



하수에서의 대장균수 확률분포 특성 분석

Statistics and Probability Distribution of Total Coliforms in Wastewater

전상민* · 송인홍**† · 정한석*** · 강문성**** · 박승우****

Jun, Sang Min · Song, Inhong · Jeong, Han Seok · Kang, Moon Seong · Park, Seung Woo

ABSTRACT

Probability distribution of microbes in wastewater is a crucial factor to be determined for microbial risk assessment associated with its reuse. The objective of this study was to investigate probability distribution of an indicator microorganism in wastewater. Daily total coliform counts measured from nationwide wastewater treatment plants in 2010 by the Ministry of Environment were used for statistical analysis. Basic statistics and probability distributions were estimated in the three different spatial scales using the MS Excel software and FARD2006 model. Overall, wastewater from manure and livestock treatment plants demonstrated greater median coliform counts than from sewage and village treatment plants. Generalized logistic (GLO) and 2-parameter Weibull (WBU2) appeared to be the two probability distributions that fitted best for total coliform numbers in wastewater. The study results of microbial statistics and probability distributions would provide useful data for quantitative assessment of microbial risk from agricultural wastewater reuse.

Keywords: Wastewater; total coliform counts; optimal probability distribution; generalized logistic distribution; Weibull distribution

1. 서 론

최근 물 부족 현상의 다양한 해결방안 중 대체수자원의 하나로 하수처리수의 재이용이 활발하게 이루어지고 있으며, 우리나라에서는 2000년 연간 167 백만톤에서 꾸준히 증가하여 2011년에는 하수처리량의 약 11.0 %인 781 백만톤을 재이용하고 있다 (MOE, 2012). 특히 농업용수가 수자원 이용량의 약 60 %를 차지하는 만큼 하수처리수의 농업용수 재이용은 그 중요성이 강조되고 있으며 (Jeong et al., 2013), 연간 약 43,557 천톤이 농업용수로 재이용되고 있다 (MOE, 2012).

하지만 하수는 다양한 오염물질을 포함하고 있고, 처리 공정을 거치더라도 인체에 유해한 오염물질이 잔존할 수 있다. 이에 따라 환경부에서는 2005년 하수처리수 재이용수질 권고기준을

마련하였고, 『물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률』을 2010년에 제정·공포하고, 2011년부터 시행하여 하수처리수 재처리수의 용도별 수질기준을 법제화하였다.

병원성 미생물은 하수처리수에 잔존할 수 있는 오염물질의 하나로 인체에 유입될 경우 각종 질병을 유발할 수 있어 이에 대한 위해성 평가가 하수처리수의 재이용에 선행되어야 한다. 하수처리수를 농업용수로 이용했을 경우에도 잔존 병원성 미생물은 인체에 위해요소로 작용할 수 있어, 하수처리수의 농업용 재이용에 따른 정확한 위해성 평가가 요구된다.

하수처리수의 농업용수재이용에 관한 연구로 Salgot et al. (2006)은 세계 각국에서 재이용 하수의 위해성 평가에 적용되고 있는 화학적 기준 항목 및 미생물 지표에 대해서 분석하였으며, Chiou (2008)는 하수처리수를 관개용수로 이용했을 경우에 대한 위해성 분석을 실시하여 관개수량 기준 및 희석수량을 제시하였다. Srinivasan et al. (2009)은 인도를 대상으로 미처리 하수 혹은 부분처리된 하수를 관개하는 지역과 일반 수질의 관개수를 사용하는 지역에 대해 인체에 미치는 영향을 분석하고 하수재이용의 위해성 분석 및 수질 기준 설정의 필요성에 대해 제안하였다.

국내연구로 Jung et al. (2005a, 2005b)은 하수처리수를 관개했을 경우 발생할 수 있는 위험에 대해 조사하기 위해 시험구를 설치하고 하천수와 호소수, biofilter 유출수, pond 처리수, UV

* 서울대학교 농업생명과학대학 생태조경·지역시스템공학부 석사과정

** 서울대학교 농업생명과학연구원 연구교수

*** 서울대학교 농업생명과학대학 생태조경·지역시스템공학부 박사과정

**** 서울대학교 농업생명과학대학 조경·지역시스템공학부 교수, 농업생명과학연구원 겸무연구원

† Corresponding author Tel.: +82-2-877-4598

Fax: +00-0-000-0000

E-mail: inhongs@snu.ac.kr

2013년 4월 18일 투고

2013년 5월 9일 심사완료

2013년 5월 10일 게재확정

소독수를 논 관개용수로 이용하여 총대장균군, 분원성 대장균군, *E. coli* 등 지표미생물의 농도 변화를 조사한 후, *E. coli* 농도를 바탕으로 Monte-Carlo simulation을 통해 미생물 위해성 평가를 실시하였다. Yoon et al. (2006)은 벼 실험포트에서 분석한 *E. Coli* 농도를 바탕으로 Monte-Carlo simulation을 적용하여 하수처리수를 관개용수로 재이용 할 경우 발생할 수 있는 질병에 대한 위해성을 평가하였으며, 하수를 pond저류나 UV소독 등을 통해 대장균농도를 일정수준 이하로 낮춘다면 미생물 위해성이 크게 감소할 것으로 보고하였다.

미생물 위해성 평가를 시행한 선행연구를 살펴보면 대부분 Monte-Carlo simulation을 이용하였으며, 그 과정에서 자료를 정규분포로 가정해 난수를 발생시켰다. 하지만 일반적으로 Monte-Carlo simulation 적용 시 연구대상 자료가 나타내는 확률분포를 선정하고 이에 맞게 난수를 발생시킨다 (Kim et al., 2008). 하수의 대장균수 자료는 정규분포와는 다른 분포를 나타낼 것으로 예상되며, 실제 하수의 대장균수가 나타내는 확률분포를 이용해 난수를 발생시킨다면 위해성 평가 결과는 달라질 수 있을 것이다. 현재 하수의 대장균수 자료가 어떤 분포형을 나타내는지에 대한 연구는 부족한 실정이며, 따라서 실제 하수의 대장균수 확률분포를 분석해 적정분포형을 선정하고 통계적 특성을 파악할 필요성이 있다. 그리고 분석 결과를 미생물 위해성 평가 과정에 적용한다면 더욱 타당한 위해성 평가 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 하수에서의 대장균수 확률분포 특성을 분석하기 위해 전국 환경기초시설의 유입수 대장균수 자료를 취득하고, 통계분석을 통해 환경기초시설의 유형별 기초 통계자료를 구축하며, 각 처리시설에 대해 여러 확률분포형의 매개변수 추정 및 적합도 검정을 실시하여 하수에서 대장균수 자료의 적정 확률분포형을 선정하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 자료의 수집 및 분류

본 연구에서는 하수의 미생물 확률분포 특성을 분석하기 위해 2010년 환경부에서 전국 환경기초시설을 대상으로 측정한 유입수 일별수질자료를 수집하였고, 그중 총 대장균수 자료를 이용하였다.

가. 용도별 분류

하수의 종류에 따른 대장균수 자료의 특성을 비교 및 분석하기 위해 환경기초시설을 용도별로 분류하였다. 환경기초시설은

지역별로 명칭을 상이하게 사용하고 있기 때문에 처리목적에 따라 크게 하수종말 처리시설, 마을하수도 처리시설, 분뇨 처리시설, 축산폐수 처리시설 4가지로 분류 하였으며, 이 분류를 기준으로 기초통계분석을 실시하였다. 수집한 자료 중 하수종말 처리시설이 182,601 개소로 가장 많았으며, 마을하수도 처리시설은 56,978 개소, 분뇨 처리시설은 9,514 개소, 축산폐수 처리시설은 7,479 개소로 나타났다.

나. 지역규모별 분류

적정 확률분포 모형 분석을 위해 세 가지 다른 지역 규모로 자료를 분류하였다. 크게 전국단위의 주요 하수처리장을 대상으로 하는 전국단위, 논 경작지가 가장 넓게 분포하는 전라도를 대상으로 하는 도 단위, 그리고 경기남서부 지역의 지자체를 대상으로 하는 지역단위의 세 단위로 구분하였다. 또한 대상시설 모두를 대상으로 총괄 분석도 실시하였다.

전국단위는 하수종말 처리시설 하수의 전반적인 대장균 확률분포를 분석하기 위해 전국 주요 광역시도 하수종말 처리시설 중 임의로 10개소를 선정하였다. 도 단위는 우리나라에서 논농사가 가장 광범위하게 이루어지는 전라도 지역을 대상으로 하였으며, 하수종말 및 마을하수도 처리시설 등 20개소를 선정하였다. 그리고 지역단위는 하수처리수 재이용 관련 서울대에서 모니터링을 진행 중인 연구와 연계하여 추후 위해성 평가에 활용할 수 있도록 경기도 남서부 지역을 대상지역으로 선정하였다. 대상 처리시설은 경기도 화성시, 평택시, 용인시, 오산시 일대 소재의 하수종말 및 마을하수도 처리시설을 포함하고 있다.

Table 1는 각 공간 규모 단위별 대상으로 하는 하수처리 시설의 개소수를 보여주고 있으며, 전국적으로 하수종말 처리시설, 마을하수도 시설 등 총 81개 시설을 대상으로 분석하였다. 전국단위는 주요 시·도를 대상으로 10개 처리시설을, 전라도 지역은 하수 및 마을하수도 시설 20개소를, 지역단위는 화성 12개소, 평택 15개소, 용인 22개소, 오산 2개소를 대상으로 선정하였다.

Table 1 Three different spatial scales and corresponding numbers of sewage treatment plants

Spatial level	Number of facilities	
Nationwide level (Major sewage treatment plants)	10	
Provincial level (Facilities from Jeolla province)	20	
Local level (Facilities from the cities in the southwest Gyeonggi region)	Hwasung	12
	Pyungtaek	15
	Yongin	22
	Osan	2

2. 통계분석

가. 기초통계분석

처리시설의 용도별로 유입수 대장균수 자료의 기초통계분석을 실시하였다. Microsoft Office Excel (Version2010)을 이용하여 하수종말 처리시설, 마을하수도 처리시설, 분뇨 처리시설, 축산폐수 처리시설 4가지 분류에 대하여 각각 최댓값, 최솟값, 중간값, 평균값, 표준편차 등의 통계치를 산정하였으며, 그 특성을 비교·분석하였다.

나. 확률분포분석

1) 통계 프로그램 선정

FARD2006 (Frequency Analysis of Rainfall Data Program 2006)은 국립방재연구원에서 제공하는 통계분석 프로그램으로 다양한 종류의 자료에 적용이 가능하도록 개발되었다. FARD2006은 다양한 확률 분포형에 대한 매개변수의 추정과 적합도 검정 기능을 제공하고 있으며 비교적 사용이 용이하여 확률분포 분석에 널리 이용되고 있다 (NDM, 2006). 따라서 본 연구에서는 FARD2006을 이용하여 지역규모별로 분류된 환경기초시설 유입수 대장균수 자료의 확률분포 분석을 실시하였다.

2) 확률분포 모형

본 연구에서는 일반적으로 많이 사용되고 있는 분포모형인 Normal 분포형 (NOR), Gamma 분포형 (GAM2, GAM3), Generalized Extreme Value 분포형 (GEV), Gumbel 분포형 (GUM), Log-Gumbel 분포형 (LGU2, LGU3), Log-Normal 분포형 (LN2, LN3), Log-Person Type-III 분포형 (LP3), Weibull 분포형 (WBU2, WBU3), Generalized Logistic 분포형 (GLO), Generalized Pareto 분포형 (GPA), Wakeby 분포형 (WBK4, WBK5) 등 총 16개의 확률 분포형을 이용하였다. 각 분포형을 대상으로 확률가중모멘트법을 적용해 매개변수 추정을 실시하였으며, 적합도 검정을 통해 적정 확률분포형을 선정하였다.

3) 적합도검정 및 적정 확률분포형 선정

확률분포형의 적합도 검정은 각 확률분포형의 확률밀도함수의

이론값과 자료군의 계급구간별 빈도를 계산하여 작성한 상대도수분포도를 정량적으로 비교하여 이루어진다. 적합도를 검정하는 방법으로는 Chi-Square (χ^2) 방법, Kolmogorov-Smirnov (K-S) 방법, Cramer Von Mises (CVM) 방법, Probability Plot Correlation Coefficient (PPCC) 방법의 4가지가 일반적으로 널리 이용되고 있다. 이중 PPCC 검정방법은 상관계수 (Correlation Coefficient)를 사용하여 가정한 확률분포형과 주어진 데이터의 일치성을 검정하는 방법으로 기각능력이 뛰어나고 적용방법이 비교적 간단한 것으로 알려져 있다 (Kim et al., 2012). 따라서 본 연구에서는 PPCC방법을 이용해 적합도 검정을 실시하였으며, 유의수준은 5%로 설정하였다.

적합도 검정은 16가지 확률분포형에 대하여 총 81개의 연구대상 처리시설을 대상으로 각각 실시하였고, 확률분포형 별로 적합도 검정을 통과하는 시설의 개수를 조사하였다. 이를 바탕으로 대상시설 전체, 전국단위, 도단위, 지역단위에 대하여 가장 많은 시설에서 적합도 검정을 통과한 확률분포형을 적정 확률분포형으로 각각 선정하였으며, 추후 위해성 평가에 적용하기 위해 선정된 확률분포형에 대해 추정된 매개변수를 정리 및 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 기초통계분석

처리시설 종류별로 대장균 자료의 기초 통계를 정리하면 Table 2와 같다. 총 대장균수의 평균값은 축산폐수처리시설에서 476,706 MPN/mL로 가장 큰 값을 보였고, 마을하수도에서 62,741 MPN/mL로 가장 작은 값을 나타내었다. 반면에 중간값은 분뇨 처리시설에서 152,300 MPN/mL로 가장 컸고, 마을하수도에서 30,200 MPN/mL로 가장 작게 나타났다. Table 2에서 확인할 수 있듯이 축산폐수 처리시설의 경우 최댓값이 다른 처리시설에 비해 2배 이상 큰 값을 가지며, 1,000,000 MPN/mL 이상의 높은 값을 가지는 자료가 다수 존재해 평균값이 높게 나타난 것으로 보인다. 표준편차 또한 다른 처리시설에 비해 6배 이상 크게 나타나 자료간의 편차가 큰 것으로 분석되었다. 마을하수도 처

Table 2 Statistics of total coliform counts in wastewater (Unit: MPN*/mL)

Facilities	Maximum	Minimum	Median	Mean	Standard deviation
Sewage treatment plant (STP)	35,415,000	1	58,000	96,577	381,822
Village sewage treatment plant (VSTP)	2,900,000	1	30,200	62,741	105,605
Manure treatment plant (MTP)	35,000,000	23	152,300	214,915	599,913
Livestock wastewater treatment plants (LWTP)	77,000,000	600	80,000	476,706	3,903,807

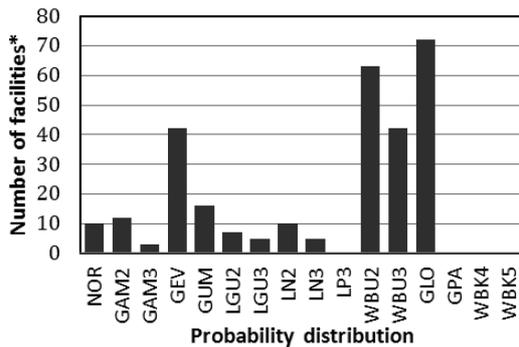
* MPN stands for Most Probable Number

리시설은 최댓값, 중간값, 평균값 모두 가장 작은 값을 나타내 다른 처리시설에 비해 대장균수가 적은 것으로 분석되었으며, 표준편차 또한 가장 작은 값을 나타내었다.

2. 확률분포분석

가. 적합도 검정 결과

전국 주요 하수처리장, 전라도, 경기도 남서부 지역 소재 시설 등 총 81개소를 대상으로 PPCC 검정 방법을 이용해 확률분포형을 검정한 결과를 요약하면 Table 3 및 Fig. 1과 같다. 총 72개 시설에서 Generalized Logistic 분포모형 (GLO)이, 63개 시설에서 2변수 Weibull 분포모형 (WBU2)이 적합도 검정을 만족



* This represents the number of facilities of which data fits to each probability distributions at 5 % significant level

Fig. 1 Results of goodness-of-fit tests for all facilities

하는 것으로 나타나 하수에서 대장균수 분포를 가장 잘 반영하는 것으로 분석되었다. 다음으로 43개 시설에서 3변수 Weibull 분포모형 (WBU3)이, 42개 시설에서 Generalized Extreme Value 분포모형 (GEV)이 적합도 검정을 만족하는 것으로 나타났다.

GLO 분포형은 일반적으로 강수량의 지점 및 지역빈도해석에 많이 적용되는 분포형이며 (Shin et al., 2008) WBU2 분포는 주로 제품의 수명 추정 등에 쓰이는 분포형으로, 본 연구에서 두 분포형이 하수의 대장균수 분포 또한 잘 나타내는 것으로 분석되었다. 따라서 두 분포형은 추후 하수처리수의 재이용에 따른 위해성 분석에 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

Table 4~Table 6은 전국 주요 하수처리장, 전라도, 경기도 남서부 지역에 대한 각각의 적합도 검정 결과를 나타내고 있다. 전국 주요 하수처리장 10개소 중 9개소에서 GLO 분포형을 만족하였고, 7개소에서 WBU2 분포형을 만족하는 것으로 나타났다. 전라도 지역은 20개소 중 14개소에서 GLO 분포형을 만족하였고, 15개소에서 WBU2 분포형을 만족하였다. 마지막으로 경기도 남서부 지역 화성시, 평택시, 용인시, 오산시에 있는 하수처리장에서는 총 51개소 중 49개소에서 GLO 분포형을, 41개소에서 WBU2 분포형을 만족하는 것으로 분석되었다.

3가지로 분류한 연구대상지역에서 모두 GLO 분포형 또는 WBU2 분포형을 만족하는 하수처리시설이 가장 많이 존재하는 것으로 나타났으며, GEV 분포형 또는 WBU3 분포형이 각각 세 번째 혹은 네 번째로 적합한 것으로 나타났다. 따라서 하수에 존재하는 대장균수 자료의 확률분포 특성은 처리시설별 또는 지역

Table 3 Results of goodness-of-fit tests for all facilities

Probability distribution	NOR	GAM2	GAM3	GEV	GUM	LGU2	LGU3	LN2	LN3	LP3	WBU2	WBU3	GLO	GPA	WBK4	WBK5
Number of facilities*	10	12	3	42	16	7	5	10	5	0	63	42	72	0	0	0

* This represents the number of facilities of which data fits to each probability distributions at the 5 % significance level

Table 4 Results of goodness-of-fit tests for nationwide major sewage treatment plants

Probability distribution	NOR	GAM2	GAM3	GEV	GUM	LGU2	LGU3	LN2	LN3	LP3	WBU2	WBU3	GLO	GPA	WBK4	WBK5
Number of facilities*	0	1	1	6	0	0	2	0	0	0	7	6	9	0	0	0

* This represents the number of facilities of which data fits to each probability distributions at 5 % significant level

Table 5 Results of goodness-of-fit tests for the sewage treatment plants from Jeolla province

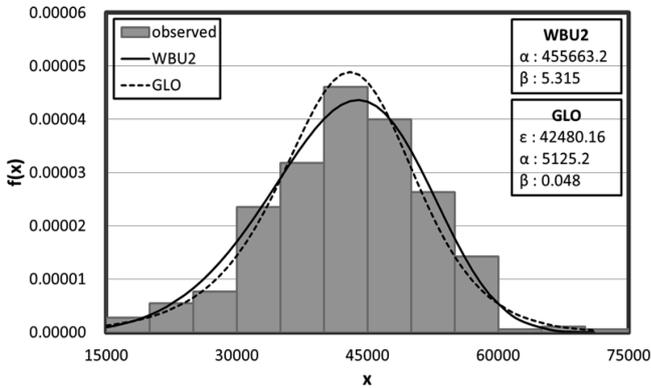
Probability distribution	NOR	GAM2	GAM3	GEV	GUM	LGU2	LGU3	LN2	LN3	LP3	WBU2	WBU3	GLO	GPA	WBK4	WBK5
Number of facilities*	2	3	2	10	5	2	1	2	1	0	15	12	14	0	0	0

* This represents the number of facilities of which data fits to each probability distributions at 5 % significant level

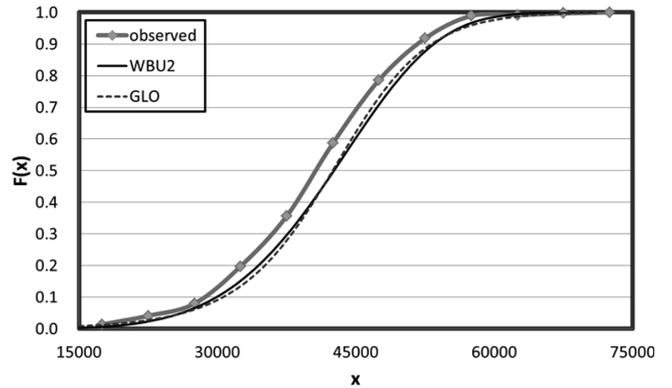
Table 6 Results of goodness-of-fit tests for the local level plants from southwest Gyeonggi region

Probability distribution	NOR	GAM2	GAM3	GEV	GUM	LGU2	LGU3	LN2	LN3	LP3	WBU2	WBU3	GLO	GPA	WBK4	WBK5
Number of facilities*	8	8	0	26	11	5	2	8	4	0	41	24	49	0	0	0

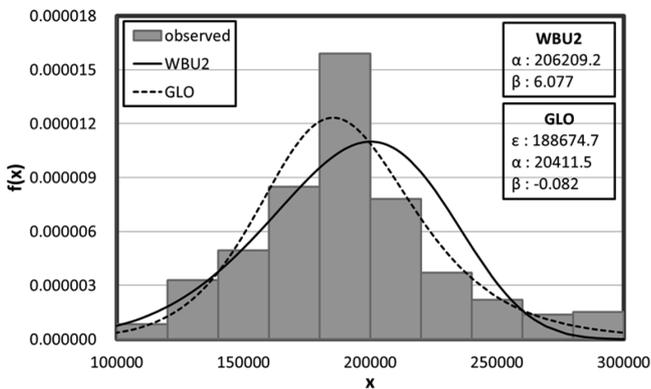
* This represents the number of facilities of which data fits to each probability distributions at 5 % significant level



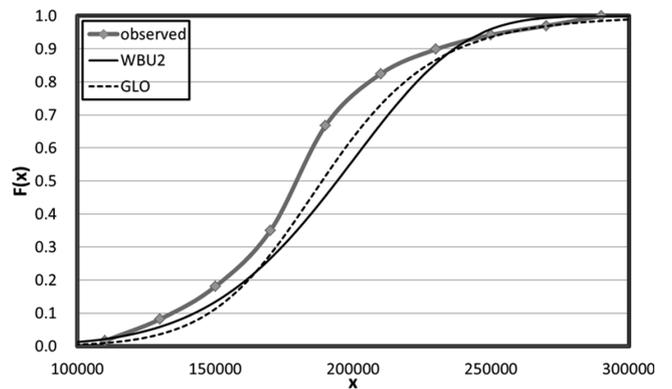
(a) Gwangju 2nd sewage disposal plant (Nationwide level)



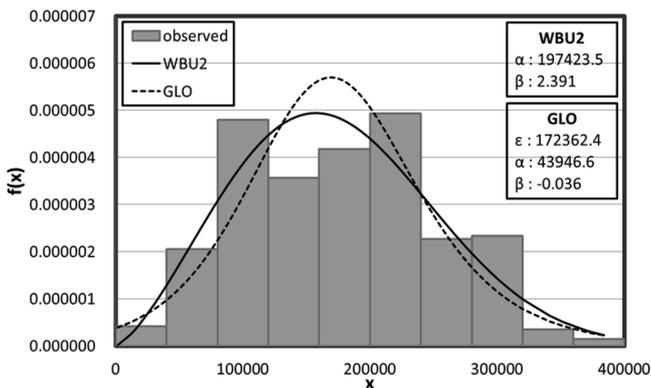
(a) Gwangju 2nd sewage disposal plant (Nationwide level)



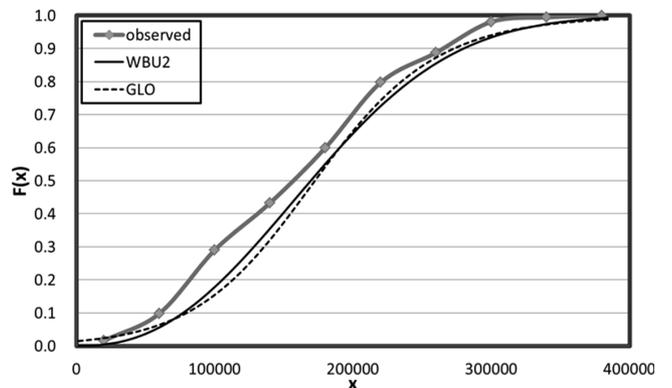
(b) Gunsan sewage disposal plant (Provincial level)



(b) Gunsan sewage disposal plant (Provincial level)



(c) Songjun public sewage disposal plant (Local level)



(c) Songjun public sewage disposal plant (Local level)

Fig. 2 Examples of probability density functions for each of the three spatial levels

Fig. 3 Examples of cumulative distribution functions for each of the three spatial levels

별로 크게 차이를 보이지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 2~Fig. 3은 분석대상 시설 분류별로 대표적인 예를 각 1개소 선정하여 도수분포표, 확률밀도함수, 누가확률분포곡선 등을 보여주고 있다. 전국 하수처리장의 예로 광주 제2하수처리장, 전라도 하수처리장의 예로 군산하수종말처리장, 경기도 남서부 지역의 예로 송전공공하수리장을 선택하였고, 도수분포표 및

Generalized Logistic 분포형과 2변수 Weibull 분포에 대한 확률밀도함수와 누가확률분포곡선을 각각 도시하였다. Fig. 2에서 GLO 및 WBU2 분포형의 확률밀도함수가 관측값과 유사한 형태를 그리고 있으며, GLO 분포형이 WBU2 분포형에 비해 극치를 잘 반영하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3의 누가확률분포곡선 또한 관측값과 유사한 경향을 보여주고 있다.

나. 매개변수 추정 결과

위해성 평가에 적용하기 위해 확률가중모멘트법을 이용하여 각 처리시설에 대한 Generalized Logistic 분포형과 2변수 Weibull 분포형의 매개변수 추정을 수행하였다. Generalized Logistic 분포형 (GLO)의 위치매개변수 (ϵ)는 244 ~ 268,584 범위의 값을 가지는 것으로 분석되었고, 평균 97,652, 표준편차 66,970로 나타났다. 축척매개변수 (α)는 67 ~ 85,614 범위의 값을 가지는 것으로 분석되었고, 평균 18,325, 표준편차 16,715로 나타났다. 형상매개변수 (β)는 -0.656 ~ 0.378 의 범위의 값을 보였고, 평균값이 -0.109, 표준편차는 0.189의 값으로 산정되었다. 이를 요약하여 정리하면 Table 7과 같다.

Table 7 Estimated parameters for the Generalized Logistic distribution (GLO)

Spatial level		Maximum	Minimum	Median	Mean	Standard deviation
Overall facilities (81 facilities)	ϵ	268,584	244	79,732	97,653	66,970
	α	85,615	67	10,474	18,325	16,716
	β	0.378	-0.656	-0.112	-0.109	0.189
Nationwide level (10 facilities)	ϵ	257,425	31,450	121,811	118,692	70,324
	α	85,615	1,249	21,449	29,577	26,316
	β	0.048	-0.396	-0.142	-0.132	0.134
Provincial level (20 facilities from Jeolla province)	ϵ	268,584	2,487	58,430	86,304	82,209
	α	49,622	291	9,519	15,270	13,836
	β	0.378	-0.656	-0.095	-0.105	0.257
Local level (51 facilities from south-west Gyeonggi region)	ϵ	262,670	244	97,978	58,016	83,384
	α	51,290	67	17,317	14,262	10,169
	β	0.217	-0.485	-0.106	0.164	-0.112

* ϵ : location parameter, α : scale parameter, β : shape parameter

Table 8 Estimated parameters for the 2-parameter Weibull distribution (WBU2)

Facilities		Maximum	Minimum	Median	Mean	Standard deviation
Overall facilities (81 facilities)	α	316,389	301	87,550	111,004	74,696
	β	17.88	0.91	3.68	4.91	3.49
Nationwide level (10 facilities)	α	316,389	35,434	143,580	138,091	84,314
	β	17.88	0.91	3.87	4.96	4.70
Provincial level (20 facilities from Jeolla province)	α	278,131	2,637	66,192	97,016	87,864
	β	8.75	1.23	2.81	3.84	2.28
Local level (51 facilities from south-west Gyeonggi region)	α	308,610	301	93,553	111,178	64,958
	β	15.20	0.96	4.82	5.31	3.51

* α : scale parameter, β : shape parameter

2변수 Weibull 분포형 (WBU2)의 축척매개변수 (α)는 301 ~ 316,389 범위의 값을 가지는 것으로 분석되었고, 평균 111,004, 표준편차 74,696으로 나타났다. 형상매개변수 (β)는 0.912 ~ 17.881의 범위의 값을 보였고, 평균값이 4.91, 표준편차는 3.49의 값으로 산정되었다. Table 8은 2변수 Weibull 분포형의 매개변수 추정 결과를 나타내고 있다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 전국 하수 및 분뇨 처리장의 하수로부터 측정된 일별 대장균수 자료를 이용하여 기본 통계치를 계산하고, 적합도 검정 및 매개변수 추정을 통해 적합한 확률분포모형을 결정하였다. 기초통계분석은 4가지의 용도별 (하수종말 처리시설, 마을하수도 처리시설, 분뇨 처리시설, 축산폐수 처리시설)로 수행하였으며, 확률분포모형 결정은 3단계의 공간 규모 (전국, 도단위, 시군단위)로 수행하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 하수처리장의 용도에 따른 대장균 통계를 살펴보면, 대장균의 최대치는 축산폐수 처리시설에서 나타난 반면, 전반적으로 분뇨처리시설의 하수에 대장균수 (중간값 기준)가 높게 나타났다. 소규모 마을하수도 처리시설의 경우 하수종말 처리시설 등 다시 시설에 비해 대장균수가 적은 것으로 분석되었다.

2. 하수의 대장균 분포는 전반적으로 극치값을 반영할 수 있는 확률분포형 모형이 적합한 것으로 나타났다. 유의수준 5%의 PPCC검정 방법을 이용하여 전국, 도, 지역단위 총 81개 하수처리 시설의 하수 대장균 분포를 분석한 결과 Generalized Logistic 분포모형 (GLO, 72개 시설에서 만족)과 2변수 Weibull 분포모형 (WBU2, 63개 시설에서 만족)이 하수 대장균 분포에 가장 적합한 모형으로 분석되었다.

3. GLO 및 WBU2의 두 분포모형에 대해 확률가중모멘트법을 이용하여 매개변수를 추정된 결과, GLO 분포형의 매개변수 평균값은 위치매개변수 (ϵ)의 경우 97,653, 축척매개변수 (α)는 18,325, 형상매개변수 (β)는 -0.109로 산정되었고, WBU2 분포형의 경우 축척매개변수 (α)의 평균값이 111,004, 형상매개변수 (β)가 4.91로 산정되었다

본 연구를 통해 결정된 하수의 병원균 지표미생물인 대장균의 확률분포모형과 그에 따른 모형의 매개변수 값은 하수의 농업용 수재이용 등에 따른 미생물의 정량적 위해성평가를 위한 기초자료로 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 농림수산식품기술기획평가원의 “하수처리수의 농업용수 간접재이용시스템 개발과 적용” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Chiou, R. J., 2008. Risk assessment and loading capacity of reclaimed wastewater to be reused for agricultural irrigation. *Environmental Monitoring and Assessment* 142(1-3): 255-262.
2. Filliben, J. J., 1975. The probability plot correlation coefficient test for normality. *Technometrics* 17: 111-117.
3. Jeong, H. S., K. Suh, T. I. Jang, C. H. Seong, H. K. Kim, and S. W. Park, 2013. Economic analysis of wastewater reuse systems for agricultural irrigation using a system dynamics approach. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(2): 1-12 (in Korean).
4. Jung, G. W., C. G. Yoon, J. H. Jang, H. C. Kim, and J. H. Jeon, 2005. Investigation of indicator microorganism concentrations after reclaimed water irrigation in paddy rice pots. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 47(4): 75-85 (in Korean).
5. Jung, G. W., C. G. Yoon, Y. J. Ahn, J. H. Jang, and J. H. Jeon, 2005. Microbial risk assessment in treated wastewater irrigation on paddy rice plot. *Korean Journal of Limnology* 38(2): 225-236 (in Korean).
6. Kim, D. S., S. M. Koo, and S. W. Nam, 2008. Estimating optimal probability distributions of daily potential photovoltaic power generation for development of rural green-village by solar energy - with area of Seosan weather station -. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 50(6): 37-47 (in Korean).
7. Kim, Y. C. and Y. S. Cho, 2012. Tsunami hazard area at Imwon port determined by probability plot correlation coefficient test. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 12(2): 271-277 (in Korean).
8. Ministry of Environment (MOE), 2012. The census of sewerage System 2011 (in Korean).
9. National Disaster Management Institute (NDM), 2006. FARD2006 user's manual (in Korean).
10. Salgot, M., E. Huertas, S. Weber, W. Dott, and J. Hollender, 2006. Wastewater reuse and risk: definition of key objectives. *Desalination* 187(1-3): 29-40.
11. Shin, H. J., W. S. Nam, Y. H. Jung, and J. H. Heo, 2008. Uncertainty assessment of regional frequency analysis for generalized logistic distribution. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 28(6): 723-729 (in Korean).
12. Srinivasan, J. T. and V. R. Reddy, 2009. Impact of irrigation water quality on human health: a case study in India. *Ecological Economics* 68(11): 2800-2807.
13. Yoon, C. G., J. Y. Han, K. W. Jung, and J. H. Jang, 2006. Quantitative microbial risk assessment of wastewater reuse for irrigation in paddy field. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 48(2): 77-87 (in Korean).