

논 유출수 BOD의 유량가중평균농도(EMC) 확률분포

진소현 · 정재운¹⁾ · 윤광식* · 최우정 · 최동호 · 김상돈²⁾ · 강재홍²⁾ · 최유진³⁾

전남대학교 농업생명과학대학 지역 · 바이오시스템공학과, ¹⁾농어촌공사 농어촌연구원,
²⁾국립환경과학원 영산강물환경연구소, ³⁾국립환경과학원 수질총량관리센터
(2010년 6월 24일 접수; 2010년 8월 16일 수정; 2010년 9월 10일 채택)

Probability Distribution of BOD EMC from Paddy Fields

So-Hyun Jin, Jae-Woon Jung¹⁾, Kwang-Sik Yoon*, Woo-Jung Choi, Dong-Ho Choi,
Sang-Don Kim²⁾, Jae-Hong Kang²⁾, Yu-Jin Choi³⁾

Department of Rural & Bio-systems Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

¹⁾Rural Research Institute, Korea Rural Community & Agriculture Corporation, Ansan 426-908, Korea

²⁾Yeongsan River Environment Research Laboratory, National Institute of Environmental Research, Gwangju 500-480, Korea

³⁾Water Management Research Division, National Institute of Environment Research, Incheon 404-708, Korea

(Manuscript received 24 June, 2010; revised 16 August, 2010; accepted 10 September, 2010)

Abstract

Identification of probability distribution for water quality constituents from specific land use is important to achieve successful implementation of TMDL program. In this 3-year study, distribution of discharge and BOD(Biological Oxygen Demand) concentration from paddy rice fields were monitored. Four probability distributions, normal, log-normal, Gamma and Weibull were fitted and the goodness-of-fit was assessed using probability plots and Kolmogorov-Smirnov test. EMCs of BOD in runoff from paddy field ranged 0.37 to 7.99 mgL⁻¹, and all four probability distributions were acceptable. But the normal distribution would be preferred for BOD from paddy fields considering nature of straight forward application.

Key Words : BOD EMC, Probability distribution, Paddy fields

1. 서 론

환경부는 비점오염의 효율적 관리를 위해 4대강 수계의 하천, 호수 등 공공수역으로 유입되는 오염물질의 양을 농도 규제가 아닌 오염부하량 관리를 통해 관리하고자 수질오염총량관리제를 시행하고 있다(환경부, 2004). 하지만, 비점오염원은 범위가 광범위하고 각 지역의 다양한 요인에 따라서 배출특성이 매우 다

양하기 때문에 성공적인 수질오염총량관리제를 실현하기 위해서는 개별 토지이용으로부터 유출되는 오염부하량에 대한 정량적 연구가 필요하다(이 등, 2008). 비점오염원으로부터 유출되는 오염부하량 산정을 위해서는 특정강우에 대한 유량의 특성을 고려한 유량가중평균농도(EMC, Event Mean Concentration)가 매우 중요하다(Sansalone 등, 1997). 이와 관련된 토지이용별 EMC 연구사례를 살펴보면 정 등(2008)은 강우시 도시배수구역의 유출특성을 분석하였으며, 김 등(2003)은 농자·임야 유역을 대상으로 분석하였고, 김 등(2005)은 통계적분석을 통하여 배출 EMC를 추정할 수 있는 예측모형과 BOD(Biological Oxygen Demand) EMC 예측식을 산정하였다. 또한 여 등(2005)은 도시

*Corresponding author : Kwang-Sik Yoon, Department of Rural & Bio-systems Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea
Phone: +82-62-530-2158
E-mail: ksyoon@jnu.ac.kr

지역, 임야지역, 농촌임야혼합지역을 대상으로 유역 간의 강우특성에 따른 EMC를 비교하였다.

하천 및 호소의 수질을 효율적으로 관리하기 위해 서는 관리대상 수질항목의 분포형태 파악이 매우 중요하다(김과 안, 2009). 자료의 분포형태는 확률지를 사용하는 방법과 적합도 검정을 하는 방법으로 파악할 수 있으며(Ang과 Tang, 2007), 수질항목의 확률분포는 해석해 또는 수치해로 구성된 결정론적 모델과 연계하여 모의결과의 불확실성 및 신뢰성 등 지표수 수질관리에 효율적으로 사용될 수 있다(Melching과 Yoon, 1996; Han 등, 2001). 또한 보다 효율적인 수질 관리를 위해서는 EMC와 관련하여 확률분포형태를 파악하는 것도 매우 중요하며, 이와 관련된 연구로는 김과 안(2009)이 안성천 유역의 BOD 농도에 정규분포, 대수정규분포, Gamma 분포 및 Weibull 분포를 적용하였고, 정 등(2007)은 논에서 유출되는 유출수의 T-N, T-P, COD, SS의 EMC를 산정하여 Weibull 분포의 적합성 검토를 위해 Kolmogorov-Smirnov 검정을 실시하였다. 김 등(2002)은 농촌유역, 도농 복합지역, 도시지역의 TSS, COD, T-N, T-P의 EMC 계산치를 사용하여 분포특성을 조사하여 대수정규분포에 적용하였다. 한편, 외국의 경우 Chow(1954)는 수문 사상 발생에 대해 대수정규분포 이론을 발표했고 이 이론은 수문 사상 이외의 강우 유출수 수질 관련 인자에

도 확대 적용되어 왔다. 대표적인 예는 USEPA(1983), Harremoes 등(1988)이 있다. 하지만 Hall 등(1990)은 덴마크와 프랑스의 9개 유역의 강우 유출수 EMC 분포에 정규분포가 잘 적용된다고 보고한 바 있다. 지금 까지 대부분의 연구들이 도시유역 및 복합유역에 대한 확률분포형태를 파악한 연구들이며, 우리나라 주요 비점오염원인 논에 대한 EMC 확률분포형태를 파악한 연구는 매우 부족하다.

논의 경우 강우유출수의 농도는 낮더라도 유량이 많아서 부하량의 기여도가 매우 높기 때문에 다양한 연구자들에 의해 논 오염부하 정량적 산정에 대한 연구가 많이 진행되고 있지만 대부분 총질소와 총인에 중점을 두고 있다(전 등, 2003). 하지만 수질오염 총량관리제의 오염총량관리 대상물질이 BOD임을 고려해 본다면 논에서 BOD 오염부하량 산정에 대한 연구가 절실히 요구된다. 따라서 본 연구는 오염부하량 산정시 매우 중요한 BOD EMC 범위와 적정 확률분포형을 제시함으로써 성공적 수질오염총량관리제 구현을 위한 기초자료를 제공하는데 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시험지구 및 시료채취

본 연구에서는 전라남도 함평군 엄다면 화양리에

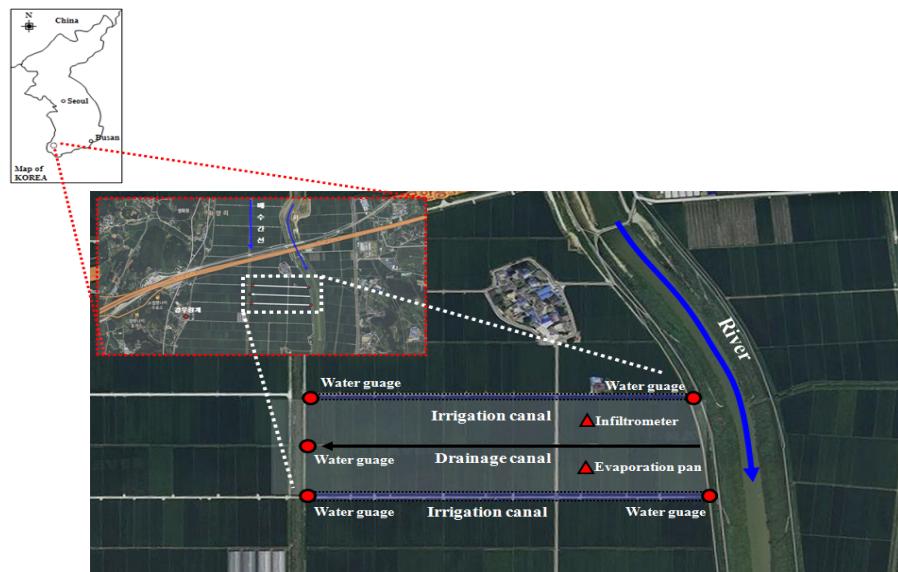


Fig. 1. Monitoring stations of study site.

위치한 논지구(이하 학야지구)를 시험지구로 선정하였고 이를 대상으로 2007~2009년 영농기간(5~9월) 동안 모니터링을 실시하였다. 학야지구는 동경 $126^{\circ} 30' 52'' \sim 126^{\circ} 31' 25''$, 북위 $35^{\circ} 02' 10'' \sim 35^{\circ} 02' 11''$ 에 위치하고 있으며 면적은 13.69 ha 이다(Fig. 1). 학야지구의 관개원은 대동저수지로서 관개면적은 992.3 ha 이고 저수용량은 $5,309 \times 10^3 \text{ m}^3$ 이며 한국농어촌공사 함평지사에서 관리하고 있다. 학야지구의 동쪽에는 함평천이 흐르고 서쪽에는 주배수로가 설치되어 있어 비교적 용·배수의 측정이 용이하다. 조사지구의 수질과 수문자료를 실측하기 위해 배수로 말단에 수위계를 설치하였고, 수위계는 독일 OTT사의 압력식 수위계인 Orphimedes 수위데이터 로거(logger)를 사용하여 20분 간격으로 수위자료를 관측하였고 학야지구 인근 마을회관 옥상에 강수량계(CASELLA, UK)를 설치하여 강수량 자료를 수집했다. 학야지구의 유량은 수위-유량 관계식을 통하여 산정하였고 시료채취는 2007년부터 2009년까지 조사기간동안 각각 67회, 30회, 141회 실시하였다. 수질시료의 생물화학적 산소요구량(BOD₅) 분석은 시료를 20°C 에서 5일간 항온 배양하여 소비되는 용존산소의 양을 측정하였다.

2.2. EMC 분석

모니터링을 통해 획득한 BOD농도와 유출량을 이용하여 유량가중평균농도(Event Mean Concentration, EMC)를 식(1)에 의해 산정하였고 여기서 Q_i 는 관측 시간 i 에서의 유출량($\text{m}^3 \text{ day}^{-1}$), C_i 는 오염물질농도(mg L^{-1})이다. 국립환경과학원(2009)에서 규정한 방법에 따라 1개 강우사상에 대해 최소 6개 이상의 자료를 이용하여 EMC를 산정하였고 본 연구에서 산정된 EMC는 총 41개이다. Fig. 2는 2009년 7월 15일의 수문, 수질곡선으로서 1개 강우사상에 대한 EMC값을 산정하기 위한 과정을 나타낸 것이다.

$$EMC = \frac{PollutantMass}{Runoff\ Volume} = \frac{\sum Q_i C_i}{\sum Q_i} \quad (1)$$

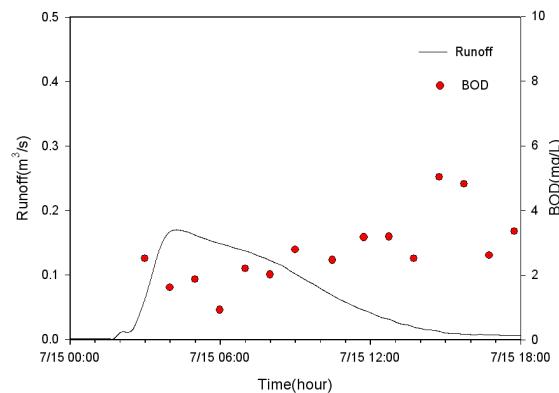


Fig. 2. Flow rate and BOD concentrations during event occurred 2009.7.15.

2.3. 확률 분포형

산정된 각 강우사상의 BOD EMC의 최적 확률분포형을 파악하기 위해 Cooke (1993)이 개발한 VTFIT (A routine for fitting homogenous probability density functions)을 이용하여 수질항목 분포특성에 많이 사용되는 정규분포, 대수정규분포, Gamma 분포 및 Weibull 분포를 사용하였다. VTFIT은 확률분포형을 파악하고 적합도 검정을 위해 여러 연구에 많이 이용되었으며 적용사례로 Soltanali 등(2008)은 휘발성 유기화합물의 생물화학적 처리 과정 모델링에 적용하였고, Shah 등(2002)은 뉴욕의 강우자료로부터 밀 씨앗의 병 예측을 위한 모형 작성에 이용하였다.

정규분포의 확률밀도함수는 식 (2)와 같고, x 는 확률변수, μ 및 σ 는 평균 및 표준편차, λ 및 ζ 는 대수를 취한 확률변수에 대한 평균 및 표준편차를 의미한다. 각 확률변수간의 관계는 식 (3), (4)와 같고, 대수정규분포의 확률밀도함수는 식 (5)와 같다.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (2)$$

$$\mu = \exp(\lambda + \frac{1}{2}\zeta^2) \quad (3)$$

$$\sigma^2 = \mu^2 [\exp(\zeta^2) - 1] \quad (4)$$

$$f(x) = \frac{1}{x \sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

Gamma 분포의 확률밀도함수는 식(6)과 같으며, Weibull 분포의 확률밀도함수는 식(7)과 같다.

$$f(x) = \frac{\beta^{-\alpha} x^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \exp(-\frac{x}{\beta}) \quad (6)$$

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left(-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}\right) \quad (7)$$

여기서 x 는 확률변수, Γ 는 Gamma 함수, α 및 β 는 매개변수이다.

2.4. 적합도 검정

VTFIT에서 적정 확률분포형 파악을 위한 적합도 검정 방법으로 x^2 , Kolmogorov-Smirnov, Kuiper, Cramer-Von Mises, Anderson-Darlin, Maximum Likelihood 방법이 있으며 이 중 Kolmogorov-Smirnov와 x^2 등이 많이 사용되고 있으며, 본 연구에서는 Kolmogorov-Smirnov를 사용하여 적합도 검정을 실시하였다.

Kolmogorov-Smirnov 검정은 확률밀도함수에 대해 검정하는 x^2 검정방법과는 달리 누가분포함수에 대해 검정하는 방법이다. 표본자료의 누가분포함수와 가정된 이론확률분포의 누가분포함수를 비교하여 양자의 최대편차에 의해 검정·분석한다. 표본자료와 가정된 누적확률분포를 비교하여 양자의 최대편

차(D_{\max})가 자료의 크기(n)와 유의수준(α)에 따라 결정되는 한계편차(D_n^{α})와 비교하여 크면 분포는 기각하고 작으면 채택한다. 이를 확률로 나타내면 식(8)과 같다.

$$P(D_{\max} \leq D_n^{\alpha}) = 1 - \alpha \quad (8)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 유량 및 강우사상평균 농도

2007년~2009년 동안의 강우량과 유출량을 나타낸 것은 Fig. 3과 같고 강우량이 증가함에 따라 유량이 증가함을 알 수 있었으며 이와 같은 자료를 바탕으로 각 강우사상의 EMC를 산정하였다. 또한 2007년~2009년 동안 영농기간(5월~9월) BOD EMC 변화현상을 살펴보면 2007년, 2008년, 2009년 BOD EMC의 범위는 각각 0.65~7.45, 0.37~7.99, 0.6~4.61 mg/L 였고 조사기간동안 평균 BOD EMC는 3.58 mg/L로 조사되었다. 이는 1995년에 시행된 비점오염 조사사업에서 (환경부, 1995) 산정된 영산강 유역내 눈에서 강우사상에 따른 BOD EMC 값인 2.76mg/L보다 높게 나타났으며 1995년에 산정된 강우사상에 따른 BOD EMC 값은 대부분 4~5회의 모니터링으로 조사된 값으로서

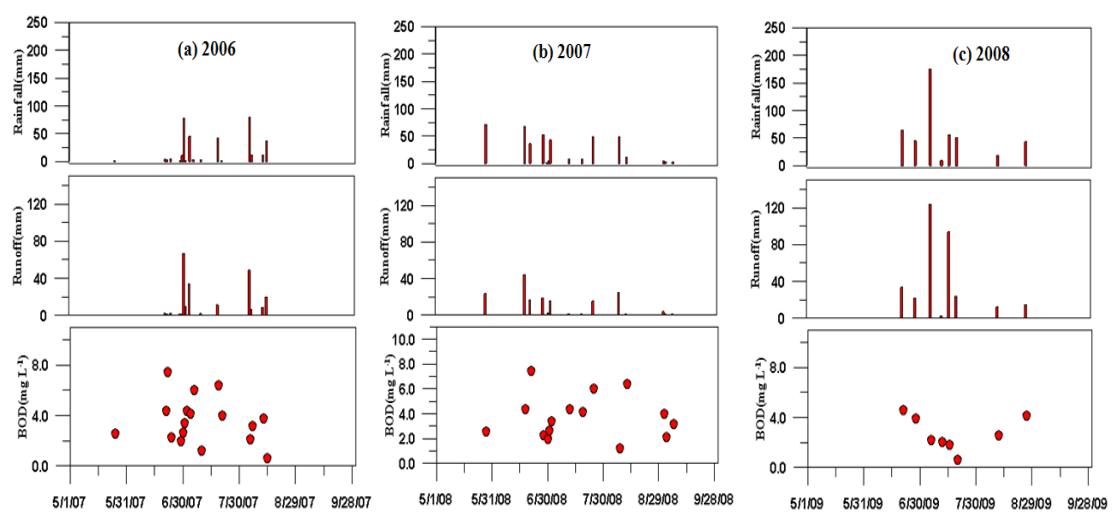


Fig. 3. The amount of rainfall, flow rate and BOD EMC for cropping period from 2007 to 2009.

본 관측치보다 더 적은 조사횟수로 인해 생긴 차이로 보인다. 또한 원 등(2009)이 보고한 산림의 유출수내 BOD EMC 범위인 1.3~2.6 mg/L보단 높고, 밭의 BOD EMC 범위인 6.4~22.7 mg/L 보단 낮은 것으로 나타났다.

3.2. 적정 확률분포형 파악을 위한 Kolmogorov-Smirnov

본 연구에서 3년간(2007년~2009년) 조사된 BOD EMC 변화추세와 정규분포, 대수정규분포, Gamma 및 Weibull 누적분포곡선(Cumulative Distribution Function : CDF)을 통해 추정된 BOD EMC의 변화추세(BODr)는 Fig. 4와 같으며, 이를 통해 정규분포, 대수정규분포, Gamma 및 Weibull 분포 모두 실측자료에 비교적 잘 적합한 것으로 나타났으며, 특히 대수정규 및 Weibull 분포에 비해 정규분포와 Weibull 분포가 실측자료에 더 적합함을 알 수 있었다. Van Buren

등(1997)은 도시유역을 배후로 하는 저류지 유출수의 COD농도는 대수정규분포가 적합하지 않고 정규분포가 더 적합하다고 발표했으며 또한 Watt 등(1989)은 저류량이 많은 경우 유출수와 수위는 공통적으로 정규분포가 적합하다고 하였다. 그러나 김과 안(2009)은 안성천 유역에서 BOD 확률분포는 정규분포보다 대수정규분포, Gamma 및 Weibull 분포가 실측자료에 더 적합하다는 상반된 연구결과를 발표하였다. 따라서, 이러한 연구결과들을 고려할 때 확률분포를 이용하여 수질관리시 획일적인 확률분포형을 사용하는 것보다 유역특성에 맞는 적정 확률분포형을 산정한 후 이를 이용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 한편, 논에서 BOD EMC 확률분포별 최대편차는 Table 1과 같고, Kolmogorov-Smirnov 검정 방법에 의하여 정규분포와 Gamma의 최대편차가 대수정규 및 Weibull

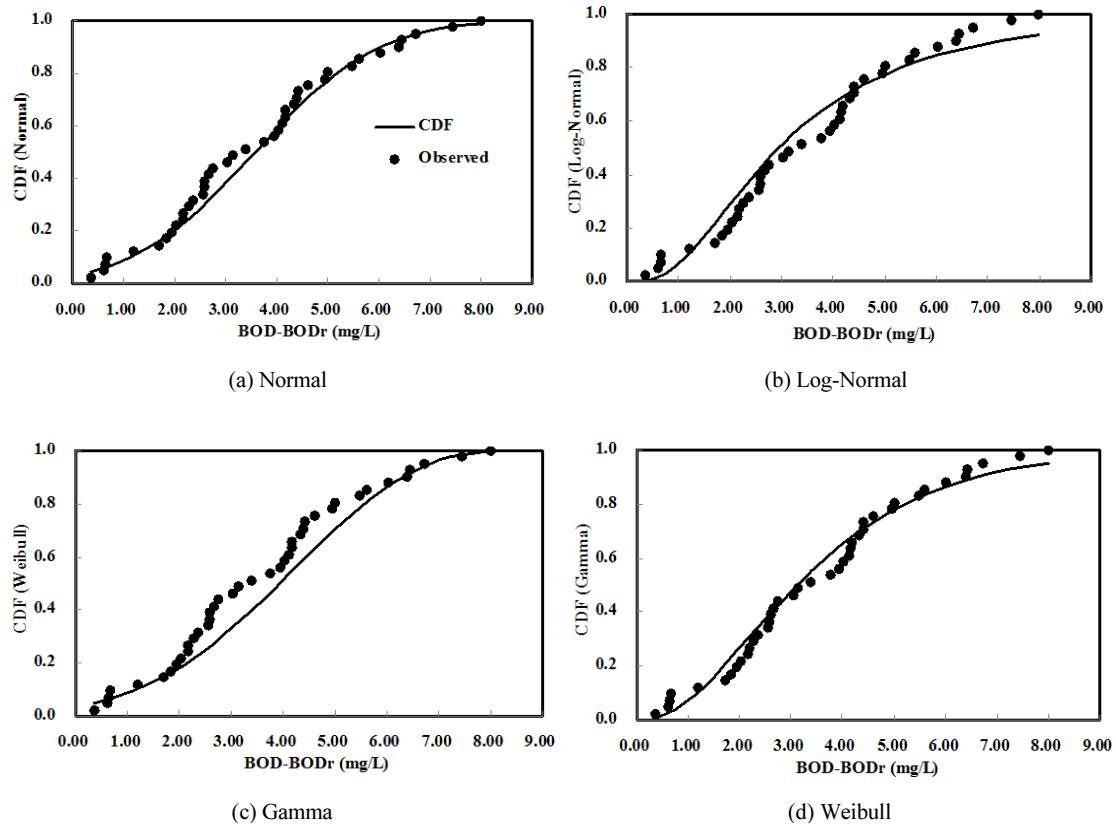


Fig. 4. Measured data and theoretical cumulative density function.

분포에 비해 낮게 나타나는 BOD EMC에 가장 적합한 확률분포인 것으로 나타났다. 하지만 Weibull 분포는 확률분포 산정시 정규분포와 다르게 식(6)과(7)에 있는 매개변수의 추정이 필요하므로 향후 논에서의 BOD EMC의 확률분포는 매개변수 추정이 필요없는 정규분포를 이용하는게 용이할 것으로 판단된다. Table 2는 유의수준에 따른 확률분포 기각 및 채택을 나타낸 것으로 유의수준 0.05, 0.10에 따른 $D_{41}^{0.05}$ 와 $D_{41}^{0.10}$ 은 각각 0.21과 0.18로 나타났으며 정규분포, 대수정규분포, Gamma 분포 및 Weibull 분포 모두 유의수준의 크기에 상관없이 BOD EMC의 확률분포를 잘 나타내는 것으로 파악되었다.

Table 1. Maximum difference of each cumulative probability distribution

Distribution	D_{\max}
Normal	0.11
Log-Normal	0.12
Gamma	0.11
Weibull	0.15

Table 2. Rejection and acceptance of probability distribution

Distribution	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.10$
Normal	○	○
Log-Normal	○	○
Gamma	○	○
Weibull	○	○

note) ○ : Accept, ×: Reject

3.3. 확률분포에 따른 BOD EMC

확률분포에 따른 50%와 90% BOD EMC 결과는 Table 3과 같다. 정규분포, 대수정규분포, Gamma 분포, Weibull 분포의 BOD EMC 50%는 각각 3.58, 2.95, 3.12, 3.93 mg/L로 나타났으며, 90%일 때는 각각 5.49, 4.96, 5.25, 5.99 mg/L로 나타났다. 본 연구에서 조사한 관측치의 중앙값인 3.39 mg/L와 비교해 보면 정규분포와 Gamma 분포가 근접함을 알 수 있다.

Table 3. BOD EMC estimation using four probability distribution (50% and 90%)

	단위 : mg/L	
	EMC 50%	EMC 90%
Normal	3.58	5.49
Log-Normal	2.95	4.96
Gamma	3.12	5.25
Weibull	3.93	5.99

4. 결 론

본 연구에서는 강우사상에 따라 논에서 유출되는 BOD EMC와 BOD EMC의 적정 확률분포형을 알아보기 위해서 영산강 수계의 논을 대상으로 조사하였다. 조사기간동안 BOD EMC 범위는 $0.37\sim7.99 \text{ mgL}^{-1}$ 로 나타났으며, BOD EMC를 정규분포, 대수정규분포, Gamma 분포 및 Weibull 분포에 적용했을 경우 모두 적합성이 인정되었다. 하지만 최대편차를 고려해 본다면 정규분포와 Gamma 분포가 가장 적합한 것으로 나타났고 사용의 용이성 측면에서는 Gamma 분포 보단 정규분포가 더 용이한 것으로 판단된다. 본 연구는 3년간의 자료를 이용하여 적정 확률분포형을 알아본 것이므로 보다 적합한 확률분포형을 알아보기 위해서는 토성이나 온도, 유기물 함량 등 조건이 다른 논에서의 장기적인 모니터링 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2009년 영산강·섬진강 수계 환경기초조사사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 국립환경과학원 수질총량연구과, 2009, 강우유출수 조사방법.
- 김길홍, 정하영, 김건하, 김영철, 이동률, 2002, 강우 유출수 EMC농도의 통계학적분석 및 평가, 춘계학술발표회 논문집, 한국물환경학회, 105-108.
- 환경부, 1995, 비점오염원 조사연구사업 보고서.
- 환경부, 2004, 관계부처합동 [물관리 종합대책]의 추진

- 강화를 위한 4대강 비점오염원관리 종합대책.
- Ang, A. H. S., Tang, W. H., 2007, Probability concepts in engineering : emphasis on applications to civil and environmental engineering, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, N.Y.
- Chow, V. T., 1954, The lognormal distribution and its engineering applications, Proc. Am. Soc. Civ. Engrs., 80, 1-25.
- Cooke, R., 1993, VTFIT: A Routine for fitting homogeneous probability density function, software help, virginia polytechnic institute, Blacksburg, VA.
- Hall, M., Ellis, J. B., Brizio, M. G., 1990, On the statistical distribution of event mean concentrations of pollutants in stormwater runoff, In Proc., 5th Int. Conf. on Urban Storm Drainage, 317-323.
- Han, K. H., Kim, J. H., Yoon, K. S., Cho, J. Y., Kim, W. I., Yun, S. G., Lee, J. T., 2007, Effluent Characteristics of Nonpoint Source Pollutant Loads at Paddy Fields during Cropping Period, Korean Society of Soil Science and Fertilizer., 40(1), 18-24.
- Han, K. Y., Kim, S. H., Bae, D. H., 2001, Stochastic water quality analysis using reliability method, Journal of the American Water Resources Association., 37(3), 695-708.
- Harremoes, P., 1988, Stochastic models for estimations of extreme pollution from urban runoff, Wat. Res. Bull., 22, 1017-1026.
- Jeon, J. H., Yoon, C. G., Hwang, H. S., 2003, Water Quality Model Development for Loading Estimates from Paddy Field, Korean J. Limnol., 36(3), 344-355.
- Jung, J. W., Yoon, K. S., Choi, W. J., Kwak, J. H., Lim, S. S., Huh, Y. J., Lee, S. H., Chang, N. I., 2007, Probability Distribution of Event Mean Concentration from Paddy Field, Korean Society on Water Quality., 757-760.
- Jung, S. M., Park, I. H., Ha, S. R., 2008, Identifying dominant parameters of storm-sewer-overflows in separate sewer system, Korean Wetlands Society., 10(2), 105-114.
- Kim, G. H., Kim, Y. C., Lee, D. R., Jung, H. Y., Yur, J. H., 2003, Analysis and Estimation of EMC Loads of Rainfall Runoff from Agricultural-Forestry in Korea, Korean Society of Environmental Engineers., 25(6), 760-770.
- Kim, G. H., Kwon, S. H., 2005, Estimation of BOD Loading of Diffuse Pollution from Agricultural-Forestry Watersheds, Journal of Korean Society on Water Quality., 21(6), 617-623.
- Kim, K. S., Ahn, T. J., 2009, Characteristics of Probability Distribution of BOD Concentration in Anseong Stream Watershed, Korean Society on Water Quality., 25(3), 425-431.
- Lee, B. S., Jung, Y. J., Park, M. J., Gil, K. I., 2008, A Study on the Discharge Characteristics of Non-point Pollutant Source in the Agricultural Area of the Kyongan Watershed, Korean Society on Water Quality., 24(2), 169-173.
- Melching, C. S., Yoon, C. G., 1996, Key sources of uncertainty in QUAL2E model of Passaic river, Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE., 122(2), 105-113.
- Sansalone, J. J., Buchberger, S. G., 1997, Partitioning and First Flush of Metals in Urban Roadway Storm Water, Journal of Environmental Engineering, ASCE., 123, 134-143.
- Shah, D. A., Bergstrom, G. C., 2002, A Rainfall-Based Model for Predicting the Regional Incidence of Wheat Seed Infection by Stagonospora nodorum in New York, Phytopathology, 92, 511-518.
- Soltanali, S., Hagani, Z., Shams, 2008, Modeling of air stripping from volatile organic compounds in biological treatment processes, Int. J. Environ. Sci. Tech., 5(3), 353-360.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA)., 1983, Results of the Nationwide Urban Runoff Program Volume I-Final Report, Water Planning Division, U.S. EPA, Washington, DC.
- Van Buren, M. A., WATT, W. E., Marsalek, J., 1997, Application of the Log-normal and Normal distributions to stormwater quality parameters, Wat. Res., 31(1), 95-104.
- Watt, W. E., Lathem, K. W., Neill, C. R., Richards, T. L., Rouselle, J. (Eds), 1989, Hydrology of Floods in Canada: A Guide to Planning and Design. National Research Council Canada, Ottawa, Ontario.
- Yur, J. H., Kim, G. H., 2005, Comparison of Discharge Characteristics of NPS Pollutant Loads from Urban, Agricultural and Forestry Watersheds, Korean Society on Water Quality., 21(2), 184-189.