

우리나라 하수처리장 방류수 수질현황 및 특성

김영철[†] · 안익성^{*} · 강민기

한서대학교 환경공학과
^{*}(주)대경

Survey of the Secondary Effluents from Municipal Wastewater Treatment Plants in Korea

Kim, Youngchul[†] · An, Ik-Sung^{*} · Kang, Min-Gi

Hanseo University, Dept. of Environmental Engineering
^{*}Dae kyong Co.

(Received 8 November 2004, Accepted 3 December 2004)

Abstract

In this study, the discharging effluents from have been 9 municipal wastewater treatment plants surveyed for 1 year-period. Statistics including probability distribution, cumulative occurrence concentration and other statistical parameters were presented. In addition, treatment performance and its stability were also discussed. Most of the plants, have an operational problem of high soluble organic content in the secondary effluent which may be associated with the integrated treatment of human and livestock manures. Nitrogen concentration in the effluents were usually higher during the period of summer and winter. It was found that this is mainly due to lack of the proper C/N ratio during the summer, or/and the effects of low temperature and less dilution by dry weather during the winter. Phosphorus concentration is sharply increased in June. Discussion with plant operators told that it is due to the dissolution of phosphate from the sludge accumulated in the primary settling tanks from the early spring to June. During this period, usually, sludge treatment line is highly overloaded with flush-outs of the sediments also stored in the bottom of combined sewer due to the low flow during winter season. Most of the plants can meet new effluent discharge limits of the nitrogen and phosphorus, and total coliform without further treatment.

keywords : Municipal wastewater treatment plant, Treatment performance, Secondary effluent, Stability

1. 서론

우리나라에서는 1979년 청계천 하수 처리장이 건설된 이래 2003년 말 기준 총 250개소의 처리시설이 가동 중이며 정확한 일일 처리수 배출량은 집계하기 어렵지만 일일 설계 처리용량이 약 2,000만 톤에 달하고 있다(환경부, 2003). 그 동안 하수처리장 설계 및 건설기술에 있어 비약적인 발전이 있었다.

하수처리시설이 계속 건설되고 있는 상황에서도 하수처리분야에 많은 변화가 있었다. 국내 하수처리장은 분뇨, 축분과 쓰레기 매립장 침출수 등 각종 연계수처리 등으로 하수처리시설의 기능이 확대되었다. 처리시설의 기능이 확대된 셈이다. 연계수의 처리는 우리나라 하수처리장 유입하수의 농도가 설계농도에 비하여 낮으므로 여유처리용량을 활용하자는 측면에서 착안된 것이다.

문민정부와 IMF를 거치면서 국가 각 부문에 민영화 정책이 추진되었다. 하수처리장도 예외는 아니었다. 많은 하

수처리시설의 관리주체가 지자체의 공무원에서 민간으로 이관되면서 하수처리장 전반에 운전대행회사의 설립으로 민간기술자가 유입되었다. 하수관거 정비사업이 본격적으로 추진된 것도 이 시기였다.

최근에는 기존의 2차 처리시설을 개량하여 동시에 3차 처리목표까지 달성할 수 있는 시설로 전환하는 사업이 진행 중이다. 또한 최근의 화두는 장래 물 부족 문제를 해결하기 위한 대안으로 추진되고 있는 하수처리장 방류수 재이용이다(건설교통부, 2001). 재이용을 촉진시키기 위하여 기존의 2차 처리시설을 개량하고 2, 3차 처리를 거친 방류수를 재처리하는 정책까지도 검토되고 있다.

이렇게 빠른 양적팽창과 변화 속에서도 하수처리장 운영 관리 분야에 대한 연구와 투자는 관심을 끌지 못했다. 특히 하수처리장 공정분석과 처리성능 등을 평가할 수 있는 신뢰할 만한 현장자료는 기대하기 힘들다. 그 이유는 하수처리장의 방류수의 분석항목과 빈도를 규정하고 있을 뿐 운전과 성능평가를 위해 측정해야하는 항목과 빈도 등에 관한 특별한 규정이 없기 때문이며, 또한 현장에서는 인력 부족으로 공정분석을 위한 자료는 커녕 규제대상 항목의 분석에도 어려움을 호소하고 있다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
ykim@hanseo.ac.kr

국내에서 가동 중인 하수처리장의 처리성능과 처리안정도 등과 같은 가동실태에 관한 객관적인 조사가 이루어진 적이 없었다. 조사가 이루어졌더라도 현장 하수처리장 관리주체가 분석한 자료이거나 단기간 동안 소수의 하수처리장을 대상으로 수행된 조사가 전부이기 때문에 하수처리장 전반에 대한 대표성을 갖지 못한다(환경관리공단, 2001; 김 등 2003). 하수처리장 방류수 수질자료의 축적은 처리시설 고유의 History로서 장래 처리시설의 확장이나 개량을 추진하고자 할 경우 매우 중요한 자료이다. 그러나 실제로 우리나라 하수처리장 자체 분석결과는 많은 신뢰를 얻지 못하고 있는 게 사실이다. 따라서 시설확장이나 시설개량을 위한 진단조사 작업 진행시 정작 필요한 자료가 없거나 자료의 오류 등으로 정확한 처리용량의 평가가 어려운 것이 현실이다. 본 연구에서는 전국에 산재한 하수처리장 중 9개소의 연구대상 하수처리장을 선정하여 1년여에 걸쳐 처리성능과 방류수 수질실태를 직접 조사한 결과를 제시하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구대상 하수처리장

하수처리장 방류수(2차 처리수)의 실태와 특성을 조사하기 위하여 우리나라 중부와 남부지방에서 가동 중인 9개의 하수처리시설을 선정하였다. 하수의 성상이 지역에 따라 크게 다르지 않으므로 연구대상 시설의 선정 시 우선적으로 고려된 것은 시료채취에 소요되는 시간과 노동력을 가급적 줄이기 위하여 연구기관으로부터의 접근성과 연구대상 하수처리장이 도시와 농촌지역에서 고른 분포가 될 수 있도록 하였다. 또한, 하수와 함께 생 분뇨 또는 분뇨 처리수의 연계처리여부, 그리고 축산폐수나 쓰레기 매립장 침출수 통합처리 여부에 대하여 검토하였다. 그러나 이러한 검토는 다양한 하수처리시설이 포함되게 하여 대체적인 우리나라 하수처리장 방류수의 수질상황을 파악하도록 하기 위함이지 연계처리가 방류수의 수질에 미치는 영향을 분석하는 것이 본 연구의 주 목적은 아니었다. 다만 연계처리 여부가 방류수에 미치는 영향을 설명할 필요가 있을 경우에는 간략히 기술하였다.

모든 시설의 처리는 표준 활성슬러지 공법에 의해 이루어

지나 2차 처리 후 살균을 도입하고 있는 처리시설은 2개소이다. 아래 Table 1에는 선정된 처리시설의 처리용량 등의 주요사항을 요약정리 하였다. 본 연구대상 하수 처리장은 우리나라 전체 처리시설의 약 5%에 해당되며, 처리용량 기준으로는 약 3%(조사대상 방류수 일일 약 58만 톤), 그리고 그 중에 처리용량 대비로 도시지역이 77%, 농촌지역이 각각 23%에 해당된다.

2.2. 샘플링 빈도

유입하수의 수질변동과 많은 인위적, 자연적인 운전변수의 변화로 인하여 하수 처리장 2차 처리수의 수질과 처리 성능에 변동이 있게 마련이다. 따라서 이러한 불확실성을 고려하여 하수 처리장 처리수 수질특성이나 성능을 평가할 때 확률에 따른 확률농도 개념을 이용하고 있다(Niku et al., 1979). 이러한 기법에 의해 처리수의 수질을 평가할 때 농도분포에 결정적인 영향을 미치는 요인은 샘플링 빈도일 것이다. 샘플링 빈도가 커질수록 정확한 방류수의 수질분포를 도출할 수 있지만 이에 동원되는 노동력과 비용이 문제가 되는 경우가 대부분이다. 따라서 합리적인 샘플링 방법에 기초한 수질 조사계획의 수립이 필요하다. 하수처리장 방류수 수질이 정규 확률분포를 따른다고 가정할 때(실제로 정규 확률분포를 보임) 대표확률분포를 얻는데 필요한 샘플링 빈도결정에 관한 예비 연구결과(김 등, 2004)에 따르면 샘플링 빈도는 매일 분석하는 것이나 5~10일 간격으로 분석하는 것이나 동일한 신뢰성을 주므로 시간적 경제적인 측면에서 처리시설의 고유성능을 평가하는데 큰 문제가 없다. 따라서 이와 같은 연구결과를 바탕으로 Table 2에 제시된 샘플링 프로그램에 의해 우리나라 9개 하수처리장의 방류수 모니터링에 착수하였다.

2.3. 모니터링 항목

연구대상 하수처리장의 방류수 모니터링 수질항목은 수온, 용존산소, 총 용존고형물(TDS), pH, 알칼리도, 탁도, 부유물질, COD_{cr}, Soluble COD_{cr}, TN, NH₃-N, NO₃-N, TP, PO₄-P, Total Coliform, E-Coli, Fecal Coliform 등이었다. 농업용수나 중수도 등으로 재이용 하고자 할 때 고려항목인 Li, Be, Na, Mg, Al, K, Ca, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni,

Table 1. Sewage treatment plants used for this study

Plant	Capacity(m ³ /d)	Equalization tank	Human manure	Livestock manure	Leachate	*Sludge	Disinfection
A	20,000~30,000	×	○	×	○	×	×
B	10,000~20,000	×	○	×	×	×	×
C	10,000~20,000	○	○	×	×	×	UV
D	100,000 ≤	×	○	×	○	×	×
F	20,000~30,000	×	×	×	●	×	×
G	10,000~20,000	○	×	×	●	×	Chlorine
H	100,000 ≤	×	○	×	●	○	×
I	100,000~300,000	×	○	○	○	×	×
J	30,000~40,000	×	○	○	●	×	×

Human and livestock manure/leachate; ●: without pre-treatment, ○: after pre-treatment

* sludge produced from water treatment

Table 2. Sampling frequency of the secondary effluents from the plants

Plant	Frequency	Period	No. of samples
A	2~3/week	2002. 2~2003. 1	116/yr
B	1/2 weeks	2002. 9~2003. 8	24/yr
C	1/2 weeks	2002. 9~2003. 8	24/yr
D	1/2 weeks	2002. 9~2003. 8	24/yr
F	1/2 weeks	2002. 9~2003. 8	24/yr
G	1/2 weeks	2002. 9~2003. 8	24/yr
H	1/2 weeks	2002. 9~2003. 8	24/yr
I	1/2 weeks	2002. 9~2003. 8	24/yr
J	1/2 weeks	2002. 9~2003. 8	24/yr

Cu, Zn, As, Se, Cd, Pb 등을 연구기간 동안 5회에 걸쳐

ICP Mass에 의해 분석하였다. 모든 수질항목은 수질오염 공정 시험법(환경부, 1999)과 *Standard Methods*(APHA, 1993)에 의해 측정 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 방류수의 수질확률분포

Fig. 1~2에는 9개 하수처리장 방류수 수질조사결과를 누적확률 그래프에 나타내었다. 일반적으로 하수처리장 2차 처리수의 SS, BOD₅, COD_{cr} 자료는 정규 확률분포를 갖는 것으로 알려져 있다(Critics et al., 1997). 그림에 따르면 누적확률지에 표시한 대부분의 수질항목의 자료가 정규분포를 나타낸 반면 수온과 운전변수의 영향을 크게 받는

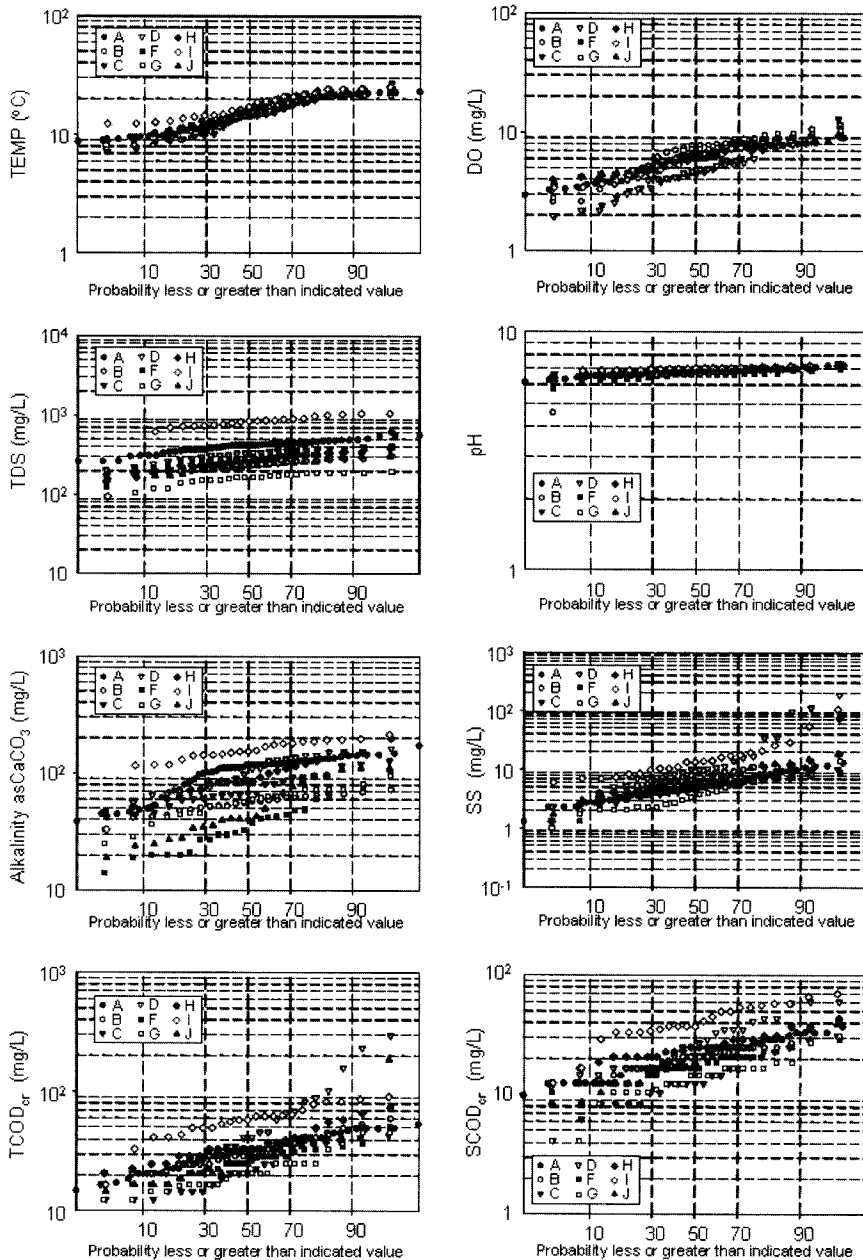


Fig. 1. Cumulative probability distribution graphs - Water Temperature, DO, pH, Alkalinity, SS, TCOD_{cr}/ SCOD_{cr}.

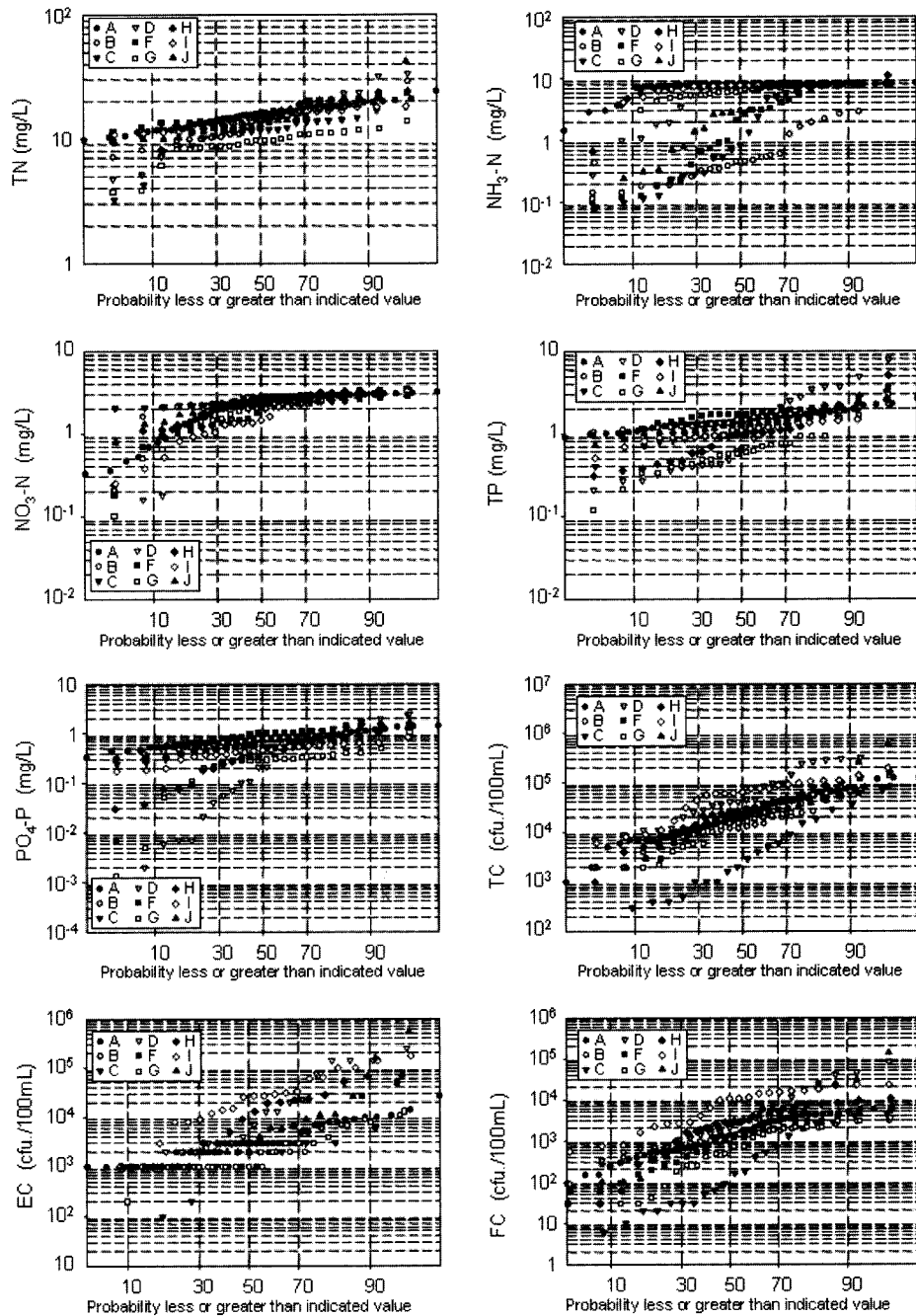


Fig. 2. Cumulative probability distribution graphs - TN, NH₃-N, NO₃-N, TP, PO₄-P, TC, EC, FC.

NH₃-N와 NO₃-N의 경우 정규분포에서 크게 벗어남을 알 수 있다. 그러나 전체적인 질소농도(TN)는 정규분포를 보였다. PO₄-P는 일부 하수처리장에서 정규분포를 벗어났으나 TN과 마찬가지로 TP의 경우에는 정규 확률분포를 보였다.

3.2. 방류수의 수질특성

수질자료의 통계학적 분석에서는 연속적으로 측정된 일련의 자료를 정상화하기 위해서는 통계학적인 인자를 결정하는 작업이 필요하다. Table 3에는 누적확률발생농도(P_{10} , P_{80}), 중간값(P_{50}), 평균값(mean), 최소값(min), 최대값(max), 표준편차(Std), 변동계수 CV(coefficient of variation) 등을

요약하여 나타내었다.

Table 3에 따르면 동절기를 포함한 조사기간 동안 조사 대상 하수처리장 방류수의 수온은 median 값으로 14.4~17.2°C이었고 모든 하수처리장에서 최소 7.2°C 이하로는 떨어지지 않았다. 여름철 최대로 21.2~26.9°C까지 상승하였다.

2차 처리수의 pH, DO의 median 값은 각각 6.6~7.1, 4.4~7.8 mg/L 수준을 보였으며 각각 년 중 median 값의 ±2~7%와 27~50% 변동하였다. 용존산소의 연중분포를 보면 1년 중 90%에 해당하는 기간동안 7.8~9.8 mg/L 이하를 기록하였고 모든 처리장에서 최소 1.2 mg/L 이하는 관

Table 3. Summarized results of the secondary effluent from 9 different sewage treatment plants

Parameters	TEMP (°C)	DO (mg/L)	TDS (mg/L)	pH	Turbidity (NTU)	Alk. (mg/L)	SS (mg/L)	TCOD _{cr} (mg/L)	SCOD _{cr} (mg/L)
<i>P</i> _{10%}	8.3~12.8	2.3~4.5	119~633	6.3~6.9	1.0~2.5	20~118	2.0~7.1	13~41	8~30
<i>P</i> _{50%}	14.4~17.2	4.4~7.8	166~873	6.6~7.1	1.9~4.6	36~153	3.5~13.3	21~58	12~37
<i>P</i> _{90%}	20.8~24.2	7.8~9.8	190~1030	6.8~7.2	3.7~14.4	67~193	7.1~78.4	35~141	19~58
<i>Min</i>	7.2~12.3	1.9~4.0	93~265	4.6~6.6	0.5~2.2	14~47	1.0~6.0	12~21	4~12
<i>Max</i>	21.2~26.9	9.1~12.9	195~1063	7.0~7.4	5.0~50.5	73~214	9.0~186.0	44~295	29~71
<i>Mean</i>	14.4~18.0	5.1~7.0	162~790	6.6~7.0	2.4~7.7	40~155	4.6~26.1	23~67	14~43
<i>Std</i>	4.2~5.4	1.7~2.6	28~240	0.2~0.5	1.1~10.0	10~38	1.9~43.8	8~69	5~15
<i>CV</i> (%)	±24~35	±27~50	±15~33	±2~7	±41~133	±17~55	±39~169	±30~102	±27~51

Parameters	TN (mg/L)	NH ₃ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	TP (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)	TC (cfu./100 mL)
<i>P</i> _{10%}	6.8~13.4	0.12~7.20	0.45~2.15	0.3~1.2	0.01~0.57	0~1,100
<i>P</i> _{50%}	9.6~16.1	0.46~7.78	1.46~2.77	0.6~1.7	0.21~1.04	1,600~64,000
<i>P</i> _{90%}	11.6~23.3	2.55~8.02	2.58~3.30	1.4~3.7	0.44~1.64	26,000~292,600
<i>Min</i>	3.2~11.5	0.08~1.47	0.10~2.04	0.1~1.1	0.01~0.33	0~7,000
<i>Max</i>	13.8~42.4	7.74~11.03	2.79~3.48	2.3~7.9	0.83~2.49	71,001~700,000
<i>Mean</i>	9.4~16.5	1.10~7.35	1.71~2.63	0.8~1.8	0.29~0.91	8,874~119,792
<i>Std</i>	2.4~7.0	1.39~3.25	0.38~0.90	0.3~1.9	0.16~0.72	16,663~160,820
<i>CV</i> (%)	±17~45	±19~150	±15~52	±21~112	±30~124	±66~230

측되지 않았다.

방류수의 TDS와 알칼리도는 처리장별로 매우 큰 차이를 보였다. TDS의 경우 처리장 별 *median* 값은 최소 166 mg/L에서 최대 873 mg/L이었다. 알칼리도의 *median* 농도는 36~153 mg/L 범위였다.

탁도 및 SS의 *median* 농도는 각각 1.9~4.6 NTU와 3.5~13.3 mg/L을 나타내었다. 방류수의 탁도 및 SS의 변동 폭은 매우 커서 각각 *median* 농도의 ± 41~133%, SS는 ± 39~169%이었다. 이것은 조사대상 하수처리장 일부 2차 침전지의 성능변화가 매우 컸음을 보여주고 있다.

유기물질을 나타내는 COD_{cr}의 경우 *median* 농도는 21~58 mg/L로 방류되고 있었으며 1년 중 10%에 해당되는 기간동안에는 39~202 mg/L 이상을 나타내었다.

방류수의 총질소 농도 TN의 *median* 값은 9.6~16.1 mg/L, 변동 폭은 ± 17~45%였다. 총인의 *median* 농도 0.6~1.7, 변동 폭은 ± 21~112%로 처리장별로 큰 변동이 있었다. TN에 비해 TP의 변동 폭이 매우 컸음을 보여주고 있다. 조사대상 방류수의 COD_{cr}/TN의 비율은 최소 2.2에서 최대 3.6이었다. 병원성 미생물에 대한 지표 박테리아로 분석된 총대장균군의 *median* 밀도는 1,600~64,000 cfu/100 mL이었고 처리장별로 가장 큰 변화가 있었던 항목이었다.

3.3. 처리 성과와 안정도

방류수 자료의 정규 확률분포를 따른다는 전제하에 *median* 농도나 90%, 95% 농도 등이 처리시스템의 성능 (performance)을 나타낸다고 하면 안정도(stability)란 처리 시스템에서 처리성능의 일관성을 파악하는데 사용되는 인자로서 누적확률 그래프에서 보통 *P*₁₀과 *P*₉₀의 비를 말하며 이것을 안정도 계수라고 한다(Crities et al., 1997). 안정도 계수가 클수록 성능의 편차가 커 처리가 불안정하게 이루어

지는 것을 의미하며 그 원인은 처리 시스템 고유의 처리특성, 또는 설계상의 오류, 그리고 운전방법 등에 기인한다. 아래 Table 4에는 조사대상 처리시설의 처리 안정도 계수를 제시하였다.

조사대상 하수처리장의 SS와 COD_{cr}의 안정도계수는 각각 2.1~5.8, 1.7~4.1을 나타내어 일부 시설을 제외하고는 매우 안정된 처리를 보였다. 안정도 계수가 적다는 것은 원활한 처리를 나타내는 척도는 아니며 처리성능 인자와 비교 평가하여야 할 것이다. SS의 경우 D, I 처리장이 그림 1의 확률지에 나타난 것처럼 일부 기간동안에 2차 침전지로부터 활성슬러지 유출이 발생하였지만 대부분의 2차 침전지 기능은 양호한 것으로 판단된다.

COD_{cr} 처리성능은 방류수 규제방법이 다르므로 우리나라 방류수 망간 COD 기준을 바탕으로 하는 성능평가는 불가능하다. 그러나 만약 우리나라에서 COD_{cr}을 기준으로 채택한다 하더라도 조사대상 하수처리장의 절반 정도의 시설에서는 현재의 방류수 기준을 1년 중 80~90%에 해당하는 기간동안은 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다.

자료에 따르면 심각한 운영문제를 안고 있는 것으로 판단되는 D 처리시설에서는 슬러지 침전문제와 유기물질 처리문제를 동시에 안고 있는 시설로 보이며, I 시설에서는 주로 포기시간 부족 등에서 나타나는 유기물질 제거문제를 가지고 있는 것으로 판단된다.

방류수의 대장균 밀도는 살균시설 설치여부와 축분/분뇨 연계처리에 의해 큰 영향을 받는 것으로 보인다. F, G 하수처리장의 경우 연계처리를 하는 다른 처리장과 비교해 볼 때 처리 안정도가 매우 불량한 것으로 나타났는데 이는 F, G 처리장의 동절기 대장균 밀도가 상대적으로 낮았기 때문에 나타난 현상이다. 살균을 도입한 C 하수처리장(UV 소독)과 H 처리장(염소소독)의 경우에는 다른 처리시설에

Table 4. Treatment performance and stability of the plants

Plant	Parameters	Turbidity	SS	COD _{Cr}	SCOD _{Cr}	TN	TP	TC
A	P_{10}	1.5	2.8	21	12	11.74	1.10	7000
	P_{80}	3.6	8.3	41	28	18.17	1.74	51000
	P_{80}/P_{10}	2.4	3.0	2.0	2.2	1.6	1.6	7
B	P_{10}	2.1	4.1	21	14	8.61	1.16	4300
	P_{80}	4.7	11.0	40	25	17.38	1.82	24800
	P_{80}/P_{10}	2.2	2.7	1.9	1.8	2.0	1.6	6
C	P_{10}	1.5	2.7	13	8	8.04	0.74	0
	P_{80}	3.0	6.7	37	21	13.86	1.49	12600
	P_{80}/P_{10}	2.0	2.5	2.9	2.5	1.7	2.0	-
D	P_{10}	2.5	4.1	21	15	7.67	0.29	11000
	P_{80}	8.8	23.6	86	42	20.56	3.04	248000
	P_{80}/P_{10}	3.5	5.8	4.1	2.8	2.7	10.5	23
F	P_{10}	1.3	2.5	17	13	13.38	1.23	2300
	P_{80}	3.6	6.4	33	22	18.77	1.99	46000
	P_{80}/P_{10}	2.7	2.5	2.0	1.7	1.4	1.6	20
G	P_{10}	1.0	2.0	15	9	6.76	0.34	2060
	P_{80}	2.9	6.7	25	17	11.15	0.92	44300
	P_{80}/P_{10}	3.1	3.4	1.7	1.9	1.7	2.7	22
H	P_{10}	1.3	3.5	25	19	12.21	0.40	5300
	P_{80}	3.4	7.5	45	30	20.37	1.50	64800
	P_{80}/P_{10}	2.7	2.1	1.8	1.5	1.7	3.8	12
I	P_{10}	2.3	7.1	42	30	11.28	0.84	9400
	P_{80}	8.9	20.1	76	55	16.67	1.35	101600
	P_{80}/P_{10}	3.9	2.8	1.8	1.8	1.5	1.6	11
J	P_{10}	1.4	3.7	17	11	10.03	1.02	3400
	P_{80}	4.7	11.5	37	26	17.34	1.54	36800
	P_{80}/P_{10}	3.4	3.1	2.2	2.4	1.7	1.5	11
Total	P_{80}/P_{10}	2.0~3.9	2.1~5.8	1.7~4.1	1.5~2.8	1.4~2.7	1.5~10.5	6~23

비해 P_{10} 과 P_{80} 값이 상대적으로 적었다.

연구대상 처리시설이 2차 처리목표로 설치되었으므로 영양소 농도의 처리성능 비교는 의미가 없지만 대체로 연계처리를 하지 않는 시설의 방류수에서 당연히 질소와 인의 농도가 낮게 조사되었다. 연계처리가 유기물질 제거성능에 미치는 영향이 COD_{Cr} 수준에서 보면 별 차이가 없었지만 용존 COD_{Cr} 농도 증가와 관련이 있었다. 이러한 결과는 단지 9개의 하수처리장으로부터 얻은 결과이지만 우리나라 하수처리공정이나 운전방식에 있어 비슷한 여건이므로 대체로 우리나라 하수처리장의 운전실태를 파악할 수 있는 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

3.4. 방류수의 유기물질 형태

아래 Fig. 3에는 A 하수 처리장 2차 처리수의 부유물질 농도와 COD_{Cr} 자료를 나타내었다. 그림에 나타난 것처럼 2차 처리수의 유기물질 농도는 2차 침전지로부터 유출되는 미생물의 농도, 즉 부유물질과는 관계가 없음을 보여주고 있다. 또한, 대부분의 자료가 미생물의 유기물질 등가선 상부에 위치하고 있는 것으로 미루어 A 하수 처리장의 2차 침전공정의 문제는 없다는 점을 시사해주고 있으며, 유출되는 유기물질은 대부분 용존성 유기물질이라는 사실을 암시하고 있다. 따라서 A 하수 처리장의 운전상의 문제는 2차

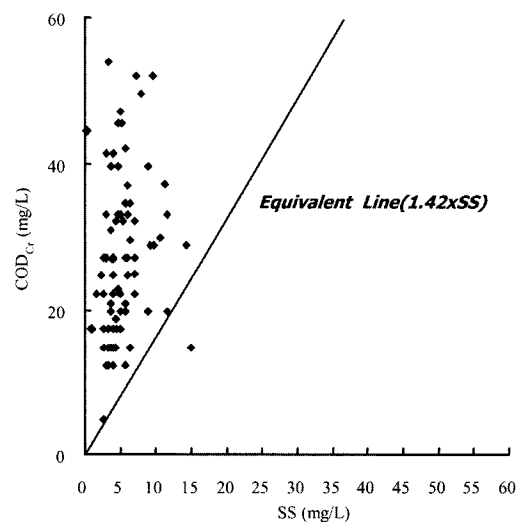


Fig. 3. "A" Plant - Relationship between COD and SS.

침전지가 분뇨나 축분과 같은 연계수의 투입에 기인하는 난분해성 물질인 것으로 보인다.

Fig. 4에는 8개월 동안 수집한 F 하수 처리장 방류수의 부유물질 농도 자료와 BOD₅ 자료(하수처리장 공동 분석자료) 사이의 관계를 나타내었다. 그림에 따르면 처리수의 유기물질은 침전지로부터 유출되는 부유물질과 관련이 있음

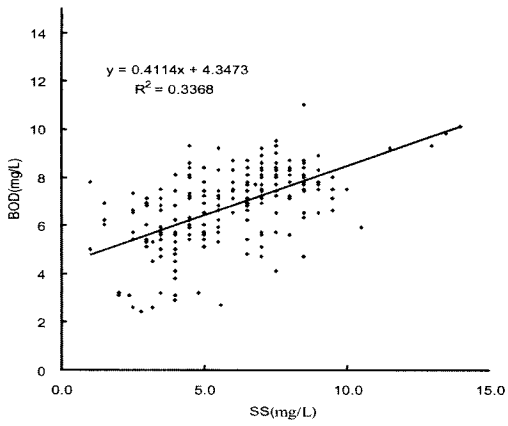


Fig. 4. "F" Plant - Relationship between COD and SS.

을 알 수 있다. 두 자료를 최적으로 통과하는 직선의 절편 값 4.3은 8개월 동안 2차침전지를 떠난 방류수의 평균 용존 농도를 나타낸다(WPCF., 1976). 연계수가 없는 F 하수처리장의 유기물질의 증감은 활성 슬러지 침전성과 침전지의 수리학적 운전조건에 의해 결정되는 것으로 보인다.

연구대상 처리시설 중 A 처리장과 동일한 문제를 가지고 있는 시설은 아래 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 B, C, G, I, J 처리장이었다. 대체로 A 하수처리장과 마찬가지로 분뇨와 축분을 연계처리하고 있는 시설이 해당되며 방류수의 COD와 SS 농도 범위는 비슷한 수준이었다. D와 H 하수처리장의 SS-COD 관계는 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 D, H 시설은 수리학적 과부하에 의한 침전문제와 함께 A 하수처리장에서 갖고 있는 문제가 동시에 발생되고 있음을

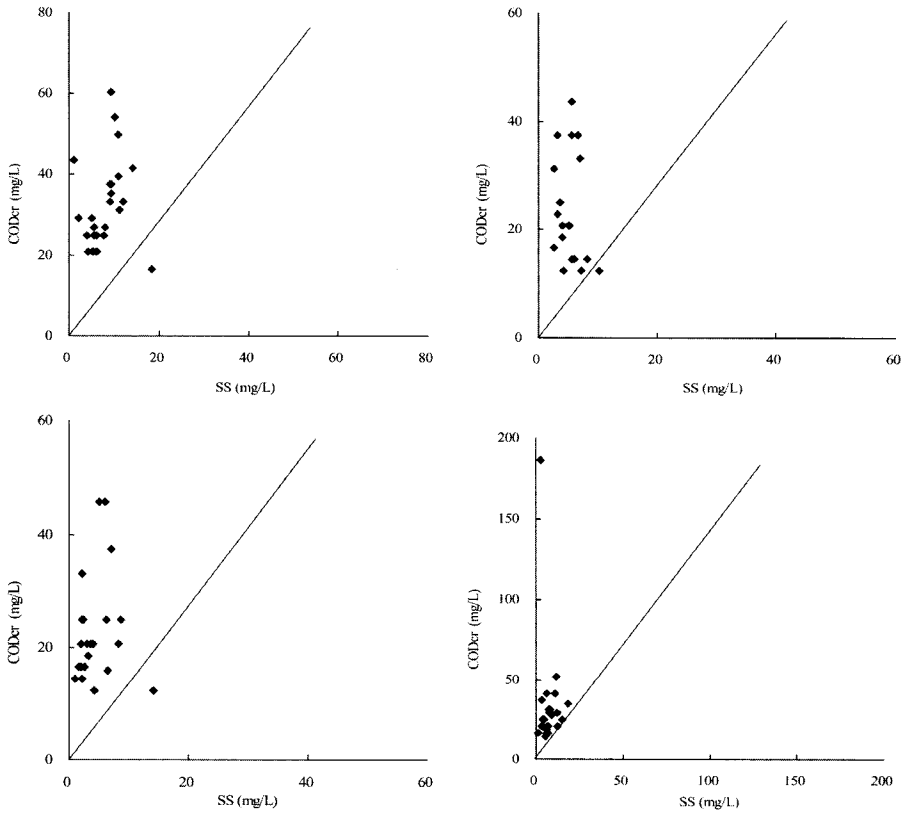


Fig. 5. "B, C, G, I, J" Plants - Relationship between COD and SS.

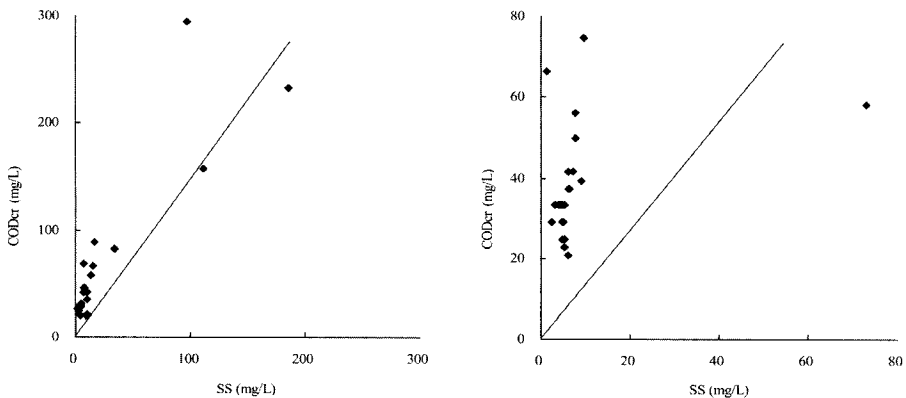


Fig. 6. "D, H" Plants - Relationship between COD and SS.

알 수 있다. 이러한 하수처리장은 용량평가연구(rating study)를 수행한 후 적절한 증설이 요망된다.

3.5. 질소

질소 농도 형태를 월별로 Fig. 7에 제시하였다. 그림에 따르면 질소농도는 대체로 겨울철에 높고 봄철에 감소하였다가 6월경 초여름에 접어들면서 증가하는 양상을 보이고 있다. 그러나 A 하수처리장은 동절기에 높고 오히려 하절기에 감소하는 패턴을 보였다.

우리나라에서는 대부분의 하수처리장이 하수와 함께 분뇨, 축산폐수, 매립장 침출수를 연계처리 하기 때문에 질소 농도의 시간적 패턴 변화를 정확히 규명하기는 매우 어렵다. 그러나 하수처리장 자체 실험값에 근거하여 조사한 결과 강우에 의한 희석효과가 발생하는 하절기에 질소농도 증가 원인으로서는 유입수에 함유된 영양소 불균형이 하나의 원인으로 추정된다. 활성슬러지법이 원활히 유지되기 위한 영양물질 구성비를 통상적으로 C:N:P=100:5:1로 주로 제시하는데 이중 탄소원의 일부는 이화작용과 동화작용에 사용되고 나머지는 생물학적 플럭에 의해 응집되고 소량이 미처리되어 유출된다. 미생물의 활동에너지로 이용되는 이화작용에 의해 소모되는 탄소양은 정량화하기 어렵지만, 동화작용의 경우 경험적인 박테리아 분자식(C₆H₁₂NO₂)을 기준하여 살펴보면 세포구성에 필요한 C:N비는 약 6:1이다. 또한 TKN 성분의 세포전환율은 $N_{\Delta Xc} = 0.12 \Delta Xc$ 로 제시되는데 ΔXc 는 기질제거율에 영향을 받는 것으로 알려졌다(McCarty, 1970). 분뇨, 축산폐수와 같은 연계처리가 유입되지 않는 F, G 처리장의 영양소의 대부분은 생하수에 함유된 것으로 이들 처리장의 봄과 여름철 유입 탄소, 질소의 구성을 살펴보면 F 처리장의 경우 봄, 여름의 유입 C:N비는 5.5:1과 3.6:1로 나타났으며, G 처리장의 봄, 여름

의 C:N비는 각각 4.6:1과 4.1:1로 나타나 하수중에 함유된 질소성분이 세포합성으로 제거되기에는 탄소원의 비율이 부족한 것으로 나타났다.

또한 동절기의 증가요인 동절기 하수처리장 유입유량이 하절기 유입하수량이 2/3 수준으로 감소하고 연계수의 경우 발생 특성상 년 중 발생량의 차이가 크지 않아 연계수에 함유된 고농도 영양염류가 하수에 의한 희석 효과가 감소하기 때문이다. 또한 동절기 온도 저하로 인한 국부적인 질산화와 2차 침전지에서 탈질반응이 크게 둔화되었기 때문이다(Van Haandel et al., 1982).

총질소 농도를 살펴보면 모든 조사대상 처리시설에서 새로 강화된 질소기준 20 mg/L를 대체로 만족시키는 것으로 조사되었다. 1년을 기준으로 보면 총질소의 구성은 먼저 유기질소의 농도가 알려진 것 보다 상당히 높았다. 대체로 유기질소와 암모니아 또는 질산성 질소가 주종을 이루었다.

3.6. 인

Fig. 8은 연구대상 처리장의 년중 인 농도 추이를 나타낸 것이다. 그림에서 인의 경우 기온저하로 인해 처리효율이 떨어지는 동절기에 높게 나타났으며(Hong et al., 1981), 2월 이후 안정된 처리특성을 보이다가 6월에 급격히 상승한 후 7월부터 안정되는 특성을 보이고 있다. 활성슬러지법에 의한 TN 처리는 형태변화를 유발하는 질산화와 처리효율에 직접 관여하는 생체물질로 전환과 최종침전지 하부에서 일부 발생하는 탈질현상으로 쉽게 구분할 수 있는데 비하여 인의 경우 생체물질로 전환, 응집침전, 인 방출, 과잉 인 흡수 등과 같이 좀더 복잡한 메카니즘에 의해 처리된다. 본 연구는 하수처리장 방류수만을 채수하여 분석하였기 때문에 앞에서 언급한 다양한 인 제거 메카니즘을 규명하기에는 많은 어려움이 따르며 특히 6월달 대부분의 처리장

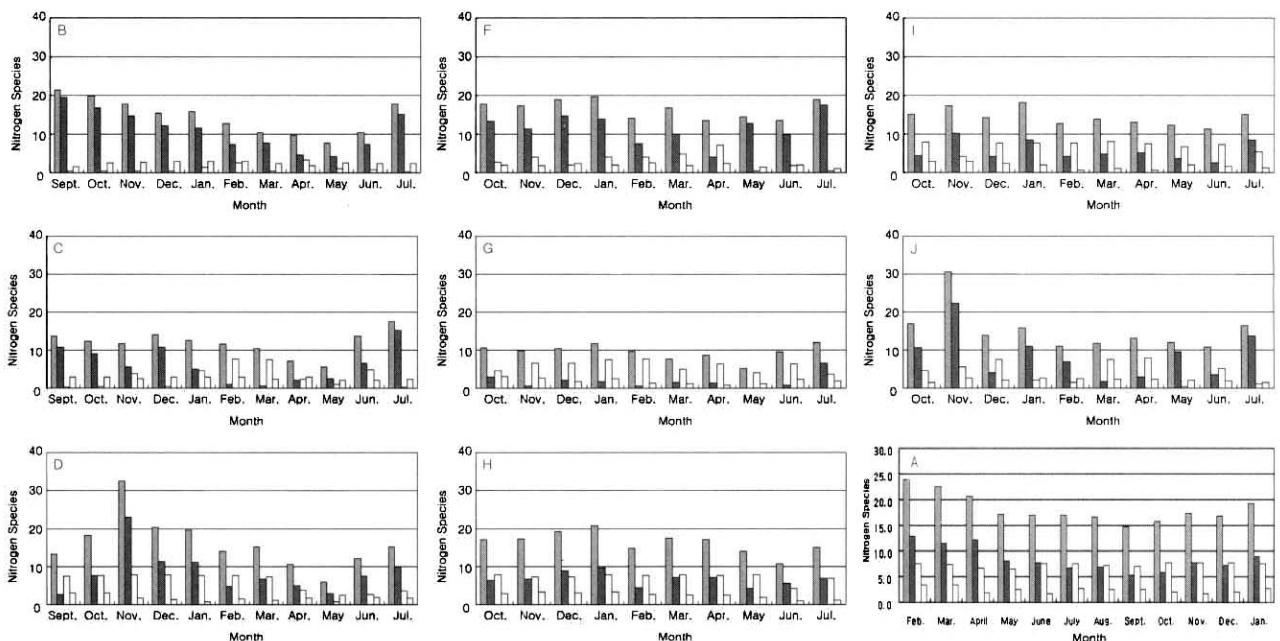


Fig. 7. Monthly distribution of the Nitrogen species (From left side, TN, Org.-N, NH₃-N, NO₃-N).

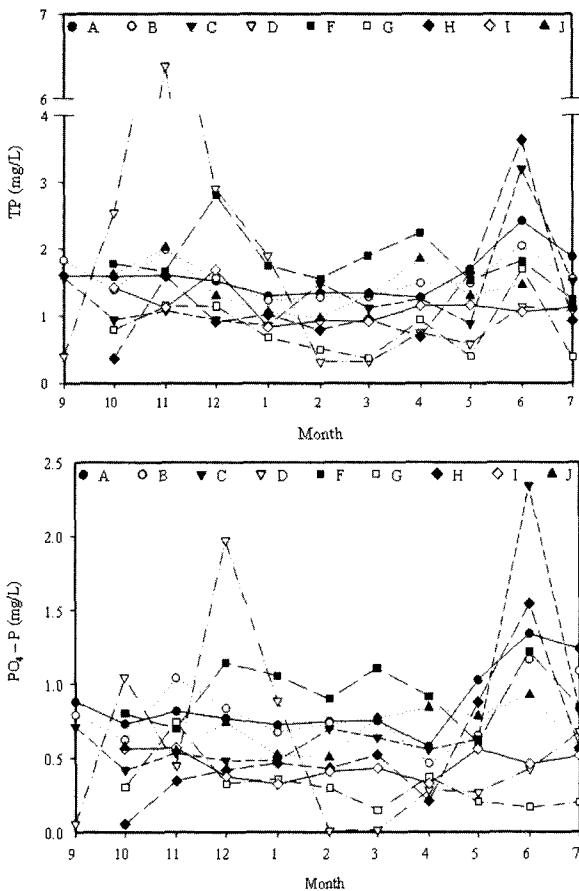


Fig. 8. Monthly change of the phosphorus.

방류수에서 급격히 인 농도가 상승하였다가 7월부터 안정화 되는 경향은 방류수 수질분석만으로 이해할 수 없어 연구대상 하수처리장을 직접 운전하는 실무자에 대한 탐문조사를 실시하였다.

탐문조사 결과 6월달 급격한 인 농도 상승 요인으로 처리장 탈수능력이 부족할 경우, 봄철 유입되는 침전 가능한 SS 성분이 최초침전지 하부에 지속적으로 축적된 상태에서 수온 상승으로 인해 최초침전지 하부에서 축적 저장된 생물슬러지에서 인 용출이 발생하였을 가능성이 큰 것으로 제시하였는데 이러한 주장은 SS 농도는 거의 일정한데 TP 상승에 비례하여 PO₄-P 농도가 상승하는 추세로 보아 어느 정도 타당한 주장으로 판단된다. 또한 6월 하순 장마철에 수리학적 과부하로 인해 최초침전지 하부에 축적된 생물슬러지가 다량으로 포기조로 월류될 경우 수리학적 충격부하와 함께 농도 충격부하가 동시에 발생되어 적절한 생물학적 처리를 수행하지 못하는 상황이 발생할 경우 인의 농도가 급격히 상승할 수 있는 것으로 추정된다(안 등, 2003).

전반적인 총인 농도를 살펴보면 조사대상 대부분의 처리장에서 법적기준인 2 mg/L를 근소한 차이로 만족시키지만 일부처리장에서는 기존시설만으로 법적기준을 만족하기에는 어려워 추가적인 고도처리시설 도입이 필요한 것으로 나타났다.

3.7. 대장균

대장균 항목은 2002년 1월 1일 시행된 환경부 하수도시설 운영·관리지침에 의해 mL당 3,000개 이하로 유지하도록 권고 하고 있다(환경부, 2001). 이러한 환경부 지침에 따라 대부분의 하수처리장에서 살균시설 추가 설치를 계획하고 있다. 대장균 항목의 경우 공정운전 및 수처리 효율에 영향을 받기 보다는 수온, 연계수 포함 여부에 영향을 크게 받게 되는데 하수 2차 처리수를 농업용수로 재이용하고 할 때 농작물의 병해충 및 위생적 측면에서 중요한 지표로 활용된다.

대장균 특성을 세부적으로 살펴보면 분뇨, 축분과 같은 연계수 없이 생하수(간헐적 침출수 투입)만 유입되는 G, F 처리장과 살균시설이 설치된 C, G처리장만의 대장균수가 상대적으로 낮은 것으로 측정되었다(Fig. 9). 살균시설이 설치되지 않은 처리장의 경우 환경부 지침으로 인해 대부분 임시적으로 간이 소독시설을 설치하여 운전하였기 때문에 대부분의 처리장에서 환경부 지침을 준수한 것으로 판단된다.

하수 2차 처리수 살균에 UV와 염소소독이 주로 이용되는데 염소소독의 경우 염소 과투여(잔류염소)로 인한 방류하천의 2차 오염을 야기할 수 있어 세심한 운전이 필요하며, 탁도 성분이 많이 함유된 방류수의 경우 UV 조사 효율이 떨어지는데 이러한 방류수 특성을 갖는 처리장의 소독시설로 UV법은 효과적이지 않은 것으로 판단된다.

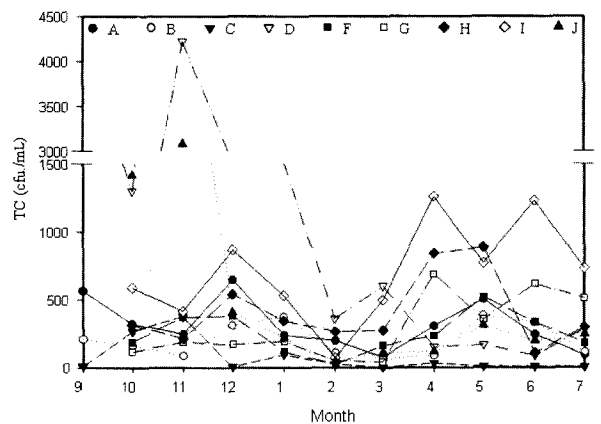


Fig. 9. Monthly change of the total coliform bacteria.

3.8. 미량원소

아래 Table 5에는 전체 조사대상 하수처리장 방류수에 대해 연구기간동안 5회 분석한 미량원소 농도를 최저치, 최고치, 평균값과 자료의 표준편차, 변동계수를 제시하였다. 자료에 따르면 Be, Al, Fe, Se, Cd은 시기적으로 큰 폭의 변화를 보였다. 이들 미량원소는 동절기 이후 이른 봄철에 높은 농도를 나타내었다. 하수처리장 방류수는 바다와 인접한 경우가 아니면 방류하천과 합류 후 사용자의 의지와 관계없이 재이용된다. 가장 흔한 형태의 재이용은 농업용수인데 방류수내의 미량원소는 작물의 성장에 영향을 미치게 된다(EPA, 1992). Table 5에 제시된 자료에 따르면 대부분의 미량원소 항목은 농업용수기준을 초과하지 않는 것으로 나타났으나 일부처리장에서는 Cr, Mn, Cu, Co, Cd 등이 기준치를 초과하는 것으로 나타났으며 특히 납(Pb)은 조사

Table 5. Concentration of the trace elements

Trace element	Minimum (mg/L)	Maximum (mg/L)	Mean (mg/L)	Standard deviation	Coefficient of variation
Li	0.16	0.28	0.21	0.04	0.17
Be	<0.000	0.78	0.04	0.11	3.09
Na	10.1	564	109	106	0.97
Mg	0.48	31	10.5	6.8	0.65
Al	0.062	4.2	2.89	8.8	3.05
K	3.95	65	25	13.8	0.56
Ca	0.039	68	28	14.9	0.54
V	0.11	0.24	0.18	0.04	0.20
Cr	<0.000	0.75	0.064	0.15	2.40
Mn	0.13	1.1	0.35	0.21	0.62
Fe	<0.000	51	4.8	10.9	2.30
Co	0.11	0.41	0.18	0.05	0.29
Ni	<0.000	0.34	0.09	0.09	1.03
Cu	0.31	2.64	1.23	0.61	0.49
Zn	<0.000	2.72	0.7	0.92	1.31
As	<0.000	0.043	0.017	0.01	0.78
Se	<0.000	0.046	0.009	0.01	1.51
Cd	<0.000	1.13	0.03	0.17	5.23
Pb	0.3	0.62	0.44	0.10	0.24

대상 하수처리장에서 큰 차이로 기준을 초과하는 것으로 나타났다. 방류수가 하천수에 의해 희석되므로 간접적인 재이용에 있어서는 문제가 없겠지만 하수처리장 방류수를 직접 관개용수로 재이용할 경우에는 신중한 접근이 요망된다.

4. 결론

국내에서 가동 중인 하수처리장의 처리성능과 처리안정도 등에 관한 객관적인 조사가 이루어진 적이 없었다. 본 연구에서는 9개의 하수처리장을 선정하여 방류수 수질을 조사하였다. 수질자료의 통계학적 분석에서는 연속적으로 측정된 일련의 자료를 정량화하기 위해 누적확률발생도 (P_{10} , P_{50}), 중간값(P_{50}), 평균값(mean), 최소값(min), 최대값(max), 표준편차(Std), 변동계수 CV (coefficient of variation) 등을 제시하였다. 조사대상 9개 하수처리장의 처리성능과 안정도를 조사하였다.

방류수의 유기물질 농도는 2차 침전지에 관련된 문제가 아니라 대부분의 하수처리장에서 분뇨나 축분의 연계처리에 따른 난분해성 유기물질과 관련이 있는 것으로 판단된다. 여름철 방류수의 질소농도 증가는 C/N의 부족으로 보이며, 반면에 동절기 질소농도 증가는 낮은 수온과 하수량 감소로 인한 낮은 희석효과 때문이었다. 6월달 급격한 인 농도 상승 요인으로 처리장 탈수능력이 부족할 경우, 불철 유입되는 침전 가능한 SS 성분이 1차 침전지 하부에 지속적으로 축적된 상태에서 수온 상승으로 인해 최초침전지 하부에서 축적 저장된 생물리에서 인 용출이 발생하였을 가능성이 크다. 일부 시설에서 일부기간을 제외하고는 대부분의 하수처리장 방류수의 총질소, 총인 농도는 방류수기준을 만족시키는 것으로 조사되었다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호#1-5-2)에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 건설교통부, 수자원장기종합계획 (2001).
- 김영철, 안익성, 이재수, 하수처리장 성능평가를 샘플링 빈도 결정에 관한 연구, *대한환경공학회지*, **26**(1), pp. 102-104 (2004).
- 김영철, 장인성, 이동률, 하수 처리장 2차 처리수 재이용을 위한 처리시설의 기초 설계인자 및 구상, *대한환경공학회지*, **25**(8), pp. 946-954 (2003).
- 안익성, 정팔진, 원찬희, 조선영, 저농도 하수가 유입되는 도시 하수처리장의 처리효율 개선에 관한 사례 연구, *한국환경학회지*, **19**(6), pp. 607-613 (2003).
- 환경관리공단, *하수 처리수의 재이용 기술에 관한 연구* (2001).
- 환경부, *수질오염 공정 시험법* (1999).
- 환경부, *하수도시설 운영·관리 업무처리 통합지침* (2001).
- 환경부 자료 (2002).
- APHA, AWWA and WEF., *Standard Methods for Examinations of Water and Wastewater*, 18th edition, Washington D. C., USA (1993).
- Critics, R. and Tchobanoglous, G., *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*, McGraw-Hill (1997).
- EPA, *Guideline for Water Reuse* (1992).
- Hong, S. N. et al., A Biological Wastewater Treatment for Nutrient Removal, *The 54th Annual WPCF Conference* (1981).

- McCarty, P. L., Biological Processes for Nitrogen Removal : Theory and Application, *Proceedings Twelfth Sanitary Engineering Conference*, University of Illinois (1970).
- Niku, S., Schroeder, E. D. and Samaniego, F. J., Performance of Activated Sludge Processes and Reliability-Based Design, *Journal of Water Pollution Control Association*, **51**, p. 2841 (1979).
- van Haandel, A. C. et al. Optimization of Nitrogen Removal in the Single Sludge Activated Sludge Process, *Water Sci. Tech.*, **14**, p. 443 (1981).
- WPCF., *Operation of Wastewater Treatment Plant*, Manual of Practice, **11** (1976).