

고도처리장의 Bioindicator

이찬형* · 문경숙¹ · 진익렬²

대구광역시 보건환경연구원, ¹대구광역시 환경시설공단, ²경북대학교 미생물학과

Bioindicator in Advanced Wastewater Plants. Lee, Chan-Hyung*, Kyung-Suk Moon¹, and Ing-Nyol Jin². Public Health and Environment Institute of Daegu City, 706-732, Korea, ¹Environmental Installations Corporation of Daegu City, 703-825, Korea. ²Department of Microbiology, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea – The occurrence and abundance of protozoa at advanced wastewater treatment plant were compared with operating parameters and effluent quality using statistical procedures. It seemed that plant operating conditions influenced the distribution of protozoa in the mixed liquor. In statistical analysis, the distribution of protozoa showed the operating condition of plant and predicted effluent quality. Once enough data concerning protozoa, operating parameters and effluent has been gathered, the operator has a valuable tool for predicting plant performance and near-future effluent quality based on microscopic examination. Plant operator manipulates operating conditions if he knows near-future effluent quality is deteriorating. Perhaps more importantly it can be used to actually control the plant to adjust the operating conditions to obtain the protozoal populations that have been shown to provide the best effluent quality.

Key words: 4-Stage BNR, DNR, protozoa, ciliates, bioindicator

국내의 하수처리장은 2003년 기준으로 242개소에 처리용량은 약 2천만 톤/일이다. 대부분의 하수처리방법은 미생물의 대사기능을 이용하여 유기성 오염물질 및 영양염류를 제거하는 생물학적 처리 방법으로, 활성슬러지 미생물상이 처리수의 수질을 결정하는 중요한 인자이다. 미생물을 처리장의 지표로 삼고자 하는 연구는 활성슬러지법 초기부터 시도되어 왔다. 활성슬러지의 대부분을 차지하는 세균은 수백종 이상이며 개체수는 $10^7 \sim 10^8$ CFU/ml 범위이며 세균동정은 많은 노력과 시간이 소요되고 관찰에 전문적인 지식을 필요로 하기 때문에 미생물분포에 의한 처리장 운영관리가 번거로운 일로 인식되어 현장에서 기피하는 경향이 있어 처리장 규모에서는 조사하기가 어렵다. 원생동물은 세균보다 크며 현미경을 이용한 형태학적 관찰만으로 동정이 가능하기 때문에 비전공자라도 쉽게 이용할 수 있어, 처리장의 정화기능과 유해물질의 유무를 판단하는데 유력한 방법이 될 수 있다. 외국[4, 13, 18]에서는 이러한 지표미생물에 대한 연구가 활발히 진행되어왔고 체계적인 연구나 문헌이 구축되어 있으나 국내에서는 황[8]이 서울지역 6개 식품공장을 대상으로 수질과 지표미생물의 분포를 조사하였고, 김[11]이 대구 달서천 하수처리장에서 수질지표와 원생동물과의 회귀분석을 수행하였고, 정 등[2]이 도시하수처리장과 6개소와 산업폐수처리장 5개소를 대상으로 연구하였으나 그 외에는 하·

폐수처리 관련 연구에서 미생물학적 지표에 관련된 보고는 적은 편이다. 이러한 자료들도 표준활성슬러지법 등 2차 처리방식 처리장의 연구결과로, 하천의 부영양화를 방지하기 위해 건설되고 있으며 2003년 기준으로 국내처리량의 16.9%를 처리하는 고도처리장의 자료는 문 등[16]과 이 등[12]의 자료 외에는 거의 없는 실정이다. 이번 연구에서는 고도처리장의 원생동물 분포를 조사하고 통계분석을 통해 처리장 운영조건과 처리수질의 예측을 위한 bioindicator로서 가능성을 분석하였다.

재료 및 방법

분석 시료

대구시에 위치한 달서천처리장 생활계열과 서부처리장을 대상으로 2003년 1월부터 12월까지 매주 단위로 분석하였다. 달서천 생활계열과 서부처리장은 생활하수와 전처리된 분뇨를 통합 처리하며, 분뇨투입량은 처리장별로 650 k/d, 1200 k/d이다. 달서천처리장의 고도처리공법은 4-stage BNR(Biological Nutrient Removal)공법이며 서부처리장은 DNR(Daewoo Nutrient Removal)공법이다. 4-stage BNR공법은 생물반응조(Bioreactor)를 전무산소조(Pre-anoxic tank)/혐기조(Anaerobic tank)/무산소조(Anoxic tank)/호기조(Oxic tank)로 나누고, 질산성 질소를 제거하기 위한 내부반송(Nitrifier Recycle)과 2차침전지 슬러지 반송(Return Activated Sludge)으로 구성되어 있다. 1차 침전 처리된 유입수의 10~15%가 전무산소조로 유입되어 반송슬러지(RAS)

*Corresponding author

Tel: 82-53-760-1324, Fax: 82-53-760-1334

E-mail: chlee@daegumail.net

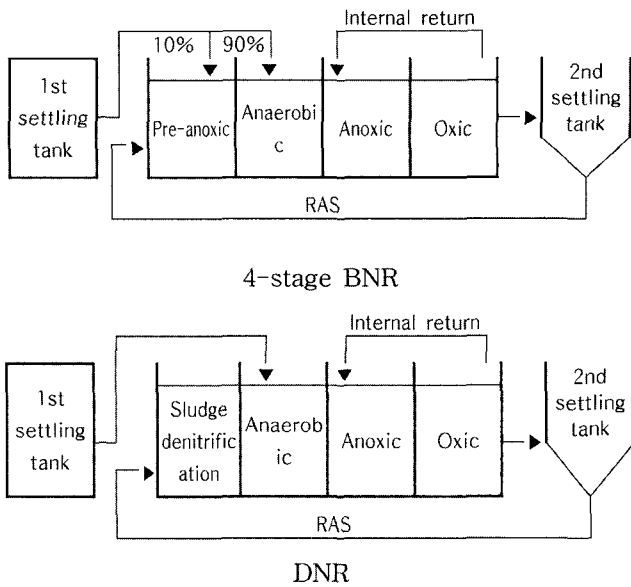


Fig. 1. Schematic diagram of advanced wastewater treatment plants.

에 포함되어 있는 질산성질소($\text{NO}_3\text{-N}$)를 제거함으로써 혐기성조에서 질산성질소에 의한 인 방출 저해작용을 억제할 수 있는 특징이 있다. DNR공법은 생물반응조를 슬러지탈질조(Sludge denitrification tank)/혐기조/무산소조/호기조로 나눈 구조이다. 반송슬러지를 하수 유입이 없는 첫째 혐기조(슬러지 탈질조)로 유입하여 내생호흡에 의한 탈질을 유도시켜 인 방출을 저해하는 질산성질소($\text{NO}_3\text{-N}$)를 제거함으로써, 두번째 혐기조에서 인 방출 저해작용을 억제할 수 있는 특징이 있다. 분석지점은 1차 침전 처리된 유입수, 호기조, 2차 침전 후의 유출수를 채수하여 분석을 하였다.

원생동물 동정 및 계수

원생동물 시료는 시료병에 1/2정도를 채워 넣어 공기와 접촉을 유지하도록 한 후 즉시 위상차현미경을 사용하여 검경하였으며 2시간이내에 완료되도록 하였다. 검경은 200x, 400x 배율로 관찰 동정하였으며 시료를 2회 측정하여 평균값을 계산하였다. 원생동물 및 미소후생동물의 동정은 Patterson의 분류[17]외에 일본하수도협회 분류기준[10]과 Jahn 등[9]의 자료를 참조하였고, 섬모충류는 Foissner 등[6]의 가이드를 추가로 참조하여 속(Genus)까지 동정하였다. 원생동물의 계수는 시료 0.05ml를 1000개의 구역이 나누어진 슬라이드 글라스에 놓고 90구역에 나타나는 수치를 평균하여 총구역수를 곱하였다. *Epistylis*속, *Opercularia*속 같이 군체를 형성하는 경우에는 각 개체를 1개체로 계수하였다.

이화학적 분석

생물반응조 유입수, 유출수 BOD, TN, TP와 생물반응조 MLSS는 환경부의 수질오염공정시험방법[15]에 의하여 시험

Table 1. The main characteristics of the two plants.

Characteristic	Advanced treatment plant	
	4-stage BNR plant	DNR plant
Influent BOD(mg/l)	66.8	76.4
Influent TN(mg/l)	28.4	25.6
Influent TP(mg/l)	1.97	2.24
Influent flow(m ³ /d)	77,759	117,879
MLSS(mg/l)	2,659	1,995
SVI	112.7	184.5
F/M(kgBOD/kgMLSS)	0.066	0.097
SRT(d)	24.7	20.8
HRT(hr)	9.4	8.0
Effluent BOD(mg/l)	5.3	4.1
Effluent TN(mg/l)	17.5	10.9
Effluent TP(mg/l)	1.06	1.27

하였다. BOD는 잉클러 - 아지드화나트륨 변법에 의해 5일 동안 소비된 용존산소량으로부터 계산하였다. 부유물질인 SS(Suspended Solid)는 유입, 유출수를 유리섬유여지(GF/C)로 여과한 후 항량으로 건조하여 무게를 달아 여과전후의 무게차를 산출하여 구하였다. 생물반응조내 미생물량을 나타내는 MLSS(Mixed Liquor Suspended Solid)는 생물반응조액을 유리섬유여지(GF/C)로 여과한 후 항량으로 건조하여 무게를 달아 여과전후의 무게차를 산출하여 구하였다. 슬러지 체류시간인 SRT(Sludge Retention Time)는 [생물반응조용적 × 생물반응조내 MLSS농도 ÷ 폐슬러지 농도 ÷ 폐슬러지 유량]으로 구하고, 생물반응조내 MLSS당 가해지는 BOD 무게인 F/M비는 [BOD농도 × 유입수량 ÷ MLSS농도 ÷ 생물반응조 용적]으로 계산하였다. 유입수량, 슬러지량 등 생물반응조 운전조건은 사업소의 자료를 참고로 하였다.

데이터 분석

원생동물 분포와 처리장 운영조건, 유출수 수질의 관계를 파악하기위한 통계분석은 SPSS Program(ver 11.0)을 이용하였다. 변수간의 관련성을 분석하여 공통성이나 배후의 특징을 가진 적은 수의 새 변수(요인)로 변형하여 용이하게 해석하기 위하여 요인분석법을 사용하였다. 분석에 사용한 변수는 처리장별로 95%이상의 출현빈도를 나타내는 원생동물 속과 주요한 운전변수를 대상으로 하였다. 요인의 선정은 scree plot에서 기울기가 완만해지는 지점의 요인까지 선정하였고, 요인적재량을 제공하여 합당한 공통분산(Communality)이 0.4이상인 경우만 분석하였다. 요인의 회전은 varimax방식으로 하여 요인간의 상호관련성이 없도록 독립성을 유지하면서 변수를 줄여 통계적으로 유의성이 있는 요인간의 분산의 형태를 해석하고자 하였다. 처리장 운영변수와 원생동물의 상관분석은 시료 채취일을 대상으로 하였고, 처리수질 항목 및 유기물 제거율과 원생동물의 상관관계는 시료 채취일을 기준으로 7일전부터 7일후까지의

자료를 대상으로 하여 원생동물의 분포가 지난 기간의 수질을 반영하고 가까운 미래의 수질변화를 예측할 수 있는지를 조사하였다. 상관계수가 0.4이상이거나 -0.4이하인 경우의 원생동물 종류를 나타내었으며, 상관계수가 0.3정도로 다소 낮더라도 유의도가 나타나면 포함시켰다.

결과 및 고찰

원생동물 분포

달서천처리장 생활계열의 연 평균 원생동물 분포는 편모

총류 3,725개체/ml(최소 216~최대13,680), 육질총류 377개체/ml(0~1,440), 섬모총류 7,399개체/ml(2,736~12,240)로 원생동물의 개체수가 11,501개체/ml(5,520~22,968)를 나타내며, 미소후생동물은 236개체/ml(0~720)로 전체 원생동물과 미소후생동물의 총 개체수는 11,737개체/ml(5,760~23,184)이었다. 원생동물 구성비는 편모총류 28.8%, 육질총류 3.6%, 섬모총류 65.4%로 원생동물이 97.8%를 차지하며 미소후생동물은 2.2%를 나타내었다. 월별분포를 보면 전체 개체수의 65.4%를 차지하는 섬모총류 분포형태에 따라 원생동물과 전체 개체수의 분포형태가 의존하며, 전체 개체수의 28.8%를

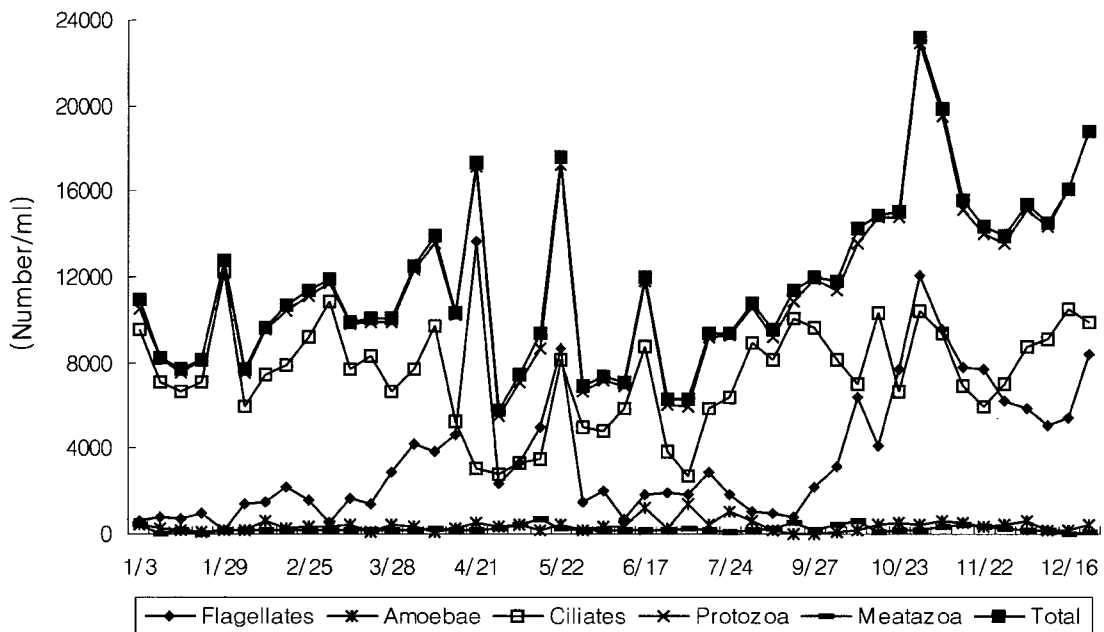


Fig. 2. Protozoa distribution at 4-stage BNR plant.

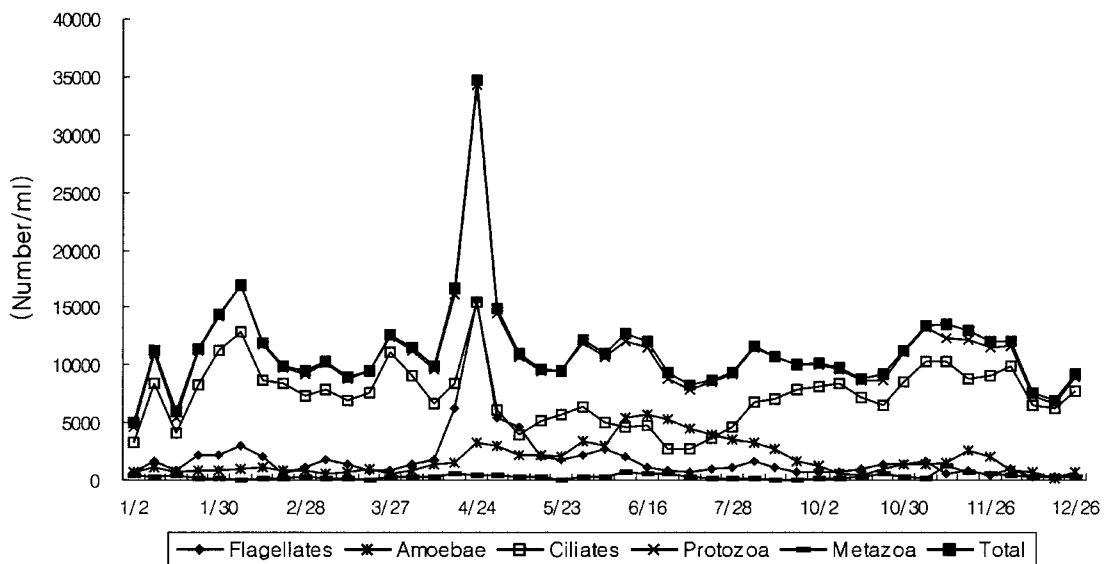


Fig. 3. Protozoa distribution at DNR plant.

차지하는 편모충류에 따라 다소 변동이 나타난다. 섬모충류와 편모충류의 개체수 증가가 일치하는 5월22일과 10월31일은 전체 개체수가 크게 증가하였으나 전반적으로 편모충류가 감소하면 섬모충류는 증가하였다. 편모충류는 4월21일 크게 증가하여 전체 개체수의 79%까지 차지한 적이 있다.

서부처리장은 연 평균 원생동물 분포가 편모충류 1,850개체/ml(최소 216~최대 15,660), 육질충류 1,849개체/ml(144~5,760), 섬모충류 7,330개체/ml(2,736~15,390)로 원생동물의 개체수가 11,029개체/ml(4,608~34,290)를 나타내며, 미소후생동물은 274개체/ml(0~1,224)로 전체 원생동물과 미소후생

동물의 총 개체수는 11,303개체/ml(5,040~34,740)이었다. 원생동물 구성비는 편모충류 16.4%, 육질충류 16.4%, 섬모충류 64.8%로 원생동물이 97.6%를 차지하며 미소후생동물은 2.4%를 나타내었다.

두 처리장의 섬모충류와 미소후생동물의 구성비는 비슷하였고, 서부처리장의 편모충류와 육질충류의 구성비는 비슷하나 달서천 생활계열에서는 편모충류의 구성비가 육질충류보다 7배 정도 높게 나타났다. 섬모충류 비율이 65%전후로 활성슬러지법에서 원생동물의 70%가 섬모충류라는 Curds의 연구[3]보다 다소 낮지만, 섬모충류 개체수는 7×10^6 개체//

Table 2. Abundance and occurrence of protozoa and their rank.

Genus	4-stage BNR		DNR		Genus	4-stage BNR		DNR	
	Number	Abundance (%)	Number	Abundance (%)		Occurrence (%)	Rank	Occurrence (%)	Rank
<i>Aspidisca</i>	3,081	26.3	2,507	22.2	<i>Aspidisca</i>	100	1	98	2
<i>Poterialodendron</i>	1,666	14.2	603	5.3	<i>Trachelophyllum</i>	98	2	98	2
<i>Trachelophyllum</i>	1,345	11.5	1,947	17.2	<i>Vorticella</i>	98	2	98	2
<i>Epistylis</i>	875	7.5	627	5.5	<i>Cinetochilum</i>	96	4	100	1
<i>Pleuromonas</i>	775	6.6	100	0.9	<i>Oikomonas</i>	96	4	91	7
<i>Cinetochilum</i>	722	6.2	499	4.4	<i>Pleuromonas</i>	93	6	40	18
<i>Oikomonas</i>	613	5.2	546	4.8	<i>Monas</i>	89	7	91	7
<i>Vorticella</i>	605	5.2	1,159	10.3	<i>Rotaria</i>	87	8	56	15
<i>Monas</i>	415	3.5	418	3.7	<i>Poterialodendron</i>	85	9	22	22
<i>Childonella</i>	245	2.1	54	0.5	<i>Litonotus</i>	83	10	91	7
<i>Rotaria</i>	159	1.4	87	0.8	<i>Childonella</i>	80	11	44	17
<i>Litonotus</i>	151	1.3	262	2.3	<i>Epistylis</i>	74	12	96	5
<i>Bodo</i>	136	1.2	65	0.6	<i>Euglypha</i>	67	13	69	14
<i>Amoeba</i>	131	1.1	176	1.6	<i>Peranema</i>	59	14	40	18
<i>Euglypha</i>	117	1.0	246	2.2	<i>Arcella</i>	57	15	93	6
<i>Peranema</i>	113	1.0	63	0.6	<i>Lecane</i>	57	15	73	12
<i>Drepanomonas</i>	85	0.7	30	0.3	<i>Amoeba</i>	54	17	73	12
<i>Arcella</i>	81	0.7	788	7.0	<i>Chaetospora</i>	46	18	53	16
<i>Lecane</i>	69	0.6	174	1.5	<i>Tokophyra</i>	43	19	20	23
<i>Coleps</i>	60	0.5	75	0.7	<i>Drepanomonas</i>	35	20	18	24
<i>Chaetospora</i>	58	0.5	68	0.6	<i>Coleps</i>	33	21	33	21
<i>Paramecium</i>	46	0.4	3	0.0	<i>Paramecium</i>	30	22	4	28
<i>Tokophyra</i>	44	0.4	26	0.2	<i>Pyxidicula</i>	28	23	87	10
<i>Pyxidicula</i>	40	0.3	342	3.0	<i>Podophyra</i>	24	24	0	35
<i>Opercularia</i>	31	0.3	3	0.0	<i>Bodo</i>	22	25	40	18
<i>Podophyra</i>	23	0.2	0	0.0	<i>Amphileptus</i>	17	26	0	35
<i>Amphileptus</i>	14	0.1	0	0.0	<i>Opercularia</i>	7	27	2	31
<i>Actinophrys</i>	5	0.0	297	2.6	<i>Actinophrys</i>	7	27	84	11
<i>Sphaerophrya</i>	5	0.0	6	0.1	<i>Euplotes</i>	7	27	7	26
<i>Euplotes</i>	5	0.0	14	0.1	<i>Sphaerophrya</i>	4	30	4	28
<i>Dyplogaster</i>	4	0.0	3	0.0	<i>Dyplogaster</i>	4	30	2	31
<i>Blepharisma</i>	3	0.0	0	0.0	<i>Blepharisma</i>	4	30	0	35
<i>Aeolosoma</i>	3	0.0	0	0.0	<i>Aeolosoma</i>	4	30	0	35
<i>Entosiphon</i>	2	0.0	55	0.5	<i>Entosiphon</i>	2	34	7	26
<i>Chaetonotus</i>	2	0.0	6	0.1	<i>Chaetonotus</i>	2	34	4	28
<i>Vaginicola</i>	0	0.0	45	0.4	<i>Vaginicola</i>	0	36	13	25
<i>Prorodon</i>	0	0.0	3	0.0	<i>Prorodon</i>	0	36	2	31

로 정상 가동하는 처리장의 섬모충류 개체수는 약 10⁶개체/리라는 Madoni의 연구[14]결과보다 많았다.

Sphaerophrya, *Prorodon*같이 출현빈도가 5%미만인 경우는 처리장에서 정상적으로 증식하는 원생동물이라고 보기 어렵고 장마철 같이 유입수 성상이나 운전조건이 급변하는 경우에 일시적으로 출현하는 원생동물로 판단된다.

개체수 분포는 출현빈도가 높으면 개체수도 많은 편으로 관찰되었다. *Aspidisca*, *Trachelophyllum*, *Vorticella*, *Cinetochilum*, *Oikomonas*, *Epistylis*의 출현빈도는 95%이상이었다. 활성슬러지의 원생동물 분포에 영향을 미치는 요인은 유입수 성상과 처리장의 운영조건 외에도 미생물사이의 종간, 종내 상호작용, 독성물질의 유입, 수온, 강우 등이 있으나 유입수 성상과 처리장의 운영조건이 가장 주요하다고 알려져 있다. Al-shahwani 등[1]은 공업폐수가 유입되는 처리장과 하수가 유입되는 처리장의 운영조건이 비슷한데도 원생동물의 분포가 다름을 발견하였다. Al-shahwani 등[1]은 이러한 원생동물분포가 처리장에 특징적인지, 유입수의 성상에 의해 단독으로 결정되는지를 모른다고 보고하였다. 이번 연구에서는 생활하수와 전처리된 분뇨가 섞여 들어오는 유입수의 성상은 비슷한데도, 원생동물 분포는 달라지는데 처리장 운전조건이 다른 것이 원생동물의 구성에 영향을 미치는 것 같다.

한 처리장내에서 원생동물의 연간 분포 원인도 유입수 성상, 미생물간의 상호작용, 수온, 운영조건 등이다. 처리장내에서 유입수 성상은 연간 변화보다 시간 변화가 심하고, 월별평균 유입수질도 크게 변화하지는 않는다. 유입수량, HRT,

SRT 등 같은 운영조건은 처리장의 사정에 따라 일시적으로는 크게 변할 수 있지만 연간 크게 변화하는 것은 아니다. 환경요인 중에서 가장 크게 변동하는 것은 수온으로 최저와 최고사이에 달서천 생활계열은 19.0°C, 서부처리장은 16.7°C의 차이가 있다. 수온은 세균이나 원생동물의 증식속도에 큰 영향을 미치므로 저온시 증식속도가 작은 생물은 활성슬러지에서 생존할 수 없다. 미생물의 대사활성도 온도에 의존하고 있으므로, 수온의 변화에 따라 활성슬러지에 존재하는 유기물의 농도 및 존재형태가 다르게 된다. 이와 같이 수온의 변화에 따라 환경조건이 변화하게 되면, 미생물간의 상호작용에 큰 영향을 미치게 된다. 즉 수온이 세균의 대사 및 증식에 영향을 주고, 변화된 세균 분포에 적합하게 원생동물 분포가 이루어진다.

요인분석

요인분석에서는 처리장별로 4개씩의 요인을 얻었다. 4-stage BNR공법 처리장인 달서천 생활계열의 요인 1은 원생동물과 관련이 없고 운전조건과 관련이 있었다. 유입수량과 수온이 감소하는 겨울철에 유입수의 TP농도가 증가하고 수리학적체류시간이 긴 상태를 나타낸다. 요인 2는 유입수 TN과 SVI와 관련이 있으며, SVI와 *Cinetochillum*, *Oikomonas*의 관련성은 상관분석과 동일하다. 요인 3은 유입수의 BOD 농도가 높아져 F/M비가 높은 상태로 *Trachelophyllum*의 생육이 저해된다. 요인4는 MLSS와 관련 있으며, 수온이 낮은 겨울철 MLSS을 높게 유지하는 것을 나타낸다. MLSS가 증가하면 *Vorticella*도 증가하는 것으로 상관분석과 일치한다.

Table 3. Rotated component matrix.

4-stage BNR plant	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	DNR plant	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
<i>Aspidisca</i>	-	-	-	-	<i>Aspidisca</i>	0.244	-	0.886	-
<i>Trachelophyllum</i>	-	0.334	-0.320	-	<i>Trachelophyllum</i>	0.221	0.276	-	-
<i>Vorticella</i>	-	-	-	0.817	<i>Vorticella</i>	-	0.233	-	-
<i>Cinetochilum</i>	-	0.668	-	-	<i>Cinetochilum</i>	-0.290	-0.361	-0.724	0.222
<i>Oikomonas</i>	-	0.787	-	-0.220	<i>Epistylis</i>	-	-	-	-
Influent BOD	0.315	-	0.865	-	Influent BOD	0.724	0.598	-	0.233
Influent TN	-	0.758	-	-0.208	Influent TN	0.823	0.305	-	-
Influent TP	0.616	-	0.438	-0.213	Influent TP	0.798	0.461	0.215	-
Influent flow	-0.942	-	-	-	Influent flow	-0.957	-	-	-
Temperature	-0.568	-0.209	-	-0.608	Temperature	-0.769	-	-0.261	-0.406
DO	-	-	-	-	DO	-0.354	-	-0.432	0.499
MLSS	-	-	-0.249	0.796	MLSS	0.856	-0.313	-	0.243
SVI	0.422	0.732	-	-	SVI	0.532	-	0.395	0.416
Return rate	0.389	0.232	-	-	Return rate	0.904	-	0.217	-
F/M	-0.316	-	0.881	-0.266	F/M	-	0.922	-	-
SRT	0.254	0.225	-0.437	-	SRT	-0.215	-	-	-0.863
HRT	0.930	-	-	-	HRT	0.961	-	-	-
Eigen value	3.644	2.897	2.410	1.431	Eigen value	7.599	2.259	1.732	1.346
Accumulated variance %	21.44	38.48	52.66	61.08	Accumulated variance %	44.70	57.99	68.18	76.10

DNR공법 처리장인 서부처리장의 요인 1은 4-stage BNR처리장의 요인 1과 요인 적재값이 유사한 형태를 나타내나 원생동물 속에도 요인 적재치를 나타낸다. 유입수량과 수온이 감소하는 겨울철에 유입수의 농도가 증가하고 MLSS을 높게 유지하기 위해 반송량을 증가하는 상태를 나타내며, *Aspidisca*와 *Trachelophyllum*은 이런 조건에 생육이 촉진된다. 요인 2는 4-stage BNR처리장의 요인 3과 유사하며, 유입수의 농도가 높아져 F/M비가 높은 상태로 *Trachelophyllum*, *Vorticella*의 생육이 촉진된다. 요인 3은 DO와 관련이 있는 항목으로 *Aspidisca*와 *Cinetochillum*은 높은 요인 적재치를 나타내며, 두 속의 관계는 상관관계의 결과와 일치한다. 요인 4는 SRT와 관련 있으며, 상관분석에서는 나타나지 않았으나 SRT가 길어지면 *Cinetochillum*의 생육은 저해 받는 것으로 판단된다.

두 처리장의 요인분석결과 요인적재량의 형태와 요인의 해석이 유사하였다. 4-stage BNR과 DNR 처리공법이 유사하고, 생활하수와 전처리된 분뇨가 섞인 유입수의 성상이 비슷하여 처리장운영에 관여하는 요인이 비슷하게 나타난 것으로 판단된다.

상관분석

처리장 운영조건과 원생동물 종류의 상관분석에서 운영조건별로 상관성이 있는 종류는 처리장별로 다르게 나타났다.

달서천 생활제열에서는 *Chilonella*가 DO와 음의 상관관계 ($p < 0.05$)를 나타내 *Chilonella*는 호기조의 DO가 낮음을 나타내는 지표미생물로 사용가능하다. SVI와는 *Pyxidicula*

가 음의 상관($p < 0.05$)을 나타내고, *Epistylis*, *Peritrichs* 같은 고착형 섬모충류는 양의 상관을 나타내었다. 반송율이 증가하면 원생동물과 총 개체수가 증가하였고, *Amphileptus*는 SRT와 음의 상관을 나타내었으나 유의도는 나타나지 않았다.

서부처리장에서는 유입수량이 증가하면 *Arcella*, *Pyxidicula*, *Euglypha*같은 유각아메바류가 증가하였고, *Aspidisca*같은 포복형이나 *Vorticella*같은 고착형 섬모충류는 DO에 음의 관계 ($p < 0.05$)를 나타내어 호기조내 DO농도를 알려준다. 서부처리장은 *Poteroiodendron*이 자주 나타나는데, F/M, SRT와 모두 음의 상관을 나타낸다. 유입수의 유기물양이 많으면 *Poteroiodendron*은 개체수가 적어진다. *Arcella*, *Pyxidicula*, *Euglypha*같은 유각 아메바류는 HRT와 반송슬러지 반송율에서 강한 음의 상관관계 ($p < 0.01$, $p < 0.05$)를 나타내었다. 각 처리장은 고유한 유입수의 성상을 지니며, 운전조건의 범위도 다르게 운전되므로, 운전항목에 대한 원생동물의 상관성이 다르게 나타나는 경우가 발생한다. 처리장별로 상관성이 다르게 나타남으로 여러 처리장의 공통지표로 사용하기 위해 상관계수나 유의도가 낮은 지표를 개발하기보다는 단일 처리장의 지표로 사용하더라도 상관계수나 유의도가 높은 지표를 사용하는 것이 처리장의 효율적 운영에 기여한다고 판단된다.

원생동물과 유출수의 BOD등 수질항목과 BOD제거율등 유기물 제거율의 상관분석결과도 처리장 별로 다르게 나타났다. BOD와 음의 상관관계를 가지고 BOD제거율과는 양의 상관관계를 가지는 경우같이 수질항목과 제거율의 상관성이 반대로 나오는 경우가 지표로 가능성이 있다. 그러나 수

Table 4. Correlation between operating parameter and protozoa at 4-stage BNR plant.

Operating parameters	Taxa	
	Positive correlation	Negative correlation
Flow	<i>Peranema</i> *, <i>Monas</i> *, <i>Testate amoebae</i> *, <i>Litonotus</i> *, <i>Pyxidicula</i> , <i>Coleps</i> , <i>Tokophyra</i> *, <i>Paramecium</i>	Oligohymenophora*, <i>Peritrichs</i> *
Temp.	<i>Peranema</i> ***, <i>Pyxidicula</i> , <i>Drepanomonas</i> , <i>Chaetospora</i> , Metazoa**	<i>Vorticella</i> ***, <i>Epistylis</i> ***, <i>Oligohymenophora</i> ***, <i>Peritrichs</i> **
DO		<i>Amphileptus</i> , <i>Chilonella</i> *
MLSS	<i>Litonotus</i> *, <i>Amphileptus</i> , <i>Vorticella</i> **	<i>Oikomonas</i> *, <i>Monas</i> *, <i>Bodo</i> , <i>Pleuromonas</i> ***, <i>Bodonoids</i> ***, <i>Paramecium</i>
SVI	<i>Oikomonas</i> ***, <i>Bodonoids</i> *, <i>Flagellates</i> *, <i>Cinetochillum</i> *, <i>Epistylis</i> ***, <i>Oligohymenophora</i> ***, <i>Peritrichs</i> ***, <i>Hymenostomes</i> **, <i>Ciliates</i> ***, <i>Protozoa</i> ***, <i>Total number</i> **	<i>Pyxidicula</i> *, <i>Chaetospora</i> **
Return rate	<i>Oikomonas</i> *, <i>Bodo</i> , <i>Pleuromonas</i> ***, <i>Bodonoids</i> ***, <i>Flagellates</i> ***, <i>Amoeba</i> ***, <i>Amphileptus</i> , <i>Podophyra</i> , <i>Protozoa</i> ***, <i>Total number</i> **	<i>Pyxidicula</i> , <i>Euglypha</i> *
F/M	<i>Pleuromonas</i> *, <i>Euglypha</i> *	<i>Amphileptus</i>
SRT		<i>Amphileptus</i>
HRT	Oligohymenophora*, <i>Peritrichs</i> *	<i>Peranema</i> *, <i>Monas</i> *, <i>Pyxidicula</i> , <i>Litonotus</i> *, <i>Tokophyra</i> *, <i>Paramecium</i> ,

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

질항목과 제거율의 상관성이 동일하게 나타나거나, 수질항목과 제거율의 한 부문에서만 상관성이 나타나는 경우가 많았다. 시료채취일 7일전부터 7일후까지의 상관성이 양이나 음으로 일정하게 나타나고, 수질항목과 제거율의 상관성이 반대로 나타나 처리장별 수질지표로 사용될 수 있는 원생동물 종류를 나타내었다(Table 4).

달서천 생활계열은 BOD와 COD에 상관관계를 나타내는 원생동물 종류가 많았다. *Poteriodendron*, *Oikomonas*, *Pleuromonas*, Bodonoids, Chrysophytes, Flagellates, Haptorids, Prostomes, Protozoa, Metazoa, Total number는 BOD제거율과 양의 상관관계를 나타내었으며, COD제거율과는 *Epistylis*, *Oligohymenophora*, *Peritrichs*가 양의 상관관계를

Table 5. Correlation between operating parameter and protozoa at DNR plant.

Operating parameters	Taxa	
	Positive correlation	Negative correlation
Flow	<i>Arcella</i> **, <i>Pyxidicula</i> **, <i>Euglypha</i> **, <i>Amoebae</i> , <i>Testate amoebae</i> **, <i>Coleps</i> **, <i>Prorodon</i> , <i>Drepanomonas</i> , <i>Prostomes</i> **	<i>Pleuromonas</i> *
Temp.	<i>Arcella</i> **, <i>Pyxidicula</i> *, <i>Euglypha</i> **, <i>Amoebae</i> **, <i>Testate amoebae</i> **, <i>Coleps</i> **, <i>Prorodon</i> , <i>Euplotes</i> , <i>Prostomes</i> **	<i>Poteriodendron</i> **, <i>Actinophrys</i> *, <i>Monas</i> **, <i>Aspidisca</i> **, <i>Hypotrichs</i> **, <i>Ciliates</i> *
DO	<i>Bodo</i> **, <i>Bodonoids</i> *, <i>Arcella</i> **, <i>Euglypha</i> **, <i>Amoebae</i> **, <i>Testate amoebae</i> **, <i>Prorodon</i> , <i>Drepanomonas</i> , <i>Cinetochillum</i> *, <i>Hymenostomes</i> *	<i>Aspidisca</i> *, <i>Vorticella</i> *, <i>Peritrichs</i> *, <i>Hypotrichs</i> *, <i>Ciliates</i> **
MLSS	<i>Pleuromonas</i>	<i>Arcella</i> *, <i>Pyxidicula</i> *, <i>Amoebae</i> *, <i>Testate amoebae</i> **, <i>Coleps</i> *, <i>Euplotes</i> , <i>Prostomes</i> *
SVI	<i>Vorticella</i> *, <i>Aspidisca</i> **, <i>Hypotrichs</i> **	<i>Bodonoids</i> **, <i>Arcella</i> **, <i>Pyxidicula</i> *, <i>Euglypha</i> **, <i>Testate amoebae</i> **, <i>Amoebae</i> **, <i>Coleps</i> , <i>Prorodon</i> , <i>Euplotes</i> , <i>Prostomes</i> **
Return rate	<i>Pleuromonas</i> *	<i>Arcella</i> **, <i>Pyxidicula</i> **, <i>Euglypha</i> *, <i>Testate amoebae</i> **, <i>Amoebae</i> **, <i>Drepanomonas</i> , <i>Cinetochillum</i> *, <i>Hymenostomes</i> *, <i>Prostomes</i> *
F/M	<i>Coleps</i> , <i>Actinophrys</i> *, <i>Litonotus</i> **, <i>Drepanomonas</i> *, <i>Euplotes</i>	<i>Poteriodendron</i> , <i>Cinetochillum</i> *, <i>Vorticella</i> **, <i>Oligohymenophora</i> **, <i>Hymenostomes</i> *, <i>Peritrichs</i> *
SRT	<i>Chaetospira</i> **, <i>Cyrtophores</i> **	<i>Poteriodendron</i>
HRT	<i>Pleuromonas</i> *	<i>Arcella</i> **, <i>Pyxidicula</i> **, <i>Euglypha</i> **, <i>Testate amoebae</i> **, <i>Amoebae</i> **, <i>Coleps</i> **, <i>Prorodon</i> , <i>Drepanomonas</i> , <i>Prostomes</i> **

* p<0.05, ** p<0.01

Table 6. Correlation between effluent and protozoa.

Plant	Taxa	Positive correlation	Negative correlation
4-stage BNR	<i>Peranema</i>	COD	CODr
	<i>Poteriodendron</i> , <i>Oikomonas</i> , <i>Pleuromonas</i> , Bodonoids, Chrysophytes, Flagellates, Haptorids, Protozoa, Metazoa, Total number	BODr	BOD
	<i>Arcella</i> , <i>Euglypha</i> , <i>Testate amoebae</i> , <i>Vorticella</i>	BOD	BODr
	<i>Epistylis</i> , <i>Oligohymenophora</i> , <i>Peritrichs</i>	CODr	COD
	<i>Prostomes</i>	BODr, TP	BOD, TPr
	<i>Monas</i>	BOD	BODr
DNR	<i>Bodo</i> , Bodonoids, <i>Amoeba</i>	SS	SSr
	<i>Arcella</i> , <i>Euglypha</i> , <i>Testate amoebae</i> , <i>Amoebae</i> , <i>Cinetochillum</i> , <i>Hymenostomes</i>	BODr	BOD
	<i>Pyxidicula</i>	TP	TPr
	<i>Litonotus</i>	BOD, SS	BODr, SSr
	<i>Epistylis</i>	BODr, SSr	BOD, SS
	<i>Aspidisca</i> , <i>Hypotrichs</i>	TPr	TP

나타내었다. BOD제거율은 편모충류 그룹과 속들에 양의 상관관을 나타내어 편모충류가 최종처리수 BOD농도가 높음에 관련 있다는 Curds 등[5]의 보고와 상반되게 나타났다. *Arcella*, *Euglypha* 등 Testate amoebae가 출현하면 BOD제거율이 저하되어 유출수의 BOD가 높게 나타나는데 유각아메바류는 SRT가 길게 유지될 때 나타나는 종류로서 탈서천 생활계열의 SRT가 적정 SRT보다 길게 유지됨으로 미생물 플록의 산화가 일어나서 핀플록(pin floc)이 생성되어 유출수의 BOD가 높게 나타나는 것으로 판단된다.

서부처리장은 *Bodo*, *Bodonoids*, *Amoeba*가 출현할 때 SS 제거율이 낮아 처리수의 SS농도가 높게 나타나는데 편모충류와 아메바류는 제거율이 낮은 처리장에 나타난다는 기존의 연구결과와 일치한다[5, 7]. 고착형 섬모충류인 *Epistylis*가 출현하면 분산세균을 여과 포집함으로써 세균의 제거효율이 높아져 처리수의 탁도가 낮게 나타나 SS가 낮아짐으로 SS제거율과 양의 상관관계를 나타낸다.

유출수질 및 유기물제거율을 종속변수로, 원생동물 종류를 독립변수로 하여 회귀분석을 실시하여 회귀방정식을 얻으면, 날자별로 처리장 수질항목의 예상값을 예측할 수 있으며 상관분석과 같이 사용하면 처리장의 수질변화를 미리 예상할 수 있다.

처리장의 원생동물 분포, 유출수질, 운영조건의 자료들이 충분히 확보되면 원생동물 분포를 가지고 운영현황 및 가까운 미래의 수질예측이 가능해진다. 수질예측이 가능함으로 수질이 악화된다고 예측되면 처리장의 운영조건을 변경하여 처리수질의 변동폭을 감소하고 양호한 수질을 연중 유지할 수 있을 것이다. 장기적으로는 가장 좋은 유출수질을 나타내는 원생동물 분포를 얻을 수 있는 방향으로 처리장의 운영조건을 변동하여야 한다.

처리장 운영에 미생물의 활용은 여러 장점이 있으나 여러 처리장에 적용될 수 있는 지표속을 발견하기는 어렵다. 미생물은 여러 가지 환경요인의 지배를 받으므로 처리방법이 같다고 동일하거나 비슷한 원생동물이 출현되리라는 예상은 잘못이다. 처리장별 유입수 성상과 요구되는 방류수 수질기준이 달라 운전조건이 달라지고, 달라진 운전조건에 적용하는 원생동물 종류가 증식함으로 처리장별로 원생동물의 분포가 다르다. 원생동물과 수질항목, 운전조건과의 상관 정도도 달라지므로 여러 처리장에 적용하기보다는 단일 처리장에 적용하는 것이 예측성을 높일 수 있다. 원생동물을 검정하여 수질을 판정하는 생물학적 평가방법이 비교적 쉬운 방법임에도 활용도가 높지 못함은 원생동물 분포와 수처리 상황의 관련을 조사 분석하여 시설의 유지관리에 반영하기 위해서는 포기조나 생물반응조안에 나타나는 원생동물의 검색이 가능하고 수처리에 관한 경험이 필요하기 때문이다. 미생물을 이용하여 처리장운영의 지표로 사용하고 자하면 최소 1년 동안의 원생동물자료와 운영 자료를 확보하여야 한다. 미생물분포에 기초한 유지관리를 위해서는 관

련인력을 교육하고 해당처리장과 운영조건, 유입수 성상이 가장 유사한 처리장의 자료를 가지고 참조하면서 최소 1년 동안 운영하여야 한다. 확보된 자료는 통계 프로그램 같은 해석프로그램을 이용하여 지표로서의 가능성을 분석하여야 한다. 분석된 자료를 처리장운영에 적용하고 부족한 부분을 보완하여 다년간 자료를 확보하면 미생물을 처리장 운영의 지표로 하여 처리장의 효율적이며 경제적인 운영이 가능하다고 판단된다.

요 약

고도처리장의 효율적 운영을 위해 원생동물의 분포를 조사하고 수질자료의 예측을 위한 bioindicator의 가능성을 분석하였다. 원생동물 종류별 개체수 분포는 출현빈도가 높으면 개체수도 많은편으로 관찰되었다. *Aspidisca*, *Trachelophyllum*, *Vorticella*, *Cinetochiluum*, *Oikomonas*, *Epistylis*의 출현빈도는 95%이상이었다. 처리장의 원생동물 분포는 유입수의 성상과 운영조건 차이 등이 세균의 증식에 영향을 미치고 변화된 세균분포에 적합하게 원생동물 분포가 이루어진다고 판단된다. 미생물분포와 통계결과는 처리장마다 다르므로 여러 처리장보다는 단일처리장에 적용되는 지표개발이 처리장의 효율적 운영에 기여할 수 있다. 요인 분석결과 요인적재량의 형태와 요인의 해석이 유사하였다. 고도처리공법이 유사하고, 유입수의 성상이 비슷하여 처리장운영에 관여하는 요인이 비슷하게 나타난 것으로 판단된다. 상관분석과 회귀방정식을 이용함으로 처리장 수질변화를 미리 예상할 수 있다. 처리장의 원생동물 분포, 유출수질, 운영조건 자료들이 충분히 확보되면 원생동물 분포를 가지고 운영현황 및 가까운 미래의 수질예측이 가능해진다. 수질예측이 가능함으로 운영조건의 조기변동으로 처리수질을 양호하게 유지할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 대구광역시 환경시설공단의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Al-Shahwani, S. M. and N. J. Horan, 1991. The use of protozoa to indicate changes in the performance of activated sludge plants. *Wat. Res.* **25**: 633-638.
2. Chung, J. C. and N. C. Kim. 1995. Types and abundance of filamentous bacteria, protozoa and metazoa in activated sludge. *Kor. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.* **23**: 363-371.
3. Curds, C. R. 1975, Protozoa, pp. 203-268. *In Ecological aspects of used-water treatment, vol. 1. The organisms and their ecology.* Academic press, London.

4. Curds, C. R. 1982. The ecology and role of protozoa in aerobic sewage treatment process. *Ann. Rev. Microbiol.* **36**: 27-46.
5. Curds, C. R. and A. Cockburn. 1970. Protozoa in biological sewage treatment processes. II. Protozoa as indicators in the activated sludge process. *Wat. Res.* **4**: 237-249.
6. Foissner, W. and H. Berger. 1996. A user-friendly guide to the ciliates (Protozoa, Ciliophora) commonly used by hydrobiologists as bioindicators in rivers, lakes, and waste waters, with notes on their ecology. *Freshwater Biology* **35**: 375-482.
7. Hawkes, H. A. 1960. *Ecology of activated sludge and bacteria beds*, pp. 52-98. In *Treatment of wastewater*. Pergamon Press, Oxford.
8. Hwang, U. Y. 1987. Quality determination of the treated waste water in food manufacturing plant. *M.Sc. Thesis*, Konkuk Univ., Korea.
9. Jahn, T. L., E. C. Bovee, and F. F. Jahn. 1979. *How to know protozoa*, pp 46~266. 2nd ed. WCB/McGraw-Hill, Iowa.
10. JWA. 1997. *Microorganism of the aeration tank*, pp. 47-258. Dong Hwa Books, Seoul.
11. Kim, S. S. 1989. Relationship between water quality index and protozoa at the sewage plant, M, Sc. Thesis, Yeungnam Univ., Korea.
12. Lee, C. H. and K. S. Moon. 2003. Protozoa Structure of Anaerobic/Anoxic/Oxic Process. *Kor. J. Microbiol. Biotechnol.* **31**: 264-270.
13. Madoni, P., D. Davoli, and E. Chierici. 1993. Comparative analysis of the activated sludge microfauna in several sewage treatment works. *Wat. Res.* **27**: 1485-1491.
14. Madoni, P. 1994. A sludge biotic index(SBI) for the evaluation of the biological performance an activated sludge plants based on the microfauna analysis. *Wat. Res.* **28**: 67-75.
15. MOE. 1999. *Water quality pollution examination method*, pp 125-205. Dong Hwa Books, Seoul.
16. Moon, K. S., S. M. Kim, M. J. Seok, and C. H. Lee. 2003. Protozoan distribution in anoxic/oxic process. *J. KSEE.* **25**: 991-995.
17. Patterson, D. J. 1996. *Free-Living Freshwater Protozoa*, pp 23~191. John Wiley and Sons, New York.
18. Poole, J. E. P. 1984. A study of the relationship between the mixed liquor fauna and plant performance for a variety of activated sludge wastewater treatment works, *Wat. Res.* **18**: 281-287.

(Received Dec. 14, 2004/Accepted Jan. 24, 2005)