Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 12, No. 7 pp. 3341-3352, 2011

DOI : 10.5762/KAIS.2011.12.7.3341

공장폐수가 혼합된 하수처리장의 하수처리 특성

안준수[1*], 박욱근[1], 조정호[2]
[1]대진대학교 환경공학과
[2]공주대학교 화학공학부

Characteristics of wastewater treatment of sewage mixed with industrial wastewater

June-shu Ahn[1*], Wook-keun Park[1] and Jung-ho Cho[2]
[1]**Department of Environmental Engineering, Daejin University.**
[2]**Department of Chemical Engineering, Kongju National University.**

요 약 본 연구는 간헐적으로 공장폐수가 유입되고 있는 하수처리시설에 대하여 각 단위공정별 운전현황 조사와 수질 측정을 실시하여 운전특성을 파악하고자 하였다. 생물반응조의 운전조건은 MLSS 농도 2,000～3,000 mg/L, HRT 5.3～16.3 시간, SRT 2.8～66.6 일 범위를 나타내었고, SVI는, 최적 범위인 50～150을 상회하여, 200 이상의 측정값이 빈번히 발생하여 슬러지 침강성이 양호하지 않은 것으로 관측되었다. 주요 원인은 공장폐수의 유입에 기인한 것으로 판단되며, 이와 같이 공장폐수 유입 시 생물반응조내의 MLDO가 급격히 상승하고 질산화 효율이 빠르게 감소하며 이차침전지에서는 Pin floc.이 유출되는 현상이 발생하였다. 미생물 관측결과, 다양한 세균 플록과 섬모충류 등이 관측되었으나, Bulking 발생의 원인이 되는 사상균인 Sphaeotilus와 방선균 등도 발견되었다. 단위공정별 처리효율은 평균적으로는 대체로 양호한 처리효율을 나타내고 있었으나 간헐적인 공장폐수 유입의 영향으로 인한 생물반응조의 운전특성의 불안정성으로, 처리효율의 변동성이 크게 나타나고 있었다.

Abstract In this study, characteristics of wastewater treatment of sewage intermittently mixed with industrial wastewater is examined by investigating the operational status of each unit operation and measuring water quality. The bioreactor operating condition was measured for MLSS concentration 2,000～3,000 mg/L, HRT 5.3～16.3 hour, SRT 2.8～66.6 day, and SVI frequently showed the value above 200 which was higher than the optimal range of 50～150. It is thought that the sludge is not in suitable condition for sedimentation caused by the incoming industrial wastewater. When industrial wastewater is come into the system, MLDO inside of bioreactor rapidly increased, rate of nitrification is steeply decreased, and Pin floc. is spilled in the secondary clarifier. In the observance of microorganism showed that various bacterial floc. and ciliata were found as well as actinomycetes and filamentous bacteria(Sphaeotilus) which is known to cause bulking. Efficiency of each unit operation was fairly good in average. However, efficiency of the bioreactor treatment showed high fluctuation by unstable operating condition by intermittently incoming industrial wastewater.

Key Words : Wastewater Treatment, Sewage mixed with Industrial Wastewater

1. 서 론

산업화와 급속한 인구의 도시집중화 현상 등으로 인하여 하·폐수의 배출량이 급증하게 되었으며, 미처리 상태로 배출시 방류수역의 수질악화를 초래하게 되었다. 이와 같은 방류수역의 수질 악화를 방지하기 위하여 방류수

*교신저자 : 안준수 (jsahn@daejin.ac.kr)
접수일 11년 05월 15일 수정일 (1차 11년 06월 12일, 2차 11년 06월 29일) 게재확정일 11년 07월 07일

수질기준을 설정하게 되었고, 또한 배출원들은 각각의 배출허용기준치 이하로 처리할 수 있는 하·폐수 처리시설을 설치하도록 하였다. 생활하수의 경우, 주로 주거지역, 상업시설 및 공공시설로부터 배출되며, 주요 함유성분으로는 부유물질, 생분해성 유기물, 질소 및 인 성분 등이다. 반면에 공장폐수의 경우, 업종과 공정에 따라 배출량과 함유성분이 천차만별이며 함유성분 중에 특히 난분해성 물질, 독성물질 및 중금속 등이 함유되어 있을 때에는 처리시 특별한 주위를 필요로 한다.

우리나라 하수처리시설들의 특징은 '90년대 이전까지 설치된 대부분의 시설들은 합류식 하수관거를 통하여 하수가 처리장으로 유입됨으로 인하여 우기시에는 우수가 다량 유입되었으며 또한 처리 구역내 소규모 공장들이 산재해 있을 경우, 이들 공장으로부터 배출되는 공장폐수 중 일부가 유입되곤 하였다.

이들 하수처리시설들에 적용된 처리공법들은 '90년대 중반 이전 까지는 부유물질과 생분해성 유기물을 주요 제거대상 물질로 한 표준활성슬러지 공법이 주로 적용되어 왔다. 하지만 방류수역의 하천과 호소 등에 녹조 및 적조 현상의 발생이 빈번하고 심각해짐에 따라, 이와 같은 부영양화 현상의 원인물질인 질소·인 성분에 대한 제거의 필요성이 절실하게 되었으며 '96년 이후 총질소와 총인 항목에 대한 방류수질 기준(T-N : 60 mg/L, T-P : 8 mg/L)을 정하여 규제하기 시작하였다. 이후 강화되어 현재는 총질소 20 mg/L, 총인 2 mg/L이며, 2012년 이후에는 총인의 경우 0.5 mg/L 이하로 대폭 강화될 예정이다. 이와 같이 방류수질기준이 강화됨에 따라 이에 대응하기 위하여 기존 또는 신설 하수처리시설들은 고도처리공법을 도입하여 운영하고 있으며 적용된 고도처리공법들은 주로 생물학적 질소·인 처리공법들이다.

한편, 중·소도시에 위치한 하수처리시설들은 생활하수뿐만 아니라 처리구역내에 소재한 공장들로부터 다양한 공장폐수가 유입되는 경우가 종종 발생하고 있다. 특히 영세한 소규모 공장들이 산재해 있는 경우, 불법적으로 하수관거를 통하여 공장폐수를 유입시키는 사례가 빈번히 발생하고 있다. 하지만 대부분의 하수처리장의 주처리공정은 생물학적 처리공법을 적용하고 있어서 이와 같이 공장폐수가 하수처리장내로 유입될 시, 함유성분의 특성에 따라 처리성능에 큰 영향을 미칠 수 있다. 즉, 독성 및 난분해성 물질 등이 함유된 공장폐수가 유입될 시 처리성능에 결정적 영향을 끼치는 활성미생물의 활성도에 악영향을 미쳐 정상운전을 곤경에 빠뜨릴 수 있다. 그러므로 이와 같이 공장폐수들이 유입되고 있는 하수처리장의 경우 이에 대한 적절한 대비책을 강구하여야 한다[1-4].

본 연구에서는 처리구역내 소규모 개별공장들이 산재해 있어서 공장폐수의 유입이 간헐적으로 이루어지고 있고 생물학적 고도처리공법이 적용되고 있는 하수처리장에 대하여 일정기간 동안 운전현황을 조사하고 각각의 단위 공정별 수질을 측정·분석하여 처리시설의 운전특성을 파악하고자 하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 생물학적 질소제거

질산화는 독립영양계 미생물인 질산화미생물의 에너지 대사과정이다. 즉, 미생물성장에 필요한 에너지는 주로 암모니아와 같은 질소화합물의 산화로부터 얻어지는데 종속영양 미생물과는 달리 질산화미생물은 유기탄소보다 탄산가스(무기탄소)를 새로운 세포의 합성에 탄소원으로 이용한다. 질산화미생물의 증식속도는 종속영양 미생물의 세포증식속도에 비하여 매우 느린 것으로 나타나고 있다. 암모니아성질소의 질산화는 각각 *Nitrosomonas*와 *Nitrobacter*의 2종류의 미생물이 관여하는 2단계로 되어 있다. 첫 번째 단계에서 암모니아성질소는 아질산성질소로 산화되며, 두 번째 단계에서 다시 질산성질소로 변환된다. 이들 반응에서 생산된 에너지는 세포성장과 유지에 사용한다. 총괄적인 산화와 합성반응은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$NH_4^+ + 1.83O_2 + 1.98HCO_3^- \rightarrow 0.021C_5H_7O_2N + 0.98NO_3^- + 1.04H_2O + 1.88H_2CO_3 \quad (1)$$

위 식에서 암모니아에서 질산염으로 산화되는데 필요한 산소량은 4.57 mgO_2/mgN이다. 암모니아 산화균인 *Nitrosomonas*와 아질산염 산화균인 *Nitrobacter*의 세포생산계수는 각각 0.05 ~ 0.29 $gVSS/gNH_3$, 0.02 ~ 0.08 $gVSS/gNO_2^-$ 이며, 설계시에는 보통 0.15 $gVSS/gNH_3$이 사용된다. 이러한 질산화는 저온에서 활성도가 급격히 떨어지고 독성물질에 의한 저해를 많이 받고 미생물 수율이 낮아 유기물을 분해하는 종속영양 미생물과의 성장경쟁에서 매우 불리한 조건에 있어, 보통의 하·폐수 처리에서 질소 제거에 어려움을 겪고 있는 상황이다.

질산화에 영향을 끼치는 인자들로는 온도, pH, 알칼리도, DO, 유기물부하 및 질산화 방해물질 등이 있다. 이들 인자들은 각각 독립적으로 질산화에 영향을 미치기 보다는 상호 복합적인 관계를 나타내면서 질산화에 영향을 끼친다. 독립영양 질산화 미생물의 최대 비성장율은 온도에 직접적으로 연관되어 있으며, 온도가 감소함에 따라

*Nitrosomonas*보다 *Nitrobacter*가 더욱 크게 영향을 받게 되어 저온에서 질산성 질소의 생성속도가 전체 질산화 속도를 결정하게 된다. 질산화에 있어 최적온도는 30℃로 알려져 있으나, 이 값은 실제로 하수처리시설에서는 너무 높은 값이며, 30 ℃일 때 기준, 25, 20, 10 ℃일 때, 각각 80, 60, 27 % 정도의 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, pH 5~5.5일 때 질산화는 더 이상 이루어지지 않으며, 질산화의 최적 pH는 8.4 정도이며, 이보다 높거나 낮을 때에는 질산화율이 감소하게 된다[5-7].

탈질화 반응은 무산소 상태에서 *Pseudomonas, Achromobacter, Bacillus, Micrococcus* 등의 임의성 종속영양 미생물에 의해 산화질소(NO_2^-, NO_3^-)를 분자상의 질소가스(N_2, N_2O, NO)로 환원시키는 과정을 말하며, 이 과정에서 전자공여체로 유기탄소원을 필요로 하며, 메탄올 기준으로 약 1.9 g/gNO_3^-을 필요로 한다. 일반적으로 폐수중의 COD/N의 비율이 3~6.6 범위에서 탈질이 일어나기에 적당한 비율이다. 외부 탄소원으로는 메탄올, 글루코스, 아세테이트 등이 있다.

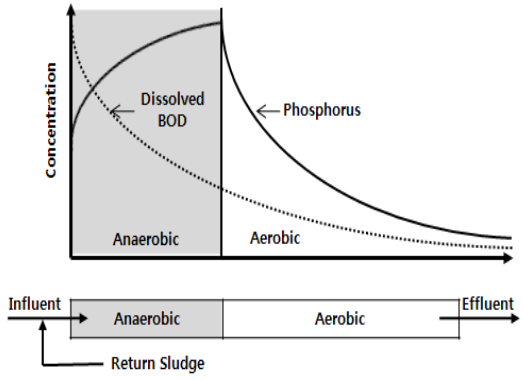
$$8NO_3^- + 5CH_3COOH \rightarrow 4N_2 + 10CO_2 + 6H_2O + 8OH^- \quad (2)$$

$$8NO_2^- + 3CH_3COOH \rightarrow 4N_2 + 6CO_2 + 2H_2O + 8OH^- \quad (3)$$

탈질과정에 있어 용존산소가 저해요인으로 작용하는 것은 통성혐기균에 의한 질산성질소의 환원속도가 산소호흡 속도에 비해 현저히 떨어지기 때문이다. *Pseudomonas* 탈질균의 경우 0.2 mg/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 생물학적으로 난분해성 물질도 충분한 발효를 통해 탄소원으로 사용 될 수 있다고 알려져 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 1~100 mgN/L 정도로 상당한 탈질이 일어날 수 있는 연구결과도 있다[7-9].

2.2 생물학적 인 제거

하·폐수처리장에서의 재래식 인 성분 제거방법은 화학적 응집침전공정이 보편적으로 이용되어 왔다. '80년대 이후 생물학적인 방법에 의한 인제거에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 일반 활성슬러지 공정에서 인은 미생물의 증식, 침전, 흡착 등의 기작에 의해 제거되며, 특히 미생물의 성장에 필요한 인 함량은 1~2 %로, 그 이상의 인이 제거되는 것을 생물학적 과잉 인 제거라 하고 이와 같은 현상을 생물학적 처리공법에 적용하고자 하였다. 즉, 일반적으로 받아들여지는 생물학적 인 제거 메카니즘은 미생물이 혐기-호기조건에 교차적으로 노출되면서 미생물종 간의 경쟁적인 기질 이용으로 인해 인을 축적하는 미생물의 선택이 일어난다는 것이다. 그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이, 혐기/호기가 교차되는 반응시스템에서 혐기상태에서는 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 종에 비하여 성장 속도면에서 우위에 있게 된다.



[그림 1] 혐기/호기조건 변화에 따른 인과 BOD의 제거 특성
[Fig. 1] Removal characteristics phosphorus and BOD according to the aerobic/anaerobic condition

이와 같이 활성슬러지를 혐기성조건과 호기성조건에 단속적으로 노출시킴으로써 보통 활성슬러지보다 인 함유율이 훨씬 더 높은 활성슬러지를 생성시킬 수 있다. 이러한 고농도의 인 함유 슬러지는 혐기성 조건하에서 인을 방출하고 호기성 조건하에서 더 많은 인을 섭취하므로서, 결과적으로는 보통 활성슬러지에서보다 인 농도가 높은 잉여활성슬러지를 폐기하여 인을 제거하게 된다. 생물학적 인 제거에서 아세테이트와 같은 저급지방산은 혐기성조건에서 발효반응의 결과로서 생성되고 세포내에서 PHB로 저장되며 이러한 기작은 *Acinetobacter*에 의한다. 또한 아세테이트는 호기조건에 이르를 때까지 세포내부에 PHB로 저장되며, 호기조건하에서 PHB는 신진대사되어지고 모든 이용 가능한 ortho-P의 섭취를 위한 에너지를 제공한다. PHB는 혐기성조건에서 세포 내로 들어가는 아세테이트나 프로피오네이트로부터 형성되며 세포성분의 50 %까지 달한다고 한다.

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

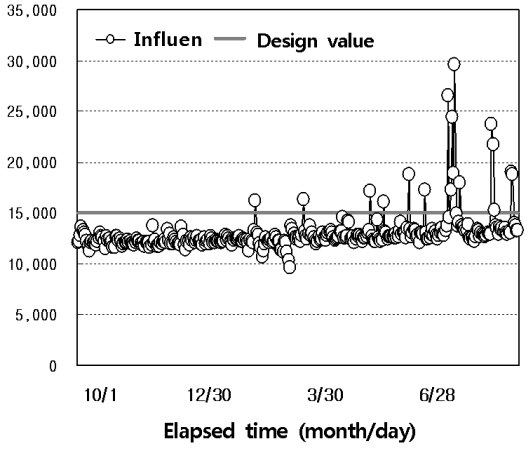
포기조의 DO 농도의 경우, 1.5～3.0 mg/L 정도를 유지해야만 질소와 인 동시제거 공정에서 인 제거율이 저하되지 않으며, DO 농도가 너무 낮으면 인 제거 효율과 질산화율이 저하되고, 반대로 DO 농도가 너무 높으면 무산소에 반송되는 혼합액의 DO 농도가 필요 이상으로 높게 되어 무산소조에서의 탈질에 악영향을 미치게 된다. 호기조에서 pH에 따른 인의 섭취속도 영향은 pH 7에서 가장 섭취속도가 빠르고 pH 6.5 이하에서는 일정하게 감소하는 결과를 보이다 pH 5.2 이하에서는 활성도가 거의 없어진다. 생물학적 인 제거 공정에 가장 큰 영향을 미치는 것은 유입수 중의 생분해성 유기물 농도인데, 이는 인 제거 공정이 종속영양 세균에 의해 이루어짐으로 이들의 성장을 위한 유기물질이 필수적이기 때문이다. 인 제거 실험을 한 결과, 아세트산이 생물학적 인 제거를 위해서 가장 우수한 유기물질로 나타났다[7,10-12].

3. 결과 및 고찰

대상 하수처리장은 시설용량 15,000 ㎥/일로서, 주처리공정이 생물학적 고도처리공법을 적용하였으며 최종처리단계로 여과시설을 설치하여 운전되고 있다. 유입하수 특성은 처리구역내 소규모 공장들이 산재해 있어 생활하수와 간헐적으로 공장폐수가 유입되어 처리되고 있었다.

3.1 유입하수 유량

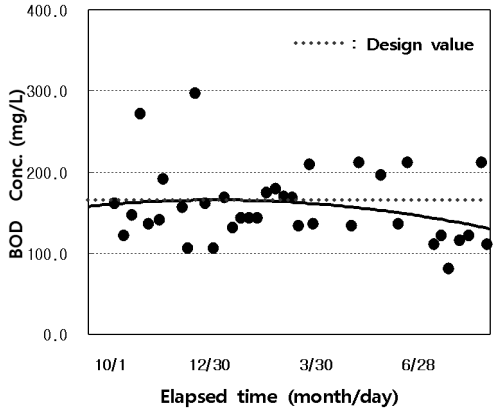
실험기간(11개월) 동안의 하수 유입 유량 측정결과를 아래 그림 2에 나타내었다. 유량측정은 현장(침사지와 1차침전지 사이)에 설치된 유량계로부터 직접 측정하였다. 월 평균 유입 유량은, 최고 15,045 m^3/일, 최저 12,128 m^3/일, 평균 12,929 m^3/일로 나타났으나, 하절기에는 간헐적으로 20,000 ㎥/일 이상의 하수가 유입되었고 일최대 유량이 29,630 m^3/일 까지 유입되고 있었다. 여름철 일시적으로 유입하수량이 증가하는 경향을 나타내었으며, 이와 같은 현상은 강우에 의한 영향으로 관측되었다.



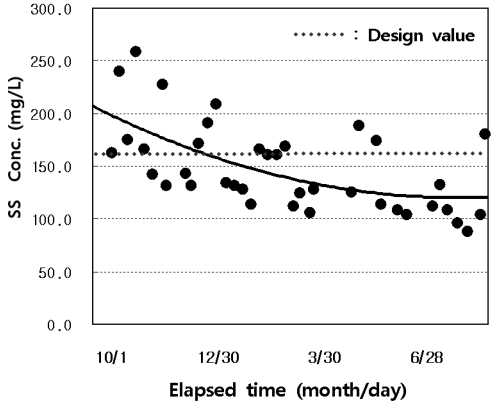
[그림 2] 하수 유입 유량 변화 특성
[Fig. 2] Characteristics of incoming wastewater flowrate

3.2 유입하수 수질특성

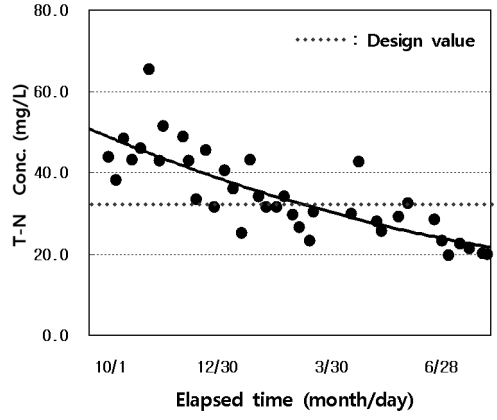
실험기간 동안 유입된 하수의 수질측정 결과를 아래 그림 3～6에 나타내었다. 각 항목들의 분석방법은 수질오염공정시험방법에 준하여 측정하였다. 유입수질 평균농도는 BOD 162, SS 148, T-N 34, T-P 3.1 mg/L으로서, 설계기준값인 각각 161, 160, 34, 5.6 mg/L와 비교하여 항목에 따라 비슷하거나 약간 낮은 농도값을 나타내었으나, 우기를 제외한 기간에서는 설계기준값보다 오히려 높은 농도를 나타내고 있었다. 한편, 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 각 측정항목 모두 수질 변동폭이 크게 나타났으며, 하절기로 접어들면서 전체적으로 유입농도가 낮아지는 경향을 나타내었다. 이와 같은 현상은 강우에 의한 우수 유입의 영향으로 관측되었다. 또한 수질 변동폭이 큰 요인은 분류식 하수관거에서의 짧은 하수 유달시간과 불규칙한 연계처리수 유입 등의 영향으로 시간대별 유입수질의 변동폭이 크게 나타나고 있었다.



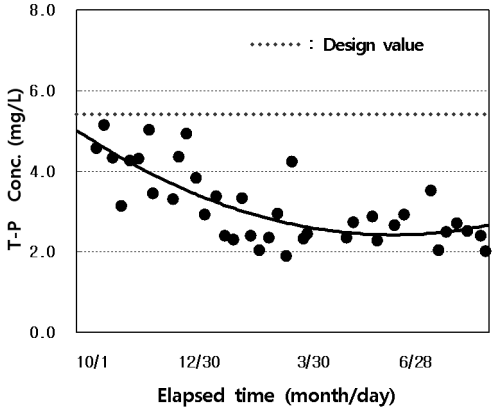
[그림 3] 유입수중 BOD 농도 변화 특성
[Fig. 3] Characteristics of BOD concentration of the influent



[그림 4] 유입수중 SS 농도 변화 특성
[Fig. 4] Characteristics of SS concentration of the influent



[그림 5] 유입수중 T-N 농도 변화 특성
[Fig. 5] Characteristics of T-N concentration of the influent



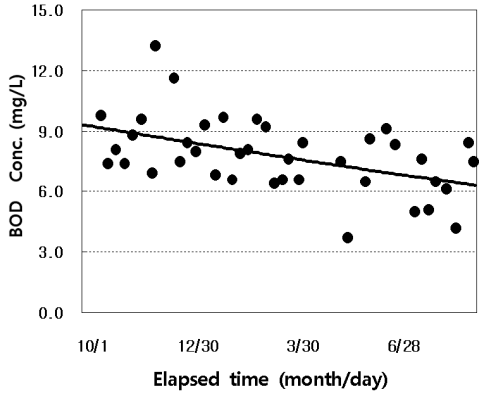
[그림 6] 유입수중 T-P 농도 변화 특성
[Fig. 6] Characteristics of T-P concentration of the influent

3.3 이차침전지 월류수 수질특성

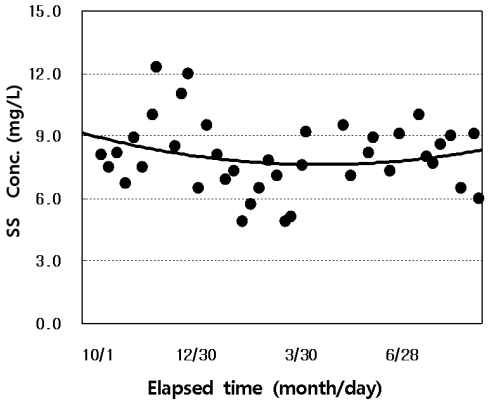
그림 7~10는 생물반응조 처리 후 이차침전지에서 월류되는 상등수의 수질 측정 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 측정값의 변동폭이 크게 나타나고 있었다. 이와 같은 현상은 생물반응조내에서의 운전특성의 불안정성에 기인한 것으로 판단되며, 그 주요 원인은 간헐적으로 유입되는 공장폐수의 영향으로 관측되었다.

즉 간헐적으로 공장폐수의 유입시 생물반응조 MLDO가 급격히 상승하고 질산화 효율이 빠르게 감소하며 이차침전지 슬러지침강성 저하 및 Pin floc.이 유출되는 현상을 나타내고 있었다. 공장폐수가 유입되어 충격부하로 인해 미생물의 사멸과 활성저하 등에 기인하여 MLDO 농도가 상승할 경우, 미생물 floc. 해체 및 자산화 현상을 방지할 수 있도록 생물반응조 공기공급량을 감소시키는 대응운전이 필요하다[6,7].

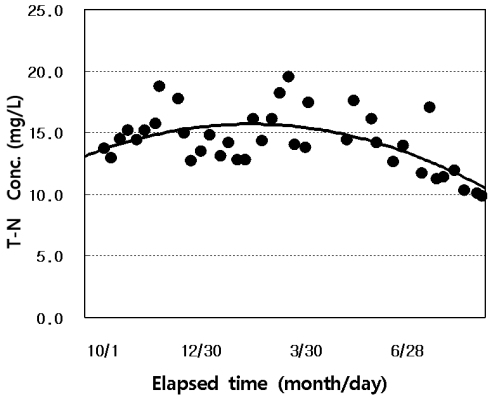
또한 통상적으로 공장폐수가 유입될 경우 유입수의 독성물질을 감지할 수 있는 사전 경보시스템을 설치하여 운영자가 빠르게 대처를 할 수 있도록 하는 것이 타당하다고 판단된다. 또한 일시적으로 유입되는 독성물질의 농도를 희석시켜 충격부하를 감소시키기 위한 유량조정조 설치를 검토하여야 할 것으로 판단된다. 또한 미처리된 공장폐수의 유입을 미연에 방지하여 하수처리장이 정상적으로 운영될 수 있도록 처리구역내 공장폐수의 무단방류 행위를 지속적으로 단속하여야 할 것이다.



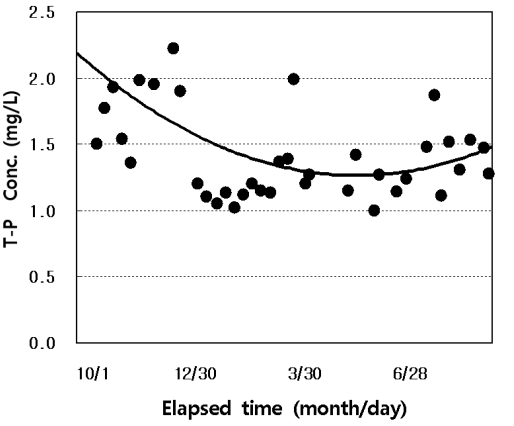
[그림 7] 이차침전지 월류수중 BOD 농도 변화 특성
[Fig. 7] Characteristics of BOD concentration of overflow in the secondary clarifier



[그림 8] 이차침전지 월류수중 SS 농도 변화 특성
[Fig. 8] Characteristics of SS concentration of overflow in the secondary clarifier



[그림 9] 이차침전지 월류수중 T-N 농도 변화 특성
[Fig. 9] Characteristics of T-N concentration of overflow in the secondary clarifier



[그림 10] 이차침전지 월류수중 T-P 농도 변화 특성
[Fig. 10] Characteristics of T-P concentration of overflow in the secondary clarifier

3.4 생물반응조 운전특성

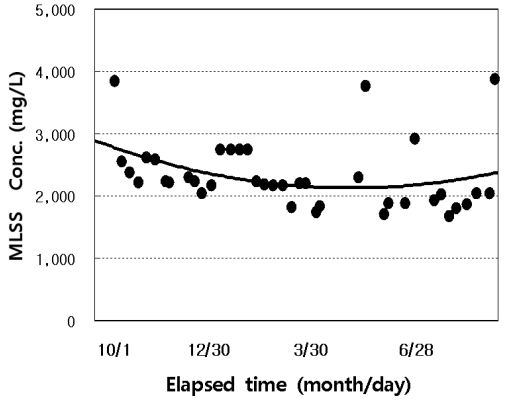
대상 하수처리시설에 설치된 생물반응조는 간헐포기 접촉산화조로 동일 반응조를 포기/비포기 교반을 반복하는 간헐포기공정과 유동상의 미생물담체를 투입하여 부유미생물과 부착미생물의 복합증식을 유도하는 공정이 결합되어 가동되고 있었다. 한편 표 1에는 생물반응조내 공정 운전 조건 및 특성값의 설계기준값이 수록되어 있다.

[표 1] 생물반응조내 공정 운전 조건 및 특성값
[Table 1] Operation conditions of bioreactor

Items	MLDO	MLSS	HRT	SRT	F/M Ratio
Unit	mg/L	mg/L	hr	day	KgBOD/ KgMLSS · d
Design value	2.0	3,300	10.1	12.6	0.089

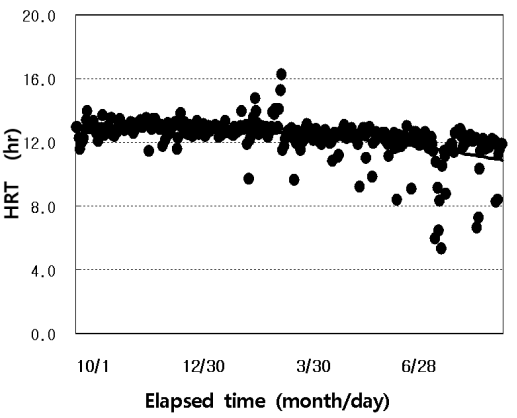
실험기간 동안의 생물반응조 운전모드는 1조, 3조 간헐포기, 2조, 4조 전면포기 운전으로 진행되었으며, 공장폐수 유입시 질산화 미생물의 활성저하로 급격하게 MLDO가 상승하며 이차침전지의 슬러지 부상현상이 발생하곤 하였다. 이에 대한 대책으로 공기공급량을 낮게 유지하여 미생물 자산화 방지 및 활성 유지를 위한 운전이 이루어졌다. 아래 그림 11~14에서는 실험기간 동안 월평균 생물반응조 운전현황에 대한 측정 분석 결과를 나타낸 것이다. 그림 11은 실험기간 동안 생물반응조내 MLSS 농도를 측정한 결과로서, 2,000~3,000 ㎎/L 범위로 유지되었다. 안정적인 수처리를 위해 최적 MLSS의 관리가 이루어져야 하며, 수온변화 및 유입부하에 대비하여

안정적인 수처리를 위해 최적 MLSS 농도를 산출하여 운전되어야 한다. 계절별 특징으로는 여름철 강우에 의한 우수 유입시, 유입하수량은 증가하나 유입농도가 감소하므로 유입조건에 맞는 F/M비 설정을 위해 MLSS 농도를 낮춰 적정 MLSS 농도 범위를 확보하여야 한다. 또한 동절기 수온이 낮아질 경우, 미생물 활성이 떨어지므로 질산화 미생물 활성 유지를 위해 공기공급량을 증가시켜 운전하고, 생물반응조 MLSS 농도를 높게 유지하여 유기물 분해 및 질산화 반응이 원활하도록 유도하여야 한다. 본 측정결과에서 가을과 겨울철에 수온 하강에 대비하여 MLSS 농도가 다소 높게 운전되고 있었으며, 여름철에는 종종 우수 유입에 따른 영향 등으로 낮은 농도를 나타내곤 하였다.



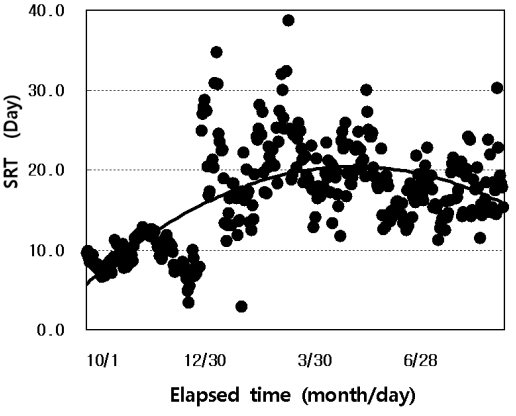
[그림 11] 생물반응조내 MLSS 농도 측정결과
[Fig. 11] Characteristics of MLSS concentration in the bioreactor

그림 12는 생물반응조내 HRT를 측정한 결과로서, 5.3~16.3 시간 범위로 운전되어 변동폭이 크게 나타났으며 평균 HRT는 12.3 시간으로서 설계치인 10.1 시간에 비해 다소 긴 체류시간으로 운전되었으나, 하절기로 접어들면서 강우에 의한 우수의 유입으로 점차 낮아져 최소 5.3 시간으로 가동되는 경우도 나타났다. 이와 같이 처리용량을 상회하여 시간 최대 유량인 22,500 ㎥/일을 상회하는 하수 유량을 생물반응조로 유입시킬 경우 정상적인 하수처리능력을 기대할 수 없다. 즉 유입 유량이 증가 할 경우, 이차침전지의 수면적 부하율을 가중시키므로 일시적으로 슬러지 계면상승으로 미생물 floc. 유출, 슬러지부상 현상 등으로 처리수에 악영향을 미칠 수 있다.



[그림 12] 생물반응조내 HRT 측정결과
[Fig. 12] Characteristics of HRT in the bioreactor

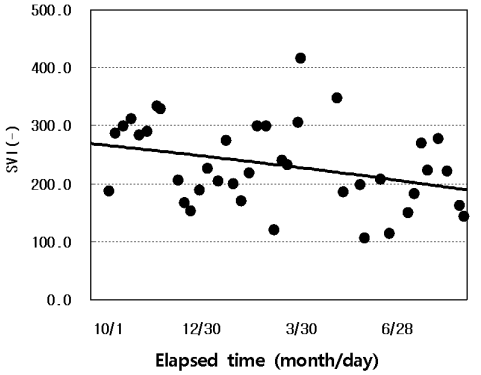
또한 유입 유량이 처리용량을 상회하여 유입될 경우, 생물반응조 체류시간 감소로 인해 유기물 산화 및 질산화 반응이 원활하게 일어나지 않으므로 공기공급량을 증가시켜 운전을 해야 한다. 일시적으로 이차침전지 슬러지 계면상승이 우려되므로 슬러지 반송율을 증가시켜 이차침전지 계면 상승에 대비하여야 한다. 하수도 시설기준에서는 활성슬러지 공법의 HRT는 6.0~8.0 시간으로 제시하고 있으며, 질산화 및 탈질·탈인 반응이 필요한 고도처리공정에서는 생물반응조 용량이 추가적으로 소요되므로 유입하수량 증가에 적절히 대비하여야 한다.



[그림 13] 생물반응조내 SRT 측정결과
[Fig.13] Characteristics of SRT in the bioreactor

그림 13은 생물반응조내 SRT를 측정한 결과로서, 실험기간 동안 2.8~66.6 일 범위로 변동폭이 크게 나타났다. 설계 SRT는 12.6 일로 동절기 수온저하에 따른 질산화 효율 감소 시 SRT를 길게 운전할 필요가 있으며, 수온

이 상승한 여름철에는 미생물의 증식속도가 빠르므로 SRT를 낮게 유지시킬 필요가 있다. 실험결과, 동절기에는 SRT를 길게 운전하여 수온저하에 대한 대비를 하였으나 변동폭이 크게 나타났으며, 여름철 유입하수량 증가 및 수온 상승으로 인한 미생물 증식율이 증가함에도 불구하고 겨울철보다는 감소하였으나 SRT를 다소 길게 유지하고 있었다.

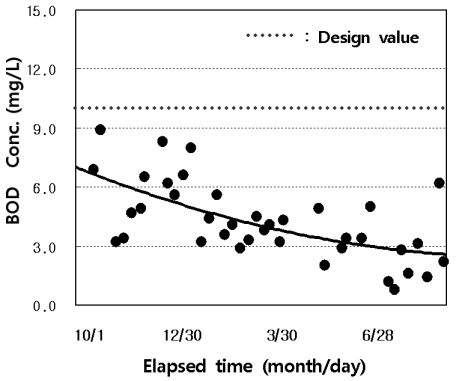


[그림 14] 생물반응조내 SVI 측정결과
[Fig. 14] Characteristics of SVI in the bioreactor

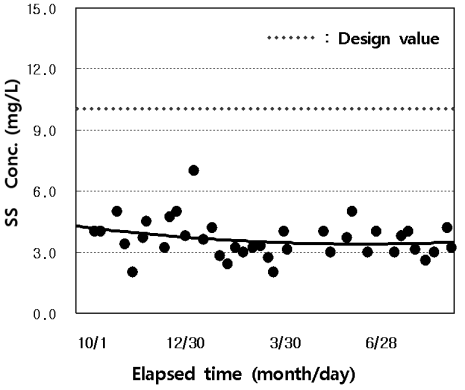
그림 14는 생물반응조내 MLSS의 SVI를 측정한 결과이다. SVI는 슬러지침강성의 지표로서 50~150의 범위가 최적 범위이다. 하지만 실험기간 동안의 측정값이 200을 상회하는 경우가 빈번히 발생하여 대체적으로 침강성이 양호하지 않은 것으로 측정되었다. 이와 같은 현상의 주요 원인은 간헐적인 공장폐수의 유입으로 인하여 슬러지 침강성에 상당한 영향을 미치는 것으로 관측되었다. 또한 슬러지 침강성은 유입하수 성상에 따른 지역적 요인과 계절적 영향이 있을 수 있으며, 최적의 슬러지 침강성 유지를 위해 적정 MLSS 유지관리, 슬러지 반송율 조절, SRT 조절 등 종합적인 최적의 운전상태를 유지하도록 하여야 한다.

3.5 최종방류수 수질특성

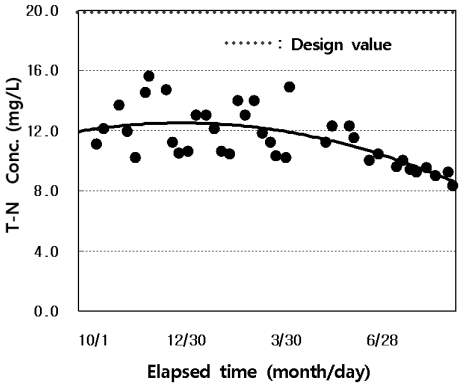
실험기간 동안 최종방류수질 측정결과를 아래 그림 15~18에 나타내었다. 방류수질 측정 분석 결과, 4개 항목 모두 방류수질기준 이내로 안정적으로 처리되었다. 이와 같이 간헐적인 공장폐수의 유입으로 인하여 생물학적 고도처리가 불안정하게 운전됨에도 불구하고 최종방류수질이 안정적으로 유지될 수 있었던 것은, 스컴 발생을 진동식 흡입장치로 지속적으로 제거하고 있었고, 최종적으로 여과설비를 적용하였기 때문으로 판단된다. 한편 계절적인 영향으로는 하절기로 접어들면서 강우에 의한 우수유입의 영향으로 유입 부하량이 크게 감소하여 방류수 농도 역시 다소 낮게 방류되는 경향을 나타내었다.



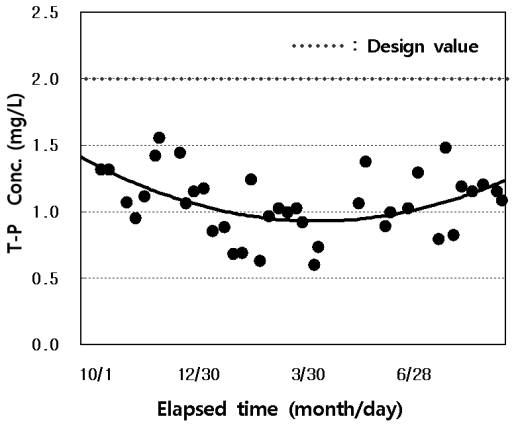
[그림 15] 최종 방류수중 BOD 농도 변화 특성
[Fig. 15] Variation of BOD concentration in the effluent



[그림 16] 최종 방류수중 SS 농도 변화 특성
[Fig. 16] Variation of SS concentration in the effluent



[그림 17] 최종 방류수중 T-N 농도 변화 특성
[Fig. 17] Variation of T-N concentration in the effluent



[그림 18] 최종 방류수중 T-P 농도 변화 특성
[Fig. 18] Variation of T-P concentration in the effluent

3.6 단위공정별 처리효율

각 단위공정별 평균 수질 측정 농도를 바탕으로 처리효율(%)을 환산하였다.

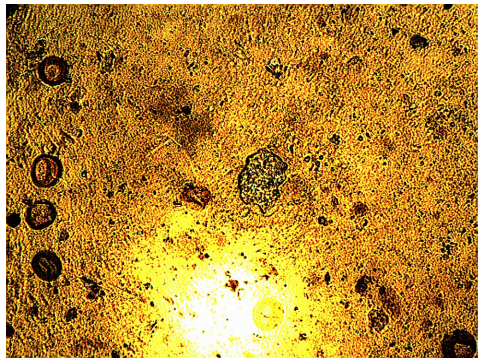
BOD의 경우, 1차침전지 29, 생물반응조 91, 최종방류수 49 %, T-N의 경우, 1차침전지 18, 생물반응조 45, 최종방류수 21 %, T-P의 경우, 1차침전지 19, 생물반응조 37, 최종방류수 26 % 등으로, 평균적으로는 각 단위공정별로 대체적으로 양호한 처리효율을 나타내고 있었으나, 생물반응조에서의 처리효율 변동성은 크게 나타나고 있었다. 이와 같은 원인은, 본 처리시설의 경우 간헐적으로 공장폐수가 유입됨으로 인하여 충격 부하가 가해져 급격히 상태가 악화되는 경우가 간헐적으로 발생하고 있었으며, 또한 이차침전지에서 미세 floc.(스컴)이 많이 발생됨에 기인하는 것으로 관측되었다.

3.7 미생물 관측 결과

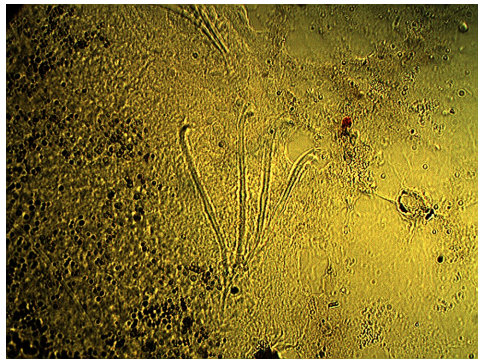
본 실험 대상 하수처리시설의 주처리공정은 미생물을 이용한 생물학적 고도처리공정으로서, 생물반응조내에는 세균, 원생동물, 조류 및 후생동물 등, 다양한 종류의 미생물군들이 공존하고 있었다.

아래 그림 19에서는 생물반응조내의 MLSS와 스컴을 검수하여, 현미경으로 미생물군에 대한 관측결과, 대표적인 미생물 사진을 수록하였다.

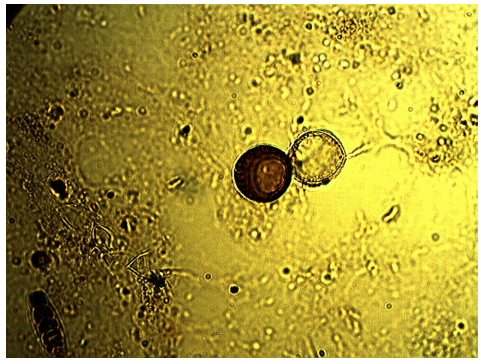
생물반응조에서는 다양한 세균플록과 섬모충류 등이 관찰되었다. 이와 같은 미생물들의 출현은 유기물 농도가 높은 상황에서 이를 분해하는 과정에서 흔히 발견 될 수 있는 미생물군들이다. 한편, 사상균의 일종인 Sphaeotilus가 관찰됨에 따라 bulking 현상이 나타날 우려가 있으므로 포기조 내의 산기관 위치 조절이나 포기량 증가 등을 통하여 사상균의 지나친 번식을 억제 할 필요가 있었다. 생물반응조와 이차침전지에서 나타난 스컴의 현미경 관측 결과는 일반적으로 포기조에 주로 분포하는 Zooglorea 이외에 방선균류가 반응조 스컴에서 관찰되었고 이차침전지에서는 사상균이 발견되었다. 방선균류와 사상균은 둘 다 비표면적을 높여 비중이 감소함으로 인하여 스컴 형성의 원인이 되는 종류들이다. 즉, 반응조에서 관찰되었던 사상균이 스컴을 형성하고 계속해서 이차침전지의 침강성 저하 원인을 제공하는 것으로 관측되었다[7].



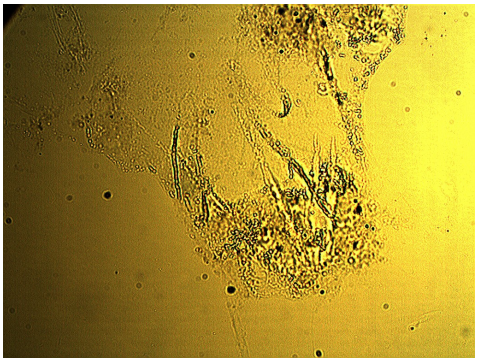
Bacteria-Zooglorea



Bacteria-Sphaeotilus



Protozoa-Ciliata-Colpidium



Filamentous bacteria

[그림 19] 생물반응조내 미생물 관측 사진
[Fig. 19] Photograph of microorganisms in the bioreactor

V. 결 론

본 연구는 간헐적으로 공장폐수가 유입되고 있는 하수처리시설에 대하여, 각 단위공정별 운전현황 조사 및 수질 측정을 실시하여, 운전 특성을 파악고자 하였다.

1. 월별 유입유량은 12,000～15,000 ㎥/일 범위로서 시설용량인 15,000 ㎥/일 이내로 유입되고 있었으나, 하절기에는 강우에 의한 영향으로 간헐적으로 설계용량을 초과하여 유입되어, 일최대 유량이 29,630㎥/일까지 유입되고 있었다.
2. 유입수질 평균농도는 BOD 162, SS 148, T-N 34, T-P 3.1 ㎎/L으로서, 설계기준값인 각각 161, 160, 34, 5.6 ㎎/L과 비교하여 항목에 따라 비슷하거나 약간 낮은 농도값은 나타내었으나, 우기를 제외한 기간에서는 설계기준값보다도 오히려 높은 농도를 나타내고 있었다.
3. 생물반응조 운전 특성은, MLSS는 2,000～3,000 mg/L 범위이었고, HRT는 5.3～16.3 시간 범위로 변동폭이 크게 나타났으며, 특히 하절기의 경우 최소 5.3 시간까지 짧아져 정상적인 하수처리 능력을 초과하고 있었다. SRT는 2.8～66.6 일 범위로 변동폭이 매우 크게 나타났으며 동절기에는 수온저하에 대비하여 SRT를 길게 운전하고 있었으나 변동폭이 크게 나타났다. SVI는 200 이상의 측정값이 빈번히 발생하여 슬러지 침강성이 양호하지 않은 것으로 측정되었으며, 주요 원인으로는 공장폐수의 유입에 기인한 것으로 관측되었다. 즉, 간헐적으로 공장폐수가 유입되어 생물반응조의 MLDO가 급격히 상승하고 질산화 효율이 빠르게 감소하며 이차침전지 슬러지 침강성 저하 및 Pin floc.이 유출되는 현상을 나타내고 있었다. 이에 대한 대책으로는 미생물 floc. 해체 및 자산화 현상을 방지 할 수 있도록 생물반응조 공기공급량을 감소시키는 대응운전이 필요하며, 유입수 독성물질 사전경보 시스템을 설치하고, 일시적으로 유입되는 독성물질의 충격부하를 감소시키기 위한 유량조정조 설치가 필요한 것으로 판단되었다.
4. 생물반응조 내의 MLSS 및 스컴 등에 대한 미생물 관측 결과, 생물반응조에서 다양한 세균 플록과 섬모충류 등이 관찰되었으나, 사상균의 일종인 Sphaeotilus가 관측되어 bulking 현상의 발생 우려가 있었다. 또한 스컴 관측 결과, 일반적으로 포기조에 분포하는 Zooglorea 이외에 침강성을 저하와 스컴의 원인이 되는 방선균류와 사상균이 발견되었다.
5. 단위공정별 처리효율은 1차침전지, 생물반응조, 최종방류수에 대하여, BOD의 경우 각각 29, 91, 49 %, T-N의 경우 18, 45, 21 %, T-P의 경우 19, 37, 26 % 등으로, 평균적으로는 각 단위공정별로 대체로 양호한 처리효율을 나타내었으나, 생물반응조에서의 처리효율 변동성은 크게 나타나고 있었다. 최종방류수 수질은 스컴 발생을 진동식 흡입장치로 지속적으로 제거하고 최종 여과설비를 적용하여 대체적으로 안정적인 수질상태를 나타내고 있었다.

기호 및 약어

F/M Ratio : Food/Microorganism Ratio
HRT : Hydraulic Retention Time
MLDO : Mixed Liquor Dissolved Oxygen
MLSS : Mixed Liquor Suspended Solid
SRT : Solid Retention Time
SVI : Sludge Volume Index

References

[1] J. S. Lee, “A Comparative Study on the Treatment Characteristics of Conventional and Intermittent Aeration Activated Sludge Process (1) On the Rational Design and the Change of BOD Loading”, J. of Korean Society of Environmental Engineering, Vol. 20, No. 9, pp. 1267 ~1278, 1998.

[2] J. B. Park, U. S. Choi, “The Removal of Nitrogen and Phosphorus with Step Feed Ratio in Multi-Stage BNR Process” J. of Korean Society of Environmental Engineering, Vol. 25, No. 5, pp. 624～631, 2003.
[3] S. W. Ahn, J. W. Park, et al., “Performance Evaluation of Advanced Municipal Wastewater Treatment by Advanced Phase Isolation Ditch (APID) Process”, J. of Korean Society on Water Quality, Vol. 24, No. 5, pp. 618～625, 2008.
[4] M. K. Kim, S. J. Seo, et al., “Pilot Study on the Advanced Treatment of Combined Wastewater with Sewage as a Cosubstrate”, J. of Korean Society on Water Quality, Vol. 25, No. 2, pp. 227~234, 2009.
[5] 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.
[6] Hyungseok, Y., Kyuhong, A., Hyungjip, L., Kwanghwan, L., Younjung, K. and Kyungguen, 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.
[7] Metcalf & Eddy, “Wastewater Engineering: Treatment and Reuse”, Fourth Ed., McGraw-Hill Book Co., New York, pp. 607～815, 2003.
[8] 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.
[9] 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.
[10] 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.
[11] 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.
[12] 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.

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 : 대진대학교 공과대학 환경공학과 교수
- 1998년 3월 ~ 2001년 2월 : 대진대학교 환경연구소 소장
- 2002년 2월 ~ 2004년 12월 : 대진대학교 산학협력원 원장
- 2005년 1월 ~ 2008년 4월 : 경기대진테크노파크 원장

<관심분야>
정수 및 하폐수 처리

박 욱 근(Wook-keun Park) **[정회원]**

- 1984년 2월 : 동국대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 2006년 2월 : 동국대학교 건설환경공학과 (공학석사)
- 2010년 2월 : 대진대학교 공과대학 토목환경전공 (공학박사 수료)
- 1984년 7월 ~ 2007년 7월 : GS 건설(주)
- 2007년 12월 ~ 현재 : SOC 사업시행자
- 2010년 9월 ~ 2011년 2월 : 대진대학교 토목공학과 시간강사

<관심분야>
하폐수 고도처리공정

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