

기술노트

활성슬러지공정 하수종말처리장의 단위공정별 세균 제거효율

이동근 · 정미라* · 성기문** · 박성주***,†

신라대학교 제약공학과
*한국생명공학연구원 장수과학연구소
**대전대학교 대학원 미생물학과
***대전대학교 임상병리학과

Bacterial Removal Efficiencies by Unit Processes in a Sewage Treatment Plant using Activated Sludge Process

Dong-Geun Lee · Mira Jung* · Gi Moon Sung** · Seong Joo Park***,†

Department of Pharmaceutical Engineering, Silla University
*Aging Research Center, Korea Research Institute of Bioscience and Biotechnology
**Department of Microbiology, Graduate School, Daejeon University
***Department of Biomedical Laboratory Science, Daejeon University
(Received 7 May 2010, Revised 17 June 2010, Accepted 17 June 2010)

Abstract

To figure out the removal efficiency of indicator and pathogenic bacteria by unit processes of a sewage treatment plant using activated sludge process, analyses were done for incoming sewage, influent and effluent of primary clarifier, aeration tank, secondary clarifier and final discharge conduit of the plant. A matrix of bacterial items (average of bacterial reduction [log/ml], p value of paired t-test, number of decreased cases of twenty analyses, removal percentage only for decreased cases) between incoming sewage and final effluent of the plant were heterotrophic plate counts (1.54, 0.000, 20, 95.01), total coliforms (1.38, 0.000, 19, 83.94), fecal coliforms (0.90, 0.000, 20, 94.84), fecal streptococci (0.90, 0.000, 20, 98.08), presumptive Salmonella (0.23, 0.561, 7, 99.09), and presumptive Shigella (1.02, 0.002, 15, 92.98). Total coliforms, fecal coliforms, heterotrophic plate counts, and fecal streptococci showed highest decrease through secondary clarifier about 1-log (p<0.001) between 88% and 96%, and primary clarifier represented the significant (p<0.05) decrease. However, final effluent through discharge conduit showed higher total coliforms and fecal streptococci than effluent of secondary clarifier (p<0.05). In addition, final effluent once violated the water quality standard while effluent of secondary clarifier satisfied the standard. Hence some control measures including elimination of deposits in discharge conduit or disinfection of final effluent are necessary.

keywords : Coliforms, Heterotrophic plate counts, Pathogenic bacteria, Sewage treatment plant, Streptococci, Unit process

1. 서론

우리나라의 하수도 보급률은 2006년 현재 85.5%이고 344개 공공 하수종말처리시설의 시설용량은 23,273천 톤/일이다. 2007년 현재 시설규모 500 m³/일 이상인 공공하수처리시설은 357개로 증가하고 있으며 상수원인 다목적댐 상류지역의 근원적 수질개선을 위하여 2005년 말 35%에 불과한 댐 상류지역 하수도보급률을 2011년까지 75%로 대폭 제고할 계획이다(환경부, 2008a, 2009). 우리나라 하수처리장의 공법을 보면 A₂O, SBR 등 고도처리공법이 2007년 현재 245개(69%)이고 전통적 공법(표준활성슬러지, 장기포기 등)은 31%인 112개소이며, 시설확충 및 개선을 통해 고도처리공법으로 전환 추세에 있다(환경부, 2008a).

공중보건과 위생 그리고 환경보호를 목적으로 상수와 하수 처리가 수행되는데, 주안점은 병원성미생물의 제거에 있다(McClellan et al., 2000). 수인성 전염병을 일으키는 병원성 미생물의 종류는 원생동물, 세균, 바이러스 등으로 나눌 수 있으며, 이들은 분원성 즉 배설물 오염에 의해 전파되는 것으로 알려져 있다. 이들 병원성 미생물의 정량적 분석이 수인성 전염병의 방지에 직접적이겠지만, 자연계에서의 농도가 낮고 검출과 정량이 어려운 뿐만 아니라 노동력이 많이 소모되며, 또한 종류가 많아 각각에 대해 검사를 다 하기 어려운 한계가 있다(Savichtcheva and Okabe, 2006). 따라서 이들 분원성병원균의 존재를 알려주며 검사법이 비교적 용이한 지표세균을 법적 기준으로 정하여 관리하고 있는데, 분원성지표세균(fecal indicator bacteria, FIB)으로서 총대장균군(total coliforms, TC)이 많이 사용되어왔다. 그러나 TC의 단점을 보완할 수 있는 분원성대장균군(fecal coliforms, FC)이나 분원성연쇄상구균(fecal streptococcus,

† To whom correspondence should be addressed.
psjj@dju.kr

FS)과 같은 새로운 지표세균이 활용되고 있다(환경부, 2008b, 2009).

수질 및 수생태계 환경기준에 따르면 우리나라 하수처리장의 방류수는 TC와 FC를 mL당 3000개 이하로 유지하여야 한다(환경부, 2009). 한편 기존 하수처리장의 고도처리 공법으로의 전환과 함께 대장균군 기준 준수를 위한 소독 처리 등이 필요할 수도 있는데(이민규 등, 2008), 염소소독의 경우 수중생태계에 독성을 유발할 수 있으므로 잔류량 등을 최소화해야 한다. 하수방류수의 대장균군 분포와 관련 인자 등에 관한 보고들이(김영준 등, 2008; 김종민 등, 2007; 백영석과 손진식, 2006) 있었지만, 하수처리장의 단위공정별 미생물 제거효율에 대한 보고는(Kay et al., 2008) 국내에서 거의 없는 실정이다.

Salmonella 와 *Shigella* 속 세균은 수인성전염병을 일으키는 세균으로서 슬러지나 분변을 통한 감염도 가능하며(Vanotti et al., 2005), 외국의 경우 하수에서의 존재도 보고되었다(Peng et al., 2002; Sahlstrom et al., 2004). 국내는 하수처리장 방류수 수질기준에는 포함되어 있지 않지만 먹는물수질공정시험기준에는 포함되어 있다(환경부, 2009). 국내의 경우 정두영 등(2009)은 음식물류 폐기물과 축산분뇨 혼합폐수에서 *Salmonella* 와 *Shigella* 의 존재를 확인하였지만, 아직 국내에는 하수처리장에서의 이들 세균에 대한 보고는 없는 실정이다.

하수종말처리장의 단위공정별로 미생물 제거효율을 파악한다면 가장 취약한 공정의 파악과 대비 등이 가능할 것이며 효율적인 운전이 가능할 것이다. 이에 본 연구에서는 방류수 수질기준에서 지표세균의 적합여부를 판단함과 동시에, 하수종말처리시설의 단위공정별로 지표세균은 물론 병원성세균인 *Salmonella* 와 *Shigella* 의 제거효율을 비교하였다.

2. 연구방법

2.1. 시료 채취

2003년 현재 대전시 하수종말처리장의 1단계 처리시설(15만 m³/일)을 연구대상으로 하였다. 대전하수종말처리장은 연속흐름혼합반응조(continuous flow-stirred tank reactor, CFSTR)의 활성슬러지공법으로서, 처리흐름도는 유입펌프장, 조목스크린, 침사지, 세목스크린, 최초침전지(다음부터 '초침'이라 표기), 포기조, 최종침전지(다음부터 '종침'이라 표기), 최종방류관거의 순서이다. 시료채취지점은 유입펌프장에서 나오는 유입생하수(incoming sewage to the plant, IN), 초침유입수(influent of primary clarifier, PI), 초침유출수(effluent of primary clarifier, PE), 포기조유입수(influent of aeration tank, AI), 종침유입수인 포기조유출수(effluent of aeration tank, AE), 최종방류관거의 유입수인 종침유출수(effluent of secondary clarifier, SE), 그리고 하수처리장을 빠져나가는 최종방류수(final effluent, FE) 등 처리공정 흐름도를 따라 선정하였다. 시료는 2003년 5월에서 12월 사이에 총 20회 채취하였으며, 특히 여름인 7월에는 12회

에 걸쳐 집중 채취하였다. 채취기간 동안 처리장의 소독공정은 가동되지 않았다.

2.2. 지표세균과 병원성세균

지표세균이 분원성 오염의 지표로서 중요한 먹는물과는 달리, 하수가 연구대상인 본 연구에서는 처리시설의 단위공정별 세균제거효율 파악이 목적이므로 세균에 대한 완전시험이나 동정은 실시하지 않았다. 지표세균 계수에 필요한 배지 등은 Fluka와 BBL 등에서 구하였으며, 기타 시약은 Sigma에서 구하였다. 각 지표세균의 계수에는 수질오염공정시험방법(환경부, 2004)과 먹는물수질공정시험방법(환경부, 2008b)에 수록된 방법과 동일한 것이기는 하지만, 본 연구는 이들 시험방법이 시행되기 이전에 수행된 것이다.

2.2.1. 총대장균군(TC) 계수

총대장균군은 최적확수법(most-probable-numbers, MPN)을 적용하였다. 최적확수법은 희석배수마다 5개의 발효관에 lauryl tryptose broth(LTB) 배지와 기포 포집관(Durham관)을 넣고, 여기에 1/10씩 연속희석된 시료를 접종하여 35°C에서 24시간 배양한 후, 기포가 발생한 발효관을 양성으로 간주한다. 양성시험관수를 세어 MPN 표를 이용하여 대장균군수를 추정하는 추정-MPN법을 사용하였다.

2.2.2. 분원성대장균군(FC) 계수

막여과법으로 계수하였다. 연속희석된 시료 일정량을 여과한 구멍크기(pore size) 0.45 µm의 여과지를 분원성대장균군 선택배지인 m-FC 한천배지에 올려놓고, 44.5°C에서 24시간 배양한 뒤 나타나는 파란색의 세균집락을 전형적인 양성 분원성대장균군으로 간주하고 계수하였다.

2.2.3. 분원성연쇄상구균(FS) 계수

막여과법으로 계수하였다. 연속희석된 시료 일정량을 여과한 구멍크기 0.45 µm의 여과지를 분원성연쇄상구균 선택배지인 m-Enterococcus 한천배지에 올려놓고, 35°C에서 24시간 배양한 후 나타나는 세균집락 가운데 붉은색 계통의 세균집락만을 전형적인 양성 분원성연쇄상구균으로 간주하여 계수하였다.

2.2.4. 병원성세균 계수

병원성세균으로는 먹는샘물 수질기준에 설정되어 있는 장티푸스 원인균인 살모넬라(장티푸스균, *Salmonella typhi*)와 이질 원인균인 시겔라(세균성이질균, *Shigella*)의 2종류 병원균을 대상으로 하여 막여과법 혹은 평판계수법을 실시하였다. *Salmonella* 검출을 위해서는 연속희석된 시료 일정량을 여과한 여과지를 bismuth sulfite agar (BSA) 배지에 올려 놓고 배양하거나, 연속희석된 시료 일정량을 평판배지 위에 도말하여 일정시간동안 배양하였다. 배양 결과 형성되는 집락 가운데 가장자리에 하얀색 테가 있으며(halo effect), 검거나 짙은 갈색의 금속광택으로 반짝이는 세균집락을 전형적인 추정양성 *Salmonella* (다음부터 '*Salmonella*'로 표기)

로 간주하여 계수하였다. *Shigella* 는 xylose lysine desoxy-cholate (XLD) agar 배지에 올려놓거나, 연속희석된 시료 일정량을 평판배지 위에 도말하여 일정시간동안 배양하였다. 배양한 후 형성되는 붉은색 세균집락을 전형적인 추정 양성 *Shigella* (다음부터 ‘*Shigella*’ 로 표기)로 간주하여 계수하였다.

2.2.5. 일반세균 계수

일반세균수(종속영양세균수, heterotrophic plate counts, HPC)는 탁도와 함께 단위공정별 처리효율을 평가하는 지표로 활용된다. 일반세균수는 영양한천(nutrient agar, NA) 평판배지에 연속희석된 시료 0.1 mL을 접종하고, 35°C, 48 시간 배양한 후 형성되는 모든 세균집락을 계수하였다.

2.3. 단위공정별 세균 제거효율 산출 및 통계분석

단위공정별 세균 제거효율은 각 단위공정으로 들어오는 유입수의 세균농도에서 빠져나가는 유출수의 세균농도를 뺀 값을 유입수의 세균농도로 나눈 백분율(%)로 구하였다.

단위공정별 세균감소 여부와 세균농도 연관성을 확인하기 위하여 통계분석 프로그램인 SPSS (V12.0) (SPSS Inc.)을 이용하여 대응 *t*-검정과 대응표본 상관계수를 구하였다. 지표세균과 병원성세균은 Kay 등(2008)이 사용한 상용로그(log)를 취하여 분석하였으며, 수질기준에 총대장균군과 분원성대장균군 등 지표세균은 3000 이하라고 명시되어 있어 측정된 세균수로도 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 단위공정별 세균수

Fig. 1은 대전하수종말처리장의 단위공정별로 측정된 총대장균군과 분원성대장균군의 농도이다. 대장균군은 총대장균군(Total coliform, TC)과 분원성대장균군(Fecal coliforms, FC)으로 구분되며 ‘수질 및 수생태계 환경기준의 건강보호 기준’과 ‘하수처리장 방류수 수질기준’으로 관리하고 있다(환경부, 2009). MPN법으로 계수한 TC 평균농도를 보면 유입생하수(IN)가 2.6×10^4 MPN/mL 이었으며, 최종침전지

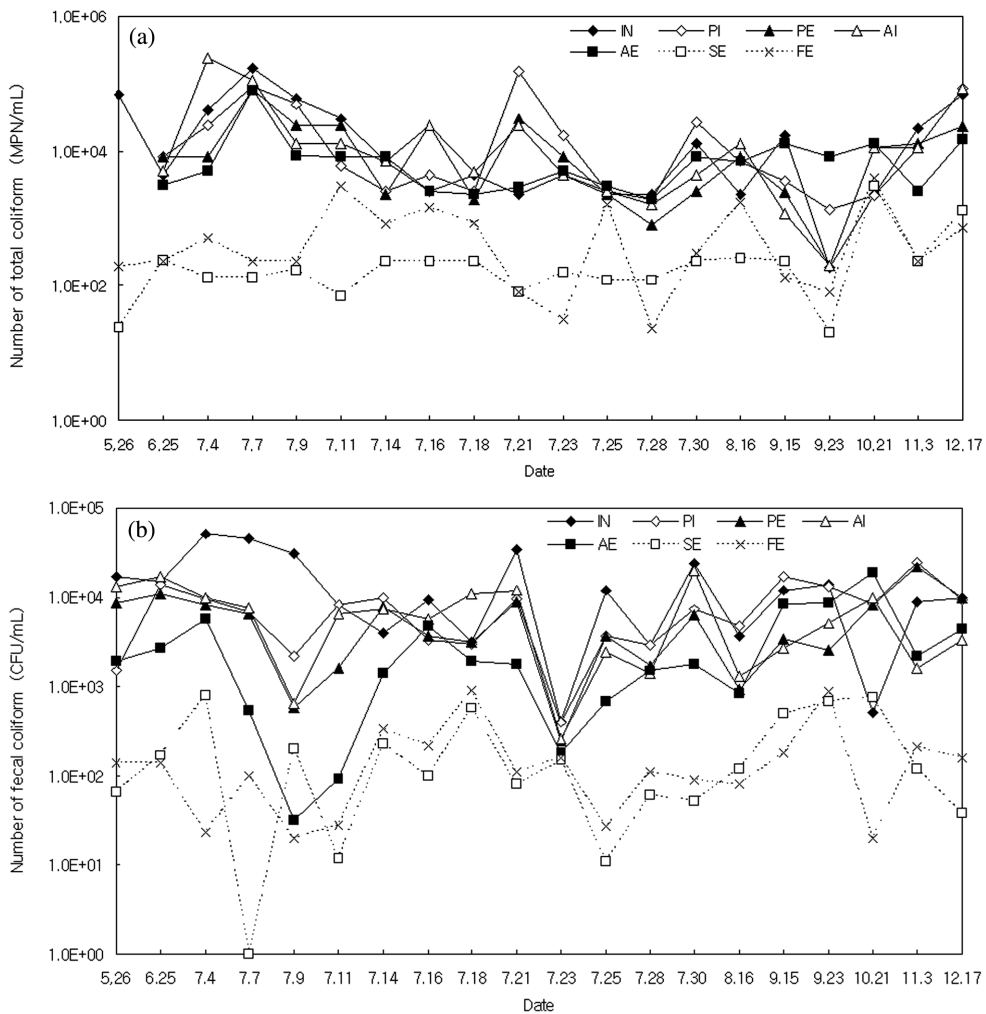


Fig. 1. Variation of total coliforms (a) and fecal coliforms (b) in incoming sewage to the plant (◆), influent of primary clarifier (◇), effluent of primary clarifier (▲), influent of aeration tank (△), effluent of aeration tank (■), effluent of secondary clarifier (□), and final effluent (×) of Daejeon Sewage Treatment Plant from May to December.

로 유입되기 전까지는 대체로 유입생하수와 비슷한 10^4 MPN/mL 수준이 유지되었다. 그러나 종침을 거치면서 10^2 MPN/mL 수준으로 대폭 줄어들었으며, 최종방류수(FE)는 종침유출수(SE)보다 약간 높지만 거의 같은 10^2 MPN/mL 수준을 유지하였다. 막여과법으로 분석한 FC의 평균농도는 TC와 거의 비슷하였다. 즉 유입생하수(IN) 10^4 CFU/mL에서 초침유입수(PI), 초침유출수(PE), 포기조유입수(AI), 포기조유출수(AE)는 모두 비슷한 10^3 CFU/mL, 그리고 종침유출수(SE)와 최종방류수(FE)는 10^2 CFU/mL 수준이었다. 현재 시행중인 하수종말처리장방류수 수질기준에 규정된 TC와 FC 기준인 3000개 이하/mL(환경부, 2009)와 비교하였을 때, 연구기간동안 최종방류수 수질이 기준을 초과한 횟수는 TC의 경우 최적확수법(MPN)으로 분석하였을 때 단 1회에 불과하였으며, FC는 단 한 번도 기준을 초과하지 않았다. 기준을 초과할 때의 TC 농도는 4,000 MPN/mL이었다. 이는 확정시험과 완전시험을 거치지 않은 농도이므로, 실제 TC 농도는 기준을 만족시킬 수도 있었을 것이다. 따라서 대전하수종말처리장은 소독공정 없이도 최종방류수가 대장균군수 기준을 충족시킬 수 있을 것으로 보인다. 그러

나 TC 농도가 기준치에 근접한 경우가 몇 번 있었기 때문에 기준을 완벽히 충족시키기 위해서는 소독공정을 추가하는 등의 부가적 조치를 취하는 것이 필요한 것으로 판단되었다. Kay 등(2008)이 발표한 영국 각 지역의 하수종말처리장 유입생하수와 유출수의 TC와 FC 농도를 상용log/mL로 변형시킨 다음 ‘(평균, 최소, 최대)’농도로서 본 연구 결과와 비교해 보았다. 유입생하수의 경우 Kay 등(2008)은 TC (7,4,9), FC (6,4,9)인데 비해, 본 연구에서는 TC (4,2,5), FC (4,2,4)로서 본 연구의 유입생하수 대장균군수가 평균 2~3 log 적은 것으로 나타났다. 유출수에서도 같은 결과를 보였다. Kay 등(2008)의 보고에서는 초침방류수가 TC (7,4,9), FC (7,4,9)인데 비해 본 연구의 초침방류수(PE)는 TC (4,2,4), FC (3,2,4)이었다(Fig. 1). 본 연구에서의 최종방류수는 백영석과 손진식(2006)이 보고한 최종방류수 중의 대장균군수 3~4 log/mL과 비슷하였고, 소독공정이 추가된 하수종말처리장 방류수의 대장균군수 0~2 log/mL보다는(김영준 등, 2008) 높은 것으로 나타났다.

Fig. 2는 대전하수종말처리장의 단위공정별 일반세균(HPC)과 분원성연쇄상구균(FS)의 농도이다. HPC는 유입생하수

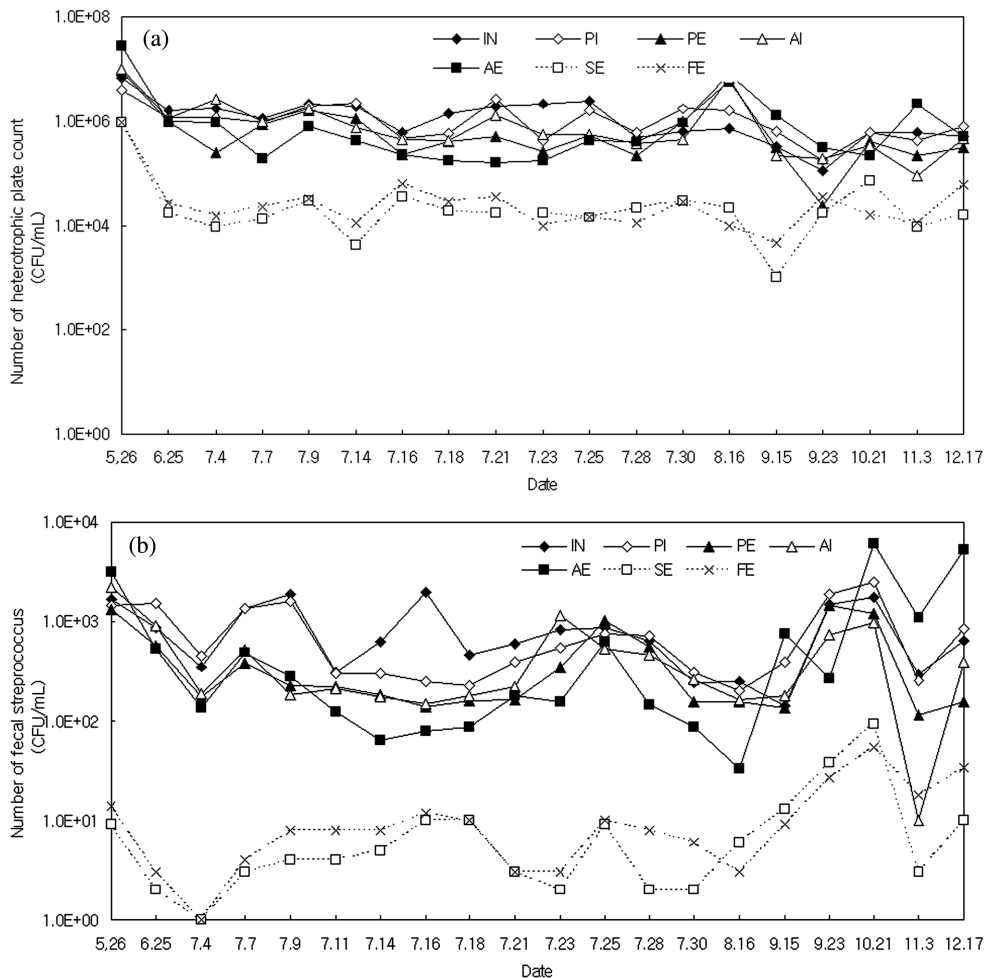


Fig. 2. Variation of heterotrophic plate counts (a) and fecal streptococci (b) in incoming sewage to the plant (◆), influent of primary clarifier (◇), effluent of primary clarifier (▲), influent of aeration tank (△), effluent of aeration tank (■), effluent of secondary clarifier (□), and final effluent (×) of Daejeon Sewage Treatment Plant from May to December.

(IN)부터 종침유입수(SI)까지 평균 10^6 CFU/mL을 유지하였고, 종침유출수(SE)와 최종방류수(FE)가 평균 10^4 CFU/mL로 나타났다. HPC는 유기물을 기질로 하여 살아가는 모든 종류의 세균을 말한다. 일반세균수는 탁도와 함께 단위공정별 처리효율을 평가하는 지표로 활용하기도 하는데, 5월부터 9월까지의 처리장 자체에서 분석한 BOD 자료에서도 BOD는 종침에서 가장 많이 제거되는 것으로 나타났다(자료 미수록). FS는 대장균군과 일반세균에 비해 농도가 낮았다. 유입생하수(IN)부터 종침유입수(SI)까지 평균 10^2 CFU/mL, 종침유출수(SE)와 최종방류수(FE)가 평균 10^1 CFU/mL로 나타났다. 분원성오염의 지표로서 TC가 갖는 한계성을 극복하기 위하여 FC와 FS가 새로운 지표세균으로 활용되고 있는데(환경부, 2008b, 2009), 본 연구에서는 TC와 FC 농도는 서로 비슷한 수준이었고, FS는 1~2 log 정도 낮은 것으로 나타났다.

Fig. 3은 대전하수종말처리장의 단위공정별 병원성세균인 *Salmonella*와 *Shigella* 속 세균농도이다. *Salmonella*의 평균농도는 유입생하수(IN)와 초침유입수(PI)가 10^3 CFU/mL, 초침유출수(PE), 포기조유입수(AI), 포기조유출수(AE)가 모

두 10^2 CFU/mL, 종침유출수(SE)와 최종방류수(FE)가 10^1 CFU/mL이었다. *Shigella*의 평균농도는 유입생하수(IN)부터 포기조유출수(AE)까지 10^3 CFU/mL, 종침유출수(SE)와 최종방류수(FE)가 10^1 CFU/mL이었다. 본 연구결과에서 분원성오염의 지표세균인 TC, FC, FS 농도 가운데 TC가 가장 높고, FC, FS 순서로 줄어드는 것으로 나타났다. *Salmonella*나 *Shigella* 농도는 FS 농도와 비슷하고 FC 농도보다는 적으므로, 하수종말처리장의 처리효율을 나타내는 지표세균으로서 FS보다는 FC나 TC가 더 적합한 것으로 보인다.

3.2. 하수종말처리장의 세균 제거효율

처리장 전체의 세균 제거효율은 유입펌프장에서 양수되는 유입생하수(IN)와 처리장에서 빠져나가는 최종방류수(FE)의 세균농도를 비교하여 산출하였다. 처리효율을 ‘세균 항목 (평균, 최소, 최대)’로 표시하면 TC (76, -74, 99), FC (95, 61, 100), HPC (95, 67, 99), FS (98, 94, 100), *Salmonella* (-25225, -199900, 100), *Shigella* (-4760, -72900, 100)이었다. 최종방류수가 유입생하수보다 세균수가 많아서 처리효율이 음수로 나온 경우는 TC가 1회(10월), *Salmonella*

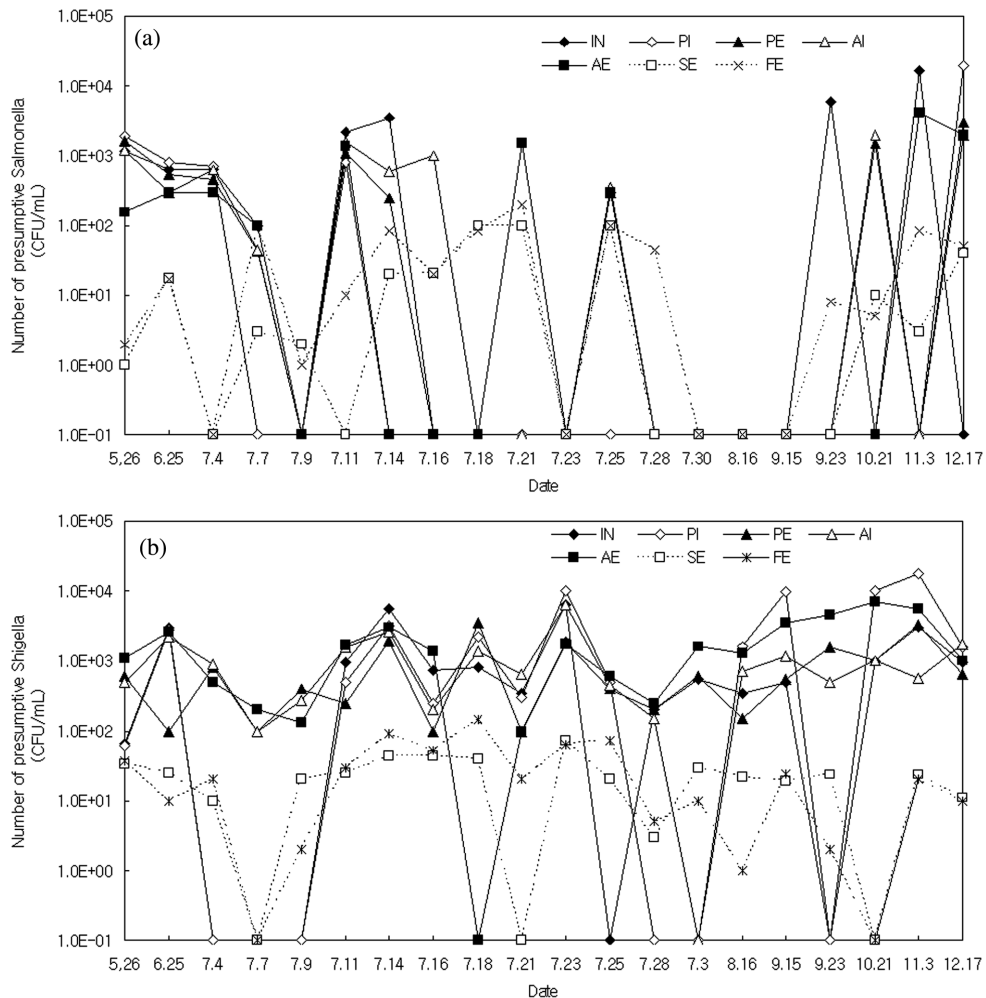


Fig. 3. Variation of presumptive positive *Salmonella* sp. (a) and *Shigella* sp. (b) in incoming sewage to the plant (◆), influent of primary clarifier (◇), effluent of primary clarifier (▲), influent of aeration tank (△), effluent of aeration tank (■), effluent of secondary clarifier (□), and final effluent (×) of Daejeon Sewage Treatment Plant from May to December.

가 8회(7월 6회, 10월과 12월 각 1회), *Shigella* 가 4회(7월 3회, 9월 1회)이었다(Fig. 1~3). FC, HPC, FS의 제거효율은 90% 이상으로 우수한 반면, TC는 음수인 경우를 제외하더라도 84%로 처리효율이 다른 지표세균에 비해 낮았다.

양의 제거효율은 100%를 초과할 수 없는 반면 음의 제거효율은 -199900%와 같은 음수값에 의해 처리효율이 왜곡될 가능성이 있으므로 합리적인 제거효율을 산출하기 위해 통계분석을 수행하였다. Table 1에 하수처리장 유입생하수(IN)와 최종방류수(FE) 사이인 전체 처리장(IN-FE)의 세균농도 변화의 평균, 최소, 최대와 함께 대응표본 *t*-검정으로 구한 *p*-값을 나타내었다.

전체 처리장(IN-FE)의 세균농도 변화 중에서 감소가 잘된 것은 FC, TC, HPC, *Shigella* 순서로 1 log (90%) 이상의 감소를 보였고, FS와 *Salmonella* 제거효율은 높지 않았다. 대응표본 *t*-검정 결과도 *Salmonella* 를 제외한 나머지 항목은 *p*-값이 0.005 이하로 유의성이 매우 높아(Table 1), 연구대상 하수처리장이 전반적으로 세균제거가 원활함을 알 수 있었다. *Shigella* 의 경우 평균제거율은 음수값이었지

만 양수값을 나타낸 횟수가 많아 *t*-검정에서는 양의 제거율이 유의한 것을 알 수 있었다. 유입생하수(IN)에서는 *Salmonella* 가 FS 및 *Shigella* 에 비하여 높은 농도를 유지하고 있음에도(Fig. 2, 3), 최종방류수(FE)에 나타난 제거효율은 FS 및 *Shigella* 가 1 log 이상인 반면 *Salmonella* 는 0.23 log로 매우 낮았다(Table 1). 이 결과는 유입생하수(IN) 세균농도와 제거효율과는 상관성이 없음을 말해 주는 것이다. 즉 유입생하수(IN), 초침유입수(PI)에서는 *Salmonella* 가 검출되지 않았음에도 최종방류수(FE)에서 *Salmonella* 가 검출됨으로써(5회), *Salmonella* 의 제거효율이 낮게 나타난 것으로 판단된다.

3.3. 단위공정별 세균 제거효율

Table 1은 각 시료채취일별로 파악한 하수의 단위공정별 세균농도의 변화를 상용로그(log) 변화로 나타낸 값과 대응표본 *t*-검정으로 구한 *p*-값을 나타낸 것이다. 세균농도 변화값이 양수이면 단위공정을 거치면서 세균농도가 감소한 것이고, 음수이면 단위공정을 거치면서 오히려 세균농도가

Table 1. Average, minimum and maximum of the variation of bacterial concentrations (log/mL) and *p* value of paired *t*-test between neighboring sampling sites of unit processes in Daejeon Sewage Treatment Plant. Positive or negative values of variation represent decrease and increase, respectively, of bacterial concentrations at sampling sites. Samples were abbreviated as IN (incoming sewage to the plant), PI (influent of primary clarifier), PE (effluent of primary clarifier), AI (influent of aeration tank), AE (effluent of aeration tank = influent of secondary clarifier), SE (effluent of secondary clarifier = influent of final discharge conduit), and FE (final effluent). Unit processes were abbreviated as PC (primary clarifier), AT (aeration tank), SC (secondary clarifier) and FD (final discharge conduit)

Bacteria	Process	PC		AT		SC	FD	Total (IN-FE)
	Adjacent samples	IN-PI	PI-PE	PE-AI	AI-AE	AE-SE	SE-FE	
HPC ^a	Avg ^c	0.02	0.24	-0.12	0.04	1.21	0.15	1.54
	Min ^f	-0.43	-0.56	-1.03	-0.79	0.00	-0.56	0.00
	Max ^g	0.69	0.85	0.40	0.91	2.02	1.64	2.33
	<i>p</i> value	0.717	0.004	0.133	0.699	0.000	0.300	0.000
TC ^b	Avg	0.16	0.14	-0.12	0.15	1.36	-0.32	1.38
	Min	-1.81	-0.73	-1.48	-1.60	-1.38	-1.63	-0.24
	Max	4.85	1.03	0.32	1.68	2.79	0.72	2.85
	<i>p</i> value	0.532	0.186	0.210	0.334	0.000	0.028	0.000
FC ^c	Avg	0.18	0.17	-0.05	0.46	1.37	-0.13	1.94
	Min	-1.22	-0.76	-0.60	-0.50	0.08	-1.00	0.00
	Max	1.15	0.71	1.14	1.85	2.85	1.58	2.96
	<i>p</i> value	0.166	0.043	0.547	0.004	0.000	0.262	0.000
FS ^d	Avg	0.05	0.30	-0.01	-0.02	1.75	-0.16	0.90
	Min	-0.44	-0.14	-0.52	-2.04	0.74	-0.78	0.00
	Max	0.90	0.85	1.06	0.87	2.72	0.30	1.74
	<i>p</i> value	0.455	0.000	0.918	0.926	0.000	0.022	0.000
<i>Salmonella</i>	Avg	1.28	0.81	1.24	1.41	1.24	0.69	0.23
	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-2.30
	Max	4.21	4.30	3.48	3.30	3.60	2.00	2.88
	<i>p</i> value	0.267	0.090	0.288	0.660	0.108	0.018	0.561
<i>Shigella</i>	Avg	-0.12	-0.45	-0.03	-0.17	1.74	0.05	1.02
	Min	-2.70	-3.19	-1.33	-3.21	-1.60	-1.30	-1.86
	Max	2.30	1.44	2.78	3.15	3.85	1.34	3.00
	<i>p</i> value	0.597	0.221	0.872	0.506	0.000	0.729	0.002

HPC^a: Heterotrophic plate counts, TC^b: Total coliforms, FC^c: Fecal coliforms, FS^d: Fecal streptococci, Avg^c: Average, Min^f: Minimum, Max^g: Maximum

증가한 것을 의미한다.

단위공정별로 비교하면 유입생하수(IN)와 초침유입수(PI) 사이와, 초침유출수(PE)와 포기조유입수(AI) 사이에서는 세균농도 변화의 통계학적 유의성이 없었으며, *Salmonella* 를 제외하고는 변화도 적었다(Table 1). 초침유입수(PI)와 초침유출수(PE)에서는 HPC와 FS가 세균농도의 감소와 함께 유의성을 보여($p < 0.05$), 최초침전지가 세균농도 감소에 기여하고 있는 것으로 나타났다. 포기조유입수(AI)와 포기조유출수(AE) 사이는 FC ($p = 0.004$)를 제외하고는 유의성이 없었고 세균농도의 변화도 크지 않았다. 종침유입수인 포기조유출수(AE)와 종침유출수(SE) 사이가 가장 큰 세균농도의 감소를 보였으며, 동시에 대응표본 t -검정 결과 역시 *Salmonella* 를 제외한 모든 항목의 p -값이 0.001 이하로 높은 유의성을 보여, 최종침전지에서 가장 많은 세균농도의 감소를 확인할 수 있었다(Table 1). 한편 종침유출수(SE)와 최종유출수(FE)를 비교하면 TC, FC, FS의 증가가 관찰되었지만, FC는 통계학적 유의성이 없었다(Table 1).

Table 2는 인접하는 두 단위공정 사이에서 각 세균농도의 연관성을 비모수 상관계수인 Spearman's rho 상관계수로 나타낸 것이다. 유입생하수(IN)와 최종방류수(FE) 사이를 대응표본 t -검정 결과와 비교하면 HPC만 공통적으로 유의성을 보였을 뿐 나머지 항목은 Spearman's rho 상관계수의 유의성이 나타나지 않았다. Spearman's rho 상관계수는 정규분포가 아니라도 적용이 가능한 순위 상관계수이고, 대응표본 t -검정은 처리전후의 평균을 비교하는 것이므로, HPC 농도 감소는(Table 1) 유의적이며(대응표본 t -검정), 동시에 하수처리장의 HPC 제거율이 일정하므로, 단위공정으로 들어오는 유입수의 HPC 농도가 높으면 유출수 HPC 역시 높게 나오는 것으로 생각된다(Table 2). TC와 FC 등은 세균농도 감소가 유의적인 반면(대응표본 t -검정), Spearman's rho 상관계수는 유의적이지 않으므로 제거율이 일정하지 않은 것으로 판단되었다. 대응표본 t -검정과는 달리 IN-PI와 PE-AI 등에서도 단위공정별로 유의성을 보이는 항목이 관찰되었으므로 단위공정별 유입수 세균농도와 유출수 세균농도가 서로 상관성이 있음을 알 수 있었다.

Table 3은 전체 20회의 분석 횟수에서 양의 제거율을 보인 횟수, 그리고 양의 제거율을 보였을 때의 평균제거효율, 최소제거효율, 최대제거효율을 나타낸 표이다. TC를 보면 포기조유출수(AE)와 종침유출수(SE) 사이 즉 최종침전지에서 20회 모두 양의 제거율을 보였으며 평균제거율은 94.68%였다. 초침유출수(PE)와 포기조유입수(AI) 사이, 그리고 종침유출수(SE)와 최종방류수(FE) 사이는 HPC가 제거된 횟수는 각각 5회인 25%이고, 증가된 횟수는 15회인 70%로서, HPC가 오히려 증가하는 경향이 많음을 알 수 있었다. 그리고 유입생하수(IN)와 최종방류수(FE)를 비교하면, 분석 횟수 20회 중 19회가 양의 제거율을 보였으며 평균제거율은 99.53%였다.

TC와 같이 최종침전지(SC, AE-SE)와 전체 처리장(IN-FE)에서는 양의 제거율을 보인 횟수가 많고, PE-AI 사이와 최종방류수(FD, SE-FE)에서 증가된 횟수가 감소된 횟수보다 많은 세균항목은 *Salmonella* 를 제외한 HPC, FC, FS, *Shigella* 이었다. Table 1의 대응표본 t -검정 결과와 비교하면 통계적으로 볼 때 최종침전지(AE-SE)와 전체 처리장(IN-FE)에서는 세균제거가 잘 되고 있는 것으로 판단되며, PE-AI 사이와 최종방류관거(SE-FE)에서는 실제로 세균제거가 잘 되고 있지 않거나, 측정결과가 통계적으로 유의하지 않는 것으로 나타났다.

3.4. 최종방류수의 수질

Fig. 1과 2를 보면 TC, FC, HPC, FS 모두 최종침전지를 거친 종침유출수(SE)가 앞에 위치한 단위공정 폐수보다 낮은 농도를 보였다. 하지만 최종방류관거의 유입수인 종침유출수(SE)와 최종방류관거의 유출수인 최종방류수(FE) 사이를 보면 HPC, *Salmonella*, *Shigella* 농도는 감소한 반면 TC, FC, FS 농도는 오히려 증가하는 경향을 보였다(Table 1). 최종방류수(FE)의 TC와 FC가 종침유출수(SE)보다 높고(Table 1), 둘 간의 상관관계가 높게 나타나고 있어(Table 1, 2) 최종방류관거에서 수질이 악화되는 것으로 판단된다.

최종방류관거에서 세균농도가 증가할 수 있는 요인으로 다음의 4가지를 들 수 있다. 첫째, 종침유출수가 최종방류

Table 2. Spearman's rho correlation coefficients (Coeffi.) and p value between neighboring samples of unit processes in Daejeon Sewage Treatment Plant. See table 1 for abbreviations

Bacteria	Process	PC		AT		SC		FD		Total (IN-FE)
	Adjacent samples	IN-PI	PI-PE	PE-AI	AI-AE	AE-SE	SE-FE			
HPC	Coeffi.	0.774	0.884	0.846	0.753	0.584	0.494	0.617		
	p value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.032	0.005		
TC	Coeffi.	0.616	0.736	0.813	0.193	0.209	0.431	-0.011		
	p value	0.005	0.000	0.000	0.428	0.391	0.058	0.964		
FC	Coeffi.	0.217	0.553	0.574	0.339	0.531	0.640	-0.340		
	p value	0.359	0.011	0.008	0.144	0.016	0.002	0.142		
FS	Coeffi.	0.639	0.747	0.812	0.487	0.269	0.774	0.330		
	p value	0.002	0.000	0.000	0.030	0.251	0.000	0.155		
<i>Salmonella</i>	Coeffi.	0.324	0.774	0.887	0.343	0.288	0.758	0.138		
	p value	0.164	0.000	0.000	0.139	0.219	0.000	0.561		
<i>Shigella</i>	Coeffi.	0.847	0.391	0.383	0.327	0.258	0.622	0.339		
	p value	0.000	0.089	0.096	0.159	0.272	0.003	0.144		

Table 3. Number of data used for calculating removal efficiencies from 20 analyses and the average, minimum and maximum bacterial removal efficiencies (%) of unit processes in Daejeon Sewage Treatment Plant. See table 1 for abbreviations

Bacteria	Process	PC			AT		SC	FD	Total (IN-FE)
	Adjacent samples	IN-PI	PI-PE	PE-AI	AI-AE	AE-SE	SE-FE		
HPC	# of reduction	11	17	5	11	20	5	20	
	Avg	32.85	48.19	39.24	51.85	93.94	45.02	95.01	
	Min	9.52	9.57	17.07	9.09	66.67	3.45	67.27	
	Max	79.52	85.88	60.45	87.69	99.92	77.14	99.53	
TC	# of reduction	11	14	8	12	20	5	19	
	Avg	44.58	49.15	37.05	61.06	94.68	50.51	83.94	
	Min	6.52	8.00	15.38	27.27	76.92	2.08	26.09	
	Max	80.00	90.74	51.02	97.92	99.84	80.83	99.86	
FC	# of reduction	13	15	6	14	19	6	20	
	Avg	50.12	38.62	40.12	70.98	88.38	66.58	94.84	
	Min	2.44	5.80	7.59	17.24	16.67	17.65	60.98	
	Max	92.90	80.72	92.73	98.58	99.81	97.37	99.96	
FS	# of reduction	11	19	8	13	20	4	20	
	Avg	30.54	47.12	32.10	50.72	95.87	37.80	98.08	
	Min	2.26	7.03	4.07	4.67	81.82	28.95	93.71	
	Max	87.38	85.73	91.30	86.38	99.81	50.00	99.71	
Salmonella	# of reduction	5	4	3	7	9	5	7	
	Avg	92.54	42.48	34.60	66.66	94.25	25.06	99.09	
	Min	62.79	17.95	25.00	12.90	66.67	4.76	97.40	
	Max	100.00	85.00	45.45	100.00	99.99	50.00	99.98	
Shigella	# of reduction	8	12	7	6	19	8	15	
	Avg	47.78	69.02	54.96	66.09	97.72	55.47	92.98	
	Min	5.17	20.00	16.67	43.41	83.85	9.09	43.08	
	Max	99.98	96.36	99.98	99.99	100.00	95.45	99.99	

수로 이동하는 동안의 세균 성장 가능성이다. Spearman's rho 상관계수로 종침유출수(SE)와 최종방류수(FE)의 세균 농도 관계를 보면, TC($p=0.058$)를 제외한 다른 항목들은 모두 유의성이 있었고($p<0.05$), HPC와 TC를 제외하고는 상관계수가 0.6 이상으로 세균농도의 높은 상관성을 확인할 수 있었다. 즉 최종방류관거로 유입되는 종침유출수의 FC와 FS 농도가 높을수록 최종방류수의 농도가 높다는 것이다. 하지만 수리학적 체류시간이 불과 몇 초~몇 분에 불과할 정도로 짧은 최종방류관거 길이를 고려할 때 종침유출수에 포함된 세균 생장은 불가능하다. 이것은 곧 종침유출수와 최종방류수 사이의 농도 상관성은 세균 생장이 아닌 다른 요인이 있다는 것을 의미한다. 둘째, 종침유출수에서는 결집되어 플록(floc)을 이루고 있던 세균들이 최종방류관거에서 방류되면서 분리됨으로써 세균수가 증가되었을 가능성이 있다. 이 가능성에 대한 확인실험은 본 연구에서 수행하지 않았으므로 가능성만을 제시하는 정도이다. 셋째는 외부로부터의 유입가능성인데, 연구기간동안 대전하수종말처리장 1단계 시설의 최종방류관거에는 2단계 시설의 유출수도 섞여 같이 방류되고 있었다. 2003년 9월 23일부터 12월 23일까지 총 4회에 걸쳐 2단계 시설의 종침유출수를 본 연구결과와 동일한 시료채취일에 분석한 결과, 1단계 처리시설과 비슷한 수질을 보였기 때문에(자료 미수록) 비록 2단계 시설의 방류수가 합류된다 하더라도 최종방류수의 수질은 나빠지지 않는 것으로 확인되었다. 넷째는 최종방류관거 자

체에서 성장한 세균이 종침유출수에 섞여 최종방류수로 나갈 가능성이 있다. 대전하수종말처리장은 비가 와서 유입하수량이 크게 증가하여 처리장 용량을 초과하면 최초침전지에서 1차처리만 하고 바로 최종방류관거로 유입되어 방류된다. Table 1을 보면 TC와 FC 농도의 감소는 주로 최종침전지(AE-SE)에서 일어난다는 것을 알 수 있다. 즉 1차처리만 거친 초침유출수는 종침유출수에 비해 TC 및 FC 농도가 1 log 이상 높은 폐수로서, 이것이 최종방류관거로 유입되어 바닥에 퇴적될 가능성이 있는 것이다. 처리장 운전요원이 처리장 가동이 중지되었을 때 지하 매설된 최종방류관거 내부를 확인한 결과 관거 바닥에 수십 cm 두께의 퇴적물을 확인하였다고 한다. 이 퇴적물이 바로 최초침전지에서 직접 최종방류관거로 유입된 폐수에서 유래했을 가능성이 높다. 따라서 최종방류수가 종침유출수보다 높은 세균수를 보이는 것은 최종방류관거 퇴적물이 원인일 가능성이 가장 큰 것으로 판단된다. 한편 Desmarais 등(2002)도 TC 등이 환경에서 성장하면서 재부유될 가능성이 높다고 보고하였다. 최종방류수의 수질 악화를 방지하여 수질기준을 만족시키기 위해서는 최종방류관거의 퇴적물을 제거할 필요가 있는 것으로 나타났다.

4. 결론

연속흐름혼합반응조(CFSTR, continuous flow-stirred tank

reactor)의 활성슬러지공법으로 처리되는 대전시 하수종말처리장의 단위공정별 세균 제거효율을 파악하기 위하여, 유입생하수(IN), 초침유입수(PI), 초침유출수(PE), 포기조유입수(AI), 포기조유출수(AE), 종침유출수(SE), 최종방류수(FE)를 대상으로 일반세균(HPC), 총대장균군(TC), 분원성대장균군(FC), 분원성연쇄상구균(FS), *Salmonella* 와 *Shigella* 농도를 측정하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 방류수 수질기준을 TC만 20회 가운데 단 1회만 초과하였으며, FS는 TC와 FC에 비해 낮은 농도로 검출되었다(Fig. 1, 2). 단 1회 기준초과 측정값은 세균의 확정 및 완전시험과 동정을 하지 않은 추정양성의 결과이며 초과정도가 기준치에 가까운 것으로 보아 완전시험으로 거치면 수질기준을 만족시킬 수 있을 것으로 보인다. 그러나 기준에 부합되었을 때의 측정치 역시 기준치에 가까운 경우가 여러 번 있었으므로 방류수 수질기준을 항상 만족시키기 위해서는 최종방류관거 준설이나 소독공정과 같은 추가대책이 필요한 것으로 판단되었다.
- 2) 유입생하수와 최종방류수 사이에서 양의 제거율을 보인 횟수 및 평균제거율을 보면, 전체 20회 분석 중 TC가 19회에 83.94%, FC가 20회에 94.84%, HPC가 20회에 95.01%, FS가 20회에 98.08%였다(Table 3).
- 3) 전체 20회 분석 중 단위공정별로 양의 제거율을 보인 횟수 및 평균제거율을 보면, 최종침전지의 경우 TC가 20회에 94.68%, FC가 19회에 88.38%, FS가 20회에 95.87%, HPC가 20회에 93.94%, *Shigella* 가 19회에 97.72%로서 가장 높은 제거효율을 보였다($p < 0.001$). 최초침전지에서 HPC, TC, FC, FS 등이 통계적으로 유의한($p < 0.05$) 세균 제거율을 보였다(Table 1, 3).
- 4) 종침유출수보다 최종방류수의 TC, FC, FS 농도가 높았는데(Fig. 1, 2, Table 1), 특히 TC와 FS는 통계학적 유의성도 있었으며($p < 0.05$)(Table 1, 2), 양의 제거율을 보인 횟수보다 음의 제거율을 보인 횟수가 많았다(Table 3). 종침유출수에서는 대장균군이 방류수 수질기준을 초과한 사례가 없었지만 최종방류수에서는 한 번 있었다. 따라서 최종방류관거의 퇴적물 청소나 종침유출수의 소독과 같은 추가적인 방류수 수질관리대책이 필요한 것으로 보인다.

참고문헌

김영준, 정명희, 정두영, 이혜영(2008). 하수처리장 방류수의 계절별 미생물분포에 관한 연구. *유기물자원화*, **16**(1), pp. 53-61.
 김종민, 정원화, 정현미, 원성민(2007). 해양으로 배출된 하

수처리수내 총대장균군의 활성 평가. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(1), pp. 12-18.
 백영석, 손진식(2006). 하수방류수의 대장균군 발생에 영향을 미치는 수질인자에 관한 연구. *수질보전 한국물환경학회지*, **22**(1), pp. 166-171.
 이민규, 정근식, 김상규(2008). 고전압 전기장을 이용한 하수처리장 방류수 중의 대장균군 소독에 관한 연구. *한국환경과학회지*, **17**(7), pp. 817-826.
 정두영, 정명희, 김영준(2009). 음식물류폐기물과 축산분뇨 혼합폐수의 이상혐기소화에 따른 소화액의 위생성 연구. *유기물자원화*, **17**(4), pp. 66-73.
 환경부(2004). *수질오염공정시험방법*.
 환경부(2008a). *'07년도 공공하수처리시설, 운영관리 실태조사 결과*.
 환경부(2008b). *먹는물수질공정시험방법*.
 환경부(2009). *환경백서*.
 Desmarais, T. R., Solo-Gabriele, H. M., and Palmer, C. J. (2002). Influence of soil on fecal indicator organisms in a tidally influenced subtropical environment. *Applied and Environmental Microbiology*, **68**(3), pp. 1165-1172.
 Kay, D., Crowther, J., Stapleton, C. M., Wyer, M. D., Fewtrell, L., Edwards, A., Francis, C. A., McDonald, A. T., Watkins, J., and Wilkinson, J. (2008). Fecal indicator organism concentrations in sewage and treated effluents. *Water Research*, **42**(1-2), pp. 2649-2661.
 McClellan, J. N., Reckhow, D. A., Tobiasson, J. E., Edzwald, J. K., and Smith, D. B. (2000). A comprehensive kinetic model for chlorine decay and chlorination byproduct formation. *Natural Organic Matter and Disinfection by-products: Characterization and Control in Drinking Water*, S. W. Krasner, S. E. Barrett and G. L. Amy (Eds.), ACS, Washington, DC, pp. 223-246.
 Peng, X., Luo, W., Zang, J., Wang, S., and Lin, S. (2002). Rapid detection of *Shigella* species in environmental sewage by an immunocapture PCR with universal primers. *Applied and Environmental Microbiology*, **68**(5), pp. 2580-2583.
 Sahlstrom, L., Aspa, A., Bagge, E., Tham, M. L. D., and Albihn, A. (2004). Bacterial pathogen incidences in sludge from Swedish sewage treatment plants. *Water Research*, **38**(8), pp. 1989-1994.
 Savichtcheva, O. and Okabe, S. (2006). Alternative indicators of fecal pollution: Relations with pathogens and conventional indicators, current methodologies for direct pathogen monitoring and future application perspectives. *Water Research*, **40**(13), pp. 2463-2476.
 Vanotti, M. B., Millner, P. D., Hunt, P. G., and Ellison, A. Q. (2005). Removal of pathogen and indicator microorganisms from liquid swine manure in multistep biological and chemical treatment. *Bioresource Technology*, **96**(2), pp. 209-214.