	9.0	0.88
평균	5.5	9.9	4.6	11.8	0.99



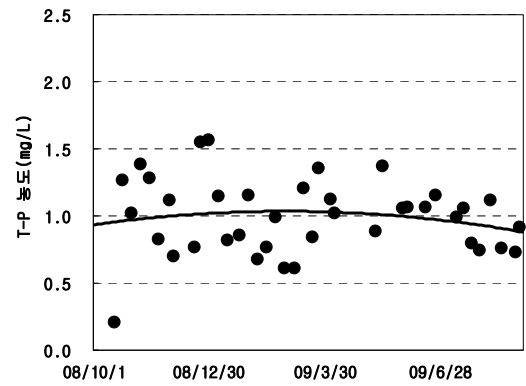
[그림 8a] 월별 방류수중 SS 농도변화



[그림 8b] 월별 방류수중 BOD 농도변화



[그림 8c] 월별 방류수중 T-N 농도변화



[그림 8d] 월별 방류수중 T-P 농도변화

### 3.4 단위공정별 처리효율

각 단위공정별 수질 측정 농도를 바탕으로 처리효율을 환산하여 아래 표 7에 수록하였다.

BOD의 경우, 1차침전지 35, 생물반응조 87, 최종방류수 48 %, T-N의 경우, 1차침전지 18, 생물반응조 40, 최종방류수 25 %, 그리고 T-P의 경우, 1차침전지 23, 생물반응조 38, 최종방류수 25 % 등으로 나타나, 각 단위공정별로 비교적 양호한 처리효율을 나타내었으며, COD의 경우, 생물반응조에서 75%를 나타내고 있었다. 특히 유입수가 시설용량을 초과하여 유입되고 있는 상황하에서, HRT가 짧은 상태에서도 T-N, T-P 성분의 제거효율이 비교적 양호하게 나타난 것은 생물반응조 내의 담체의 역할에 기인한 것으로 판단된다.

[표 7] 단위공정별 처리효율 (1)  
(단위 : %)

구분 (월)	BOD			COD			SS		
	1차	2차	최종	1차	2차	최종	1차	2차	최종
10	43.1	85.8	50.2	19.0	82.9	29.7	39.1	80.7	65.9
11	31.1	88.2	71.1	23.8	72.9	47.3	32.6	89.2	54.4
12	25.9	90.4	24.0	32.7	72.4	43.3	43.4	83.2	54.1
1	26.8	92.7	19.4	23.1	81.2	22.1	46.6	79.3	51.0
2	29.6	88.0	47.3	19.9	71.3	24.5	39.8	82.4	67.3
3	36.7	90.0	48.1	36.9	77.1	21.2	32.6	84.3	61.5
4	32.7	87.0	23.4	24.3	78.2	32.6	38.1	84.0	53.5
5	26.7	87.1	61.1	41.3	72.2	45.6	36.9	88.0	55.1
6	50.0	84.4	54.7	38.5	72.2	37.7	42.9	84.0	44.8
7	49.7	83.1	70.9	39.4	71.5	42.9	41.3	77.5	58.8
8	36.8	83.1	57.5	38.3	72.9	39.5	37.3	83.4	40.2
평균	35.4	87.3	48.0	30.7	75.0	35.1	39.2	83.3	55.2

[표 7] 단위공정별 처리효율 (2)  
(단위 : %)

구분	T-N			T-P		
	1차	2차	최종	1차	2차	최종
10월	24.4	54.1	51.9	48.9	56.7	37.9
11월	22.5	50.9	6.1	35.2	49.9	10.8
12월	19.8	46.9	14.2	22.9	42.2	31.6
1월	27.4	36.6	27.3	25.1	44.5	24.5
2월	20.1	33.3	27.8	21.4	36.4	34.2
3월	14.5	31.5	26.9	33.9	20.7	39.6
4월	15.7	26.4	25.8	17.6	36.3	12.2
5월	11.6	41.8	27.2	5.4	38.2	14.5
6월	15.1	39.7	30.9	10.8	34.9	20.5
7월	13.9	35.8	21.6	14.1	31.0	23.8
8월	11.1	42.1	14.7	16.4	23.7	25.0
평균	17.8	39.9	24.9	22.9	37.7	25.0

비고) 1차 : 1차 침전지 월류수, 2차 : 2차 침전지 월류수, 최종 : 최종 방류수

### 3.5 미생물 특성 관측 결과

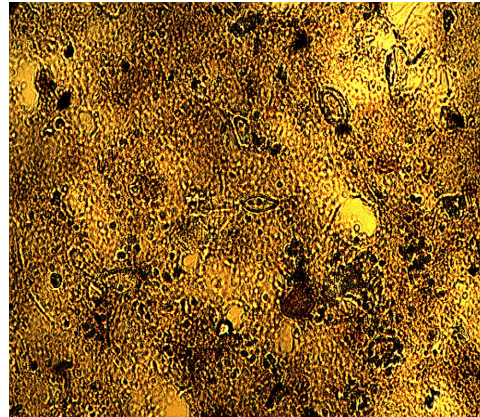
본 연구 대상 하수처리시설들의 주처리공정은 미생물을 이용한 생물학적 처리공정이다. 생물반응조 내에는 세균, 조류, 원생동물 및 후생동물 등, 다양한 종류의 미생물군이 공존하고 있다.

이와 같은 미생물군들은 반응조 운전조건에 따라 우점종이 변화될 수 있으며, 정상적인 조건일 때에는 세균과 원생동물들이 우점종을 형성하지만, 상태가 악화시 사상균 등이 번성하여 bulking 현상 등을 초래할 수 있다. 즉, 이들 미생물들의 상태를 파악함으로써 공정이 적절히 운영되고 있는지를 판단할 수 있다.

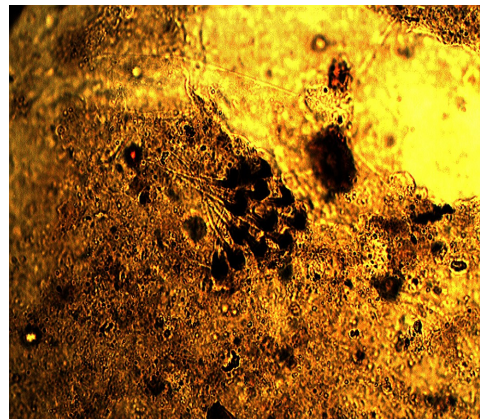
본 대상 하수처리시설에 대하여, 단위공정 중 미생물군이 존재할 수 있는 생물반응조내 MLSS를 검수하여 현미경으로 미생물군을 관측하였으며, 그 결과 대표적인 미

생물들을 아래 사진 1에 나타내었다.

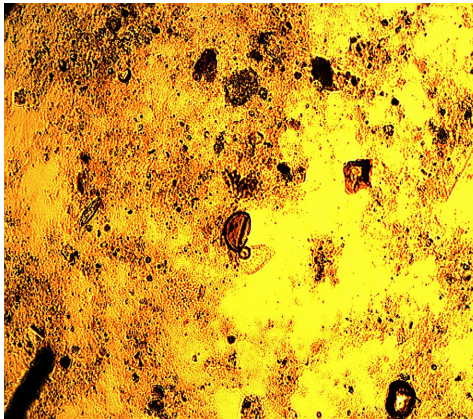
생물반응조에서의 현미경 관측 결과, 다양한 세균플록과 원생동물, 율충류 및 후생동물 등이 관찰되었다. 이들 미생물은 안정된 먹이사슬을 유지하면서 유기물을 제거하는 과정에서 나타나는 종류들이다. 육질율충류는 여러 가지 크기와 종류가 고르게 관찰되었는데, 율충류인 *Euchlanis*와 함께 관찰됨에 따라 유기물 농도가 높은 상황에서도 빠르게 이를 분해하고 있는 것으로 판단된다. 또한 관측되고 있는 구조류는 광합성 조류의 한 종류로서 유입수에 포함된 조류 가운데 대부분은 분해 또는 포식되지만 규산염의 외피를 갖고 있는 구조류의 특성에 따라 형태가 유지되기 때문에 나타난 결과로 판단된다. 미생물 관측 결과로부터, 함유 미생물들에 의해 유기물이 빠르게 분해되고 있는 것으로 판단되어 안정적인 하수 처리가 가능한 것으로 판단된다.



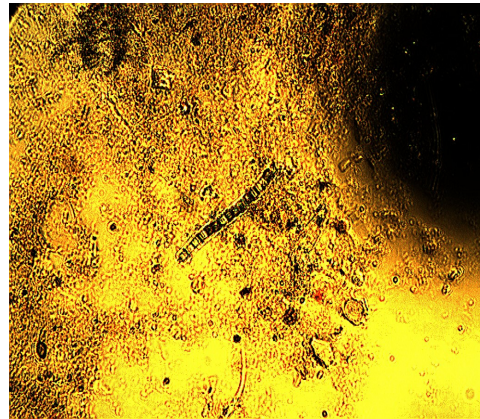
세균Floc.과 원생동물(육질율충)



원생동물-섬모충류-Vorticella

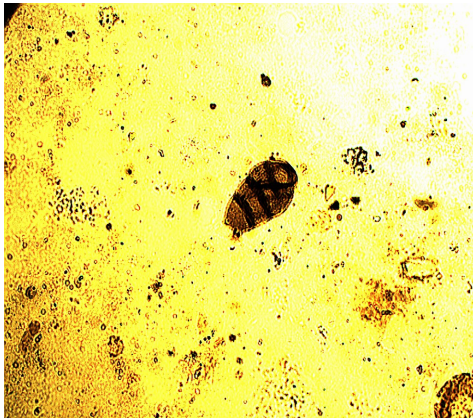


원생동물-편모충류-Bodo

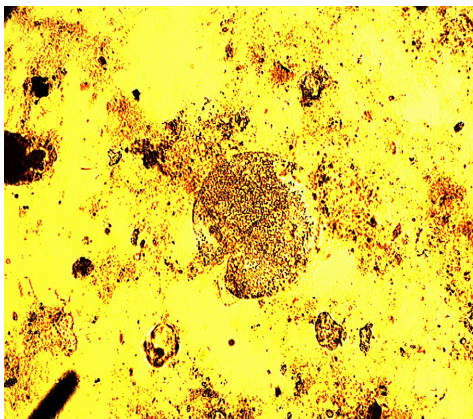


규조류-Aulacoseira

[그림 9] 생물반응조내 미생물 관측 결과



후생동물-윤충류-Euchlanis



후생동물-윤충류-Rotaria

#### 4. 결론

본 연구는 고도처리공법을 적용하여 수년간 가동중인 하수처리시설에 대한 운전현황을 측정·분석하여, 고도처리공법 적용의 적정성을 평가하고자 하였다. 대상 하수처리시설의 시설용량은 16,000m<sup>3</sup>/일이며, 실험기간 동안의 유입하수량은 연평균 16,930, 17,581 m<sup>3</sup>/일으로서 시설용량을 다소 초과하여 유입되었고, 특히 하절기인 8월에 가장 많이 초과 유입된 것으로 나타났다.

대상 하수처리시설들에 대하여 11개월(10월부터 차년도 8월까지)동안 처리시설 각 단위공정들에 대한 운전현황과 수질분석을 실시하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 유입수질은 월별 수질변화폭이 크게 나타났다. BOD를 예로 들면, 최대 5월 199.7mg/L, 최소 8월 74.9mg/L으로, 약 2.7배의 편차를 나타내었다. 실험기간 평균 측정농도는 BOD 135, COD 99, SS 123, T-N 32, T-P 3 mg/L으로써, 설계기준값인 각각 160, 150, 160, 37, 5 mg/L보다 약간 낮은 농도로 유입되었다.
- 2) 단위공정별 처리효율은, BOD의 경우 1차침전지 35, 생물반응조 87, 최종방류수 48 %, T-N의 경우 1차침전지 18, 생물반응조 40, 최종방류수 25 %, T-P의 경우 1차침전지 23, 생물반응조 38, 최종방류수 25 % 등으로, 각 단위공정별로 비교적 양호한 처리효율을 나타내었다.
- 3) 생물반응조 운전조건인 DO, SRT, SVI 등은 대체로 적절한 조건을 유지하고 있었으나, HRT는 4~7시

간으로 종종 최적조건보다 다소 짧게 운전되고 있는 경우가 발생하였고, MLSS 농도의 경우 2,100~3,400mg/L 범위로서, 설계기준인 4,100mg/L 보다 다소 적은 값을 나타내고 있었다. 이와 같은 운전조건에서도 대체로 양호한 처리효율을 나타내고 있는 것은 생물반응조내 담체의 부착 MLSS 농도의 효과에 기인한 것으로 판단된다.

- 4) 생물반응조 내의 미생물 관측 결과, 대상하수처리 시설에서는 생물반응조에서 다양한 종류의 세균과 원생동물 및 후생동물이 관측되었다. 즉 안정된 먹이사슬을 유지하면서 유기물을 제거하는 과정에서 나타나는 다양한 세균 플록과 육질충류, 윤충류 및 후생동물 등이 관찰됨에 따라 안정적인 하수처리가 가능한 것으로 판단되었다.
- 5) 최종방류수질은 평균 BOD 5.5, COD 9.9, SS 4.6, T-N 11.8, T-P 0.99 mg/L 등으로 방류수 수질기준보다 낮은 양호한 수질상태를 나타내었다.

## 참고문헌

- [1] Metcalf & Eddy, "Wastewater Engineering: Treatment and Reuse", McGraw-Hill Book Co., New York, pp. 607-815, 2003.
- [2] Focht, D.D. and Verstraete W, "Biological Ecology of Nitrification and Denitrification", Adv. Microb. Ecol, Plenum Press, New York, Vol.1, pp.135 ~ 214, 1997.
- [3] Hyungseok, Y., Kyuhong, A., Hyungjip, L., Kwanghwan, L., Younjung, K. and Kyunguen, Song, "Nitrogen Removal from Synthetic Wastewater by Simultaneous Nitrification and Denitrification(SND) via Nitrite in an Intermittently-Aerated Reactor", Water Research, Vol. 33, No. 1, pp. 145 ~ 154, 1999.
- [4] Hong, W. Z. Donald, S. M., William, K. O. and Frederic, A. K, "Controlling Factors for Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Two-Stage Intermittent Aeration Process Treating Domestic Sewage", Water Research, Vol. 33, No. 4, pp. 961 ~ 970, 1999.
- [5] van Niel E. W. J. "Nitrification by Heterotrophic Denitrification and its Relationship to Autotrophic Nitrification", Ph.D thesis, Delft University of Technology, 1991.
- [6] Waltrip, G. D., "Full-scale Nutrient Removal Demonstration Project at the York River Treatment Plant with the VIP process", Proceeding of 45th Annual Conference Virginia Water Pollution Control Association, Williamsbrug, Va, 1991.
- [7] Stenstrom, M. K. and Song, S. S., "Effect of Oxygen Transport Limitation on Nitrification in the Activated Sludge Process", Journal Water Pollution Control Federation, Vol. 63, pp. 208~219, 1991.
- [8] Sell, R. I., "Low Temperature Biological Phosphorus Removal", Proceeding of 54th Annual Conference of Water Pollution Control Federation, Detroit, Michigan, Air Products and Chemical, Inc., Allentown, PA, 1981.
- [9] Siebritz, I. P., Ekama, G. A. and Marais, G. R., "Biological Phosphorus Removal in the Activated Sludge Process", Research Report W46, Department of Civil Engineering, University of Capetown, South Africa, 1983.
- [10] McClintock, S. A., "The Effect of Temperature and Mean Cell Residence Time on Enhanced Biological Phosphorus Removal", Proceedings of the 1991 Specialty Conference on Environmental Engineering, ASCE, pp. 319~324, 1991.
- [11] 이정수, "표준 및 간헐포기식 활성슬러지법의 처리 특성에 관한 비교 연구(I) - 부하 변동 및 합리적 설계에 관하여", 대한환경공학회지, 제20권, 제9호, pp. 1267~1278, 1998.
- [12] 이해군, 배준석, 최광수, 한기백, 김창원, "간헐포기 활성슬러지에서 질소제거를 위한 포기-비포기 주기 및 ORP 적용성 평가", 대한환경공학회지, 제20권, 제1호, pp. 9~18, 1998.

## 안 준 수(June-Shu Ahn)

[정회원]



- 1982년 2월 : 한양대학교 공과대학 화학공학과 (공학사)
- 1986년 8월 : 연세대학교 본대학원 화학공학과 (공학석사)
- 1994년 8월 : 연세대학교 화학공학과 (공학박사)
- 1993년 3월 ~ 현재 : 대전대학교 공과대학 환경공학과 교수
- 1998년 3월 ~ 2001년 2월 : 대전대학교 환경연구소 소장
- 2002년 2월 ~ 2004년 12월 : 대전대학교 산학협력원 원장
- 2005년 1월 ~ 2008년 4월 : 경기대진테크노파크 원장

<관심분야>

정수 및 하폐수 처리

**박 태 술(Tae Sool Park)**

[정회원]



- 1988년 2월 : 전남대학교 공과대학 공업화학과 정밀화학전공 (공학사)
- 1991년 2월 : 한양대학교 환경공학과 대기공학전공 (공학석사)
- 2002년 2월 : 경희대학교 환경학과 대기오염전공 (이학박사)

- 1991년 12월 ~ 1993년 2월 : 국립환경연구원 대기연구부 환경연구사
- 1993년 3월 ~ 현재 : 대전대학교 공과대학 환경공학과 부교수

<관심분야>  
환경측정분석

---

**조 정 호(Jungho Cho)**

[정회원]



- 1988년 2월 : 한양대학교 공과대학 화학공학과 (공학사)
- 1991년 8월 : 한국과학기술원 화학공학과 (공학석사)
- 1998년 2월 : 서울대학교 공과대학 화학공학과 (공학박사)
- 1991년 1월 ~ 1997년 2월 : 대림산업(주) 공정부 과장

- 1997년 3월 ~ 2000년 2월 : 경인여자대학 산업환경공학부 전임강사
- 2000년 3월 ~ 2008년 2월 : 동양대학교 공과대학 생명화학공학과 조교수
- 2008년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 화학공학부 부교수

<관심분야>  
열역학, 공정 Simulation