

안성천 유역의 BOD농도 확률분포 특성

김경섭[†] · 안태진^{*}

국립한경대학교 환경공학과

^{*}국립한경대학교 토목공학과

Characteristics of Probability Distribution of BOD Concentration in Anseong Stream Watershed

Kyung Sub Kim[†] · Taejin Ahn^{*}

Department of Environmental Engineering, Hankyong National University

^{*}Department of Civil Engineering, Hankyong National University

(Received 3 February 2009, Revised 2 April 2009, Accepted 13 April 2009)

Abstract

It is very important to know the probability distribution of water-quality constituents for water-quality control and management of rivers and reservoirs effectively. The probability distribution of BOD in Anseong Stream was analyzed in this paper using Kolmogorov-Smirnov test which is widely used goodness-of-fit method. It was known that the distribution of BOD in Anseong Stream is closer to Log-normal, Gamma and Weibull distributions than Normal distribution. Normal distribution can be partially applied depending on significance level, but Log-normal, Gamma and Weibull distributions can be used in any significance level. Also the estimated Log-normal distribution of BOD at Jinwi3 station was to be compared with the measured in 2001, 2002 and 2003 years. It was revealed that the estimated probability distribution of BOD at Jinwi3 follows a theoretical distribution very well. The applicable probability distribution of BOD can be used to explain more rigorously and scientifically the achievement or violation of target concentration in TMDL(Total Maximum Daily Load).

keywords : Anseong stream, BOD, Kolmogorov-smirnov, Log-normal distribution, Probability distribution

1. 서론

환경은 자체 정화능력이 있어 어느 정도 외부 환경압력에 견딜 수 있으나 환경압력이 자정능력을 초과하면 환경 파괴 현상이 발생한다. 이의 하나인 수계의 오염문제는 농업용수 및 공업용수 등의 수자원이용을 부적절하게 하여 수확량 및 생산성의 감소를 초래하고 있으며, 또한 음용수로서의 가치를 상실하여 음용수 수질기준을 만족하기 위한 수처리 비용의 과다를 유발하고 있다. 따라서 수계의 오염 정도를 파악하고 원인인자를 규명하는 것은 적절한 수질보전대책 및 관리방안 수립을 위하여 필수적이다. 외부의 오염원 유입에 의하여 야기되는 수계의 수질변화는 계량화가 가능한 수학적 모델을 이용하여 파악할 수 있다. 수질은 유입 오염부하량의 크기에 따라 결정되며 수계내 오염물질은 이 물질의 화학 및 생물학적 특성에 의하여, 또한 수계의 물리적인 특성에 의하여 변화한다. 오염발생원으로부터 비롯되는 부하량은 수질모델을 통하여 농도로 파악되며, 이는 수이용에 필요한 수질기준과 비교·검토하게 된다. 목표로 하는 수질기준을 초과할 경우 다양한 방법을 모색하여

수질관리대책을 수립할 필요가 있다. 상용화 된 결정론적 모델은 이와 같은 현상을 규명하고 대책을 수립하는데 적절히 이용되고 있다(Brown and Barnwell, 1987; Chapra, 1997).

하천 및 호소의 수질을 효율적으로 관리하기 위해서는 관리대상 수질항목의 분포형태 파악이 매우 중요하다. Di Toro(1984)는 오염부하의 유입 후 하천내 수질농도 파악에 대수정규분포를 적용하였으며, Tung와 Hathhorn(1988)은 용존산소 분포 파악에 정규, 대수정규, Gamma 및 Weibull 분포를 적용하였다. Melching(1992)은 Tung와 Hathhorn 용존산소 분포 결과의 불확실성을 분석하였고, Franceschini와 Tsai(2008)는 나이아가라강 비소분석에 대수정규분포를 적용하였다. 자료의 분포형태는 확률지를 사용하는 방법과 적합도 검정을 하는 방법으로 파악할 수 있으며(Ang and Tang, 2007), Reckhow 등(1990)은 North Carolina주 Deep River에서 니켈의 실측치와 계산치의 적합도 판정에 Kolmogorov-Smirnov 검정을 실시하였다. 수질항목의 확률분포는 해석해 또는 수치해로 구성된 결정론적 모델과 연계하여 모의결과의 불확실성 및 신뢰성 등 지표수 수질관리에 효율적으로 사용될 수 있다(Melching and Yoon, 1996; Han et al., 2001).

본 연구에서는 안성천 유역의 경기도 수질측정지점에 대한 BOD농도의 확률분포를 과거 약 15년간의 자료를 활용하여 파악해 보았다. 이 분포를 기초로 황구지천과 진위천

[†] To whom correspondence should be addressed.

kskim@hknu.ac.kr

이 합류하는 유역의 유량자료가 확보되어 있는 지점에 대한 실측 및 추정 BOD농도 확률분포를 비교하여 보았으며 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다. 본 연구의 결과가 수질항목을 모의할 수 있는 결정론적 모델과 연계하여 하천 수질관리에 적용된다면 목표수질 달성 및 위반에 대한 임의성 판단이 감소하여 합리적이며 효율적인 하천관리가 수행될 수 있을 것으로 사료된다.

2. 연구방법

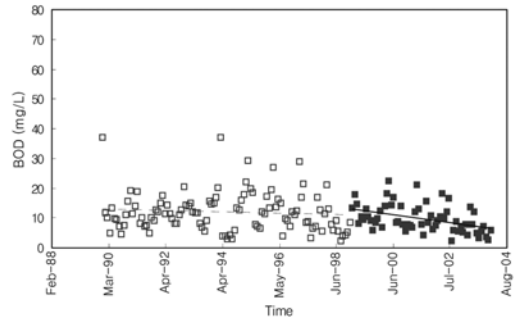
2.1. 대상유역

BOD농도 확률분포 형태 파악을 위하여 대상유역은 안성천으로 하였으며 안성천 유역의 수질측정지점 및 유량측정지점은 Fig. 1과 같다. 안성천 유역에는 경기도 및 건설교통부에서 15개의 수질측정지점(환경부, 2007)과 7개의 수위 및 유량관측지점(한강홍수통제소)을 운영하고 있으며, 이 가운데 수질 및 유량 측정지점이 서로 일치하거나 인접한 곳은 진위천2(회화), 황구지천3(송산), 진위천3(동연교), 안성천3(평택) 및 안성천1(안성)지점 등이다.

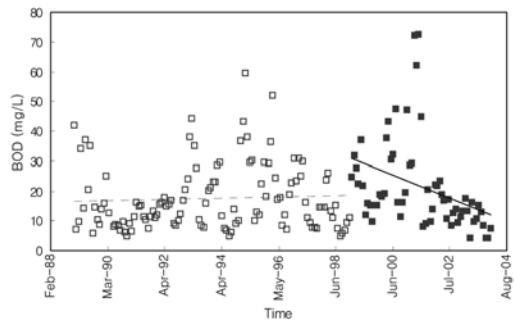
2.1.1. 수질측정지점

안성천 유역의 수질측정지점은 경기도 수질측정지점 중 유량자료를 얻을 수 있고, 결과의 비교·분석이 가능한 지점을 선정기준으로 안성천3, 진위천3, 진위천2 및 황구지천3을 택하였다. 과거 약 15년간(1989~2004)의 자료 분석을 통하여

최근 5년간의 농도변화가 일정하게 감소하는 양상을 나타내고 있어(Fig. 2) 1999년도부터 2003년 까지 과거 5년간의 월평균 자료를 활용하여 BOD농도 확률분포양상을 파악하였다.



(a) Jinwi2



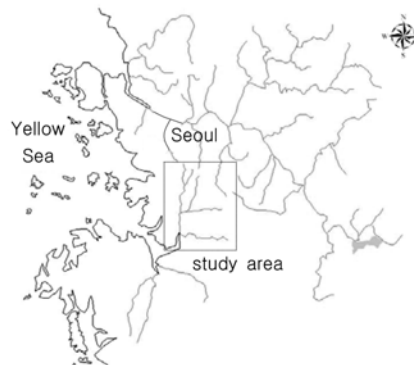
(b) Hwangguji3

Fig. 2. BOD variation trend at Jinwi2 and Hwangguji3.



(a) Water quality

(b) Surface water level or flow rate



(c) Anseong stream watershed

Fig. 1. Monitoring stations of Anseong stream watershed.

2.1.2. 유량측정지점

유량측정지점은 수질측점에 근접한 지점으로 진위천2에 근접한 회화, 황구지천3에 근접한 송산, 진위천3에 근접한 동연교 및 안성천3에 근접한 평택지점을 선정하였다. 5년간의 수질측정자료와 일치한 기간중에 2001년, 2002년 및 2003년의 년평균 유량자료는 Table 1과 같다.

Table 1. Average flow rate (unit : cms)

year	Pyeongtaek	Dongyeon bridge	Heohwa	Songsan
2001	83.86	24.97	8.20	76.89
2002	117.40	41.98	9.56	69.76
2003	117.22	41.18	12.18	77.26

2.2. 적정 확률 분포형 파악

BOD농도 분포 형태를 파악하기 위한 고려 대상 확률 분포형은 수질항목의 분포특성분석에 많이 사용되는 정규분포, 대수정규분포, Gamma 분포 및 Weibull 분포로 하였다. 정규분포 이외의 대수정규분포, Gamma 분포 및 Weibull 분포의 확률변수는 모두 양의 값을 취한다.

대수정규분포의 평균 및 표준편차를 μ 및 σ , 대수를 취한 확률변수에 대한 평균 및 표준편차를 λ 및 ζ 라 하면 각 확률변수간의 관계는 다음과 같다.

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

$$\sigma^2 = \mu^2[\exp(\zeta^2) - 1] \tag{2}$$

Gamma 분포의 확률밀도함수는 식 (3)과 같으며

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} \exp(-x/\beta) \text{ for } x>0, \alpha>0, \beta>0 \tag{3}$$

$$= 0 \text{ elsewhere}$$

여기서 x 는 확률변수, Γ 는 Gamma 함수, α 및 β 는 매개변수이다. Weibull 분포의 확률밀도함수는 식 (4)와 같다.

$$f(x) = \alpha\beta x^{\beta-1} \exp(-\alpha x^\beta) \text{ for } x>0, \alpha>0, \beta>0 \tag{4}$$

$$= 0 \text{ elsewhere}$$

측정된 BOD농도 자료의 적정 확률 분포형 파악은 확률 지를 사용하는 방법과 적합도 검정을 하는 방법으로 대별할 수 있으며, 후자의 방법은 χ^2 검정 및 Kolmogorov-Smirnov 검정 등이 잘 알려져 있다. Kolmogorov-Smirnov 검정은 이론분포의 매개변수를 계산하기 위하여 계급구간을 나눌 필요가 없는 장점이 있다.

2.3. 확률분포 적용

변수의 확률분포는 영향을 미치는 매개변수의 기지 확률 분포로 파악할 수 있으며, 서로 독립적인 확률분포의 합 또는 차의 확률분포는 식 (5) 및 (6)과 같이 표현가능하다.

$$\mu_Z = \sum_{i=1}^n a_i \mu_{X_i} \tag{5}$$

$$\sigma_Z^2 = \sum_{i=1}^n a_i^2 \sigma_{X_i}^2 \tag{6}$$

여기서, X 는 확률변수, n 은 확률변수의 개수, Z 는 확률변수의 합 또는 차, a 는 상수이다. 진위천 하류 지점(진위천3)의 수질은 진위천 중류(진위천2) 및 황구지천(황구지천3)의 수질에 영향을 받으며, 진위천3 지점의 BOD농도 확률분포는 BOD에 대한 물질수지방정식을 통하여 식 (5) 및 (6)을 사용하여 파악할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Kolmogorov-Smirnov 검정

확률분포의 적합도 검정에 가장 광범위하게 사용되는 Kolmogorov-Smirnov 방법은 비 매개변수방법의 하나로 실측자료의 누적확률분포와 가정된 이론 확률분포의 누적확률분포를 비교하며 양자의 최대편차(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 (7)과 같다.

$$P(D_{max} \leq D_n^\alpha) = 1 - \alpha \tag{7}$$

Figs 3 및 4는 안성천3 및 진위천3 지점의 실측자료와 정규, 대수정규, Gamma 및 Weibull 누적분포곡선(Cumulative Distribution Function : CDF)을 5년간(1999년-2003년) BOD 변화추세(BODr)를 반영하여 나타낸 것으로 정규분포보다 대수정규, Gamma 및 Weibull 분포가 실측자료에 잘 적합하는 것을 알 수 있으며, 진위천2 및 황구지천3에서도 이와 유사하게 나타났다. 각 지점에서의 최대편차가 Table 2에 나타나 있으며, 정규분포의 최대 편차가 다른 세분포의 최대편차보다 크고 안성천3과 황구지천3 지점이 다소 높은 최대편차를 보이는 것으로 파악되었다. Table 3은 유의수준에 따른 각 지점에서의 확률분포 기각 및 채택을 나타낸 것으로 $D_{60}^{0.2}$ 및 $D_{60}^{0.05}$ 는 각각 0.138 및 0.176으로 나타나 대수정규분포, Gamma 분포 및 Weibull 분포는 유의수준 크기에 상관없이 BOD농도 확률분포를 잘 나타내는 것으로 파악되었다.

Gamma 및 Weibull 분포는 대수정규분포와 다르게 식 (3) 및 (4)에 있는 매개변수를 파악하여야 한다. Kolmogorov-Smirnov 검정을 위한 Gamma 및 Weibull 분포의 매개변수는 실측자료를 최적 적합하는 최적화 모델을 구축하여 매개변수를 추정하였으며 결과가 Table 4에 나타나 있다. Table 4로부터 각 지점 및 확률분포별 매개변수가 상이한 것을 알 수 있으며, 이는 매개변수가 지점별 특성을 반영한 결과로 보인다. 분포별 매개변수를 지점에 관계없이 동일 배수구역내에서 동일하게 적용할 수도 있을 것으로 판

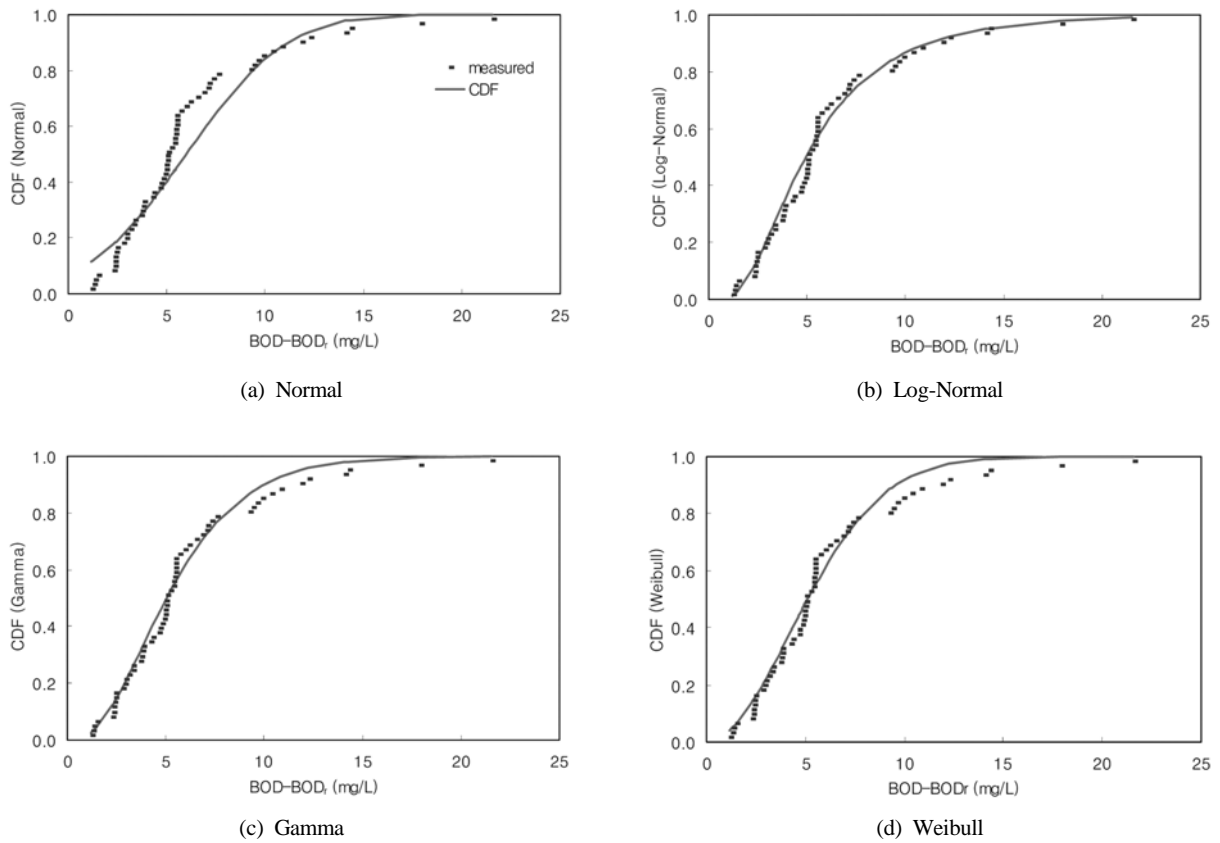


Fig. 3. Measured data and theoretical cumulative density function (Anseong3).

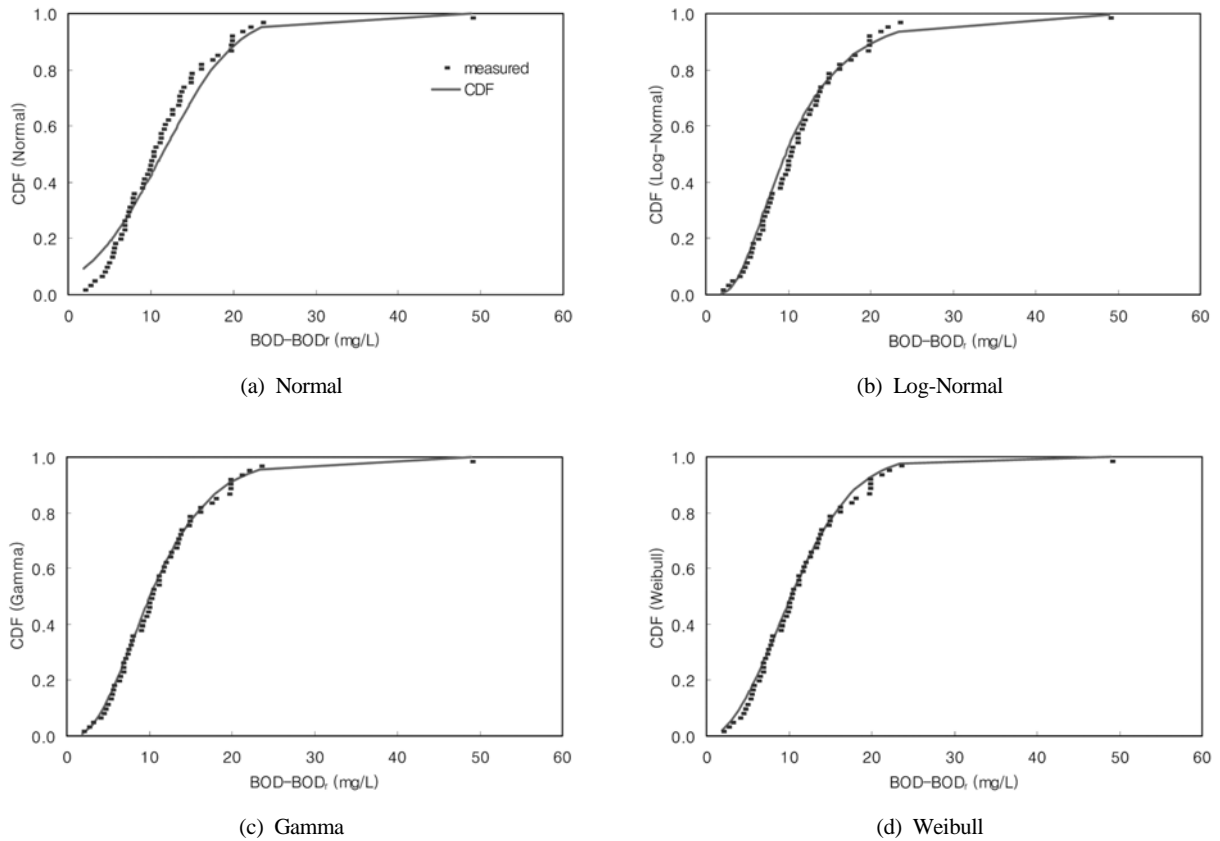


Fig. 4. Measured data and theoretical cumulative density function (Jinwi3).

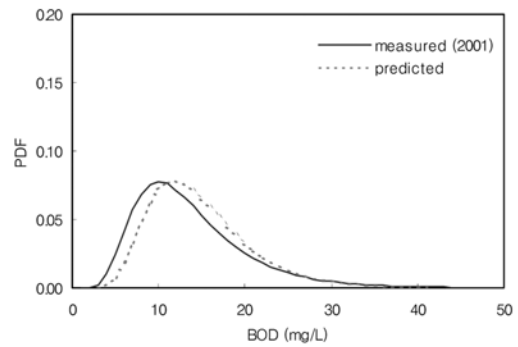
Table 2. Maximum difference (D_{max}) of each station

Distribution	Anseong3	Jinwi3	Jinwi2	Hwangguji3
Normal	0.192	0.109	0.142	0.182
Log-normal	0.098	0.075	0.078	0.102
Gamma	0.087	0.050	0.080	0.094
Weibull	0.098	0.069	0.091	0.109

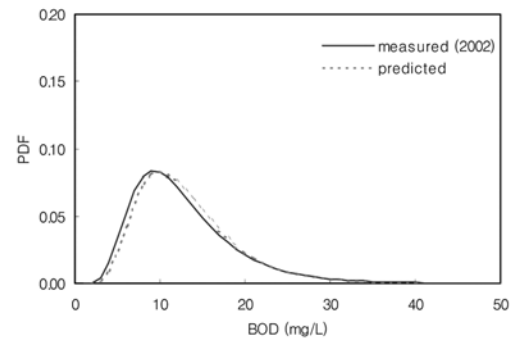
단하며, 이럴 경우 Gamma 및 Weibull 분포의 최대편차는 Table 2보다 일반적으로 크게 나타나 분포의 기각 및 채택 여부를 다시 판단하여야 할 것으로 보인다. 결론적으로 BOD 농도 확률분포 파악에 대수정규분포를 사용할 경우 실측 자료를 그대로 활용할 수 있으나 Gamma 및 Weibull 분포를 사용할 경우 실측치를 재현하는 매개변수를 파악하는 계산 단계를 하나 더 거쳐야 함을 알 수 있다.

3.2. BOD농도 확률분포 적용

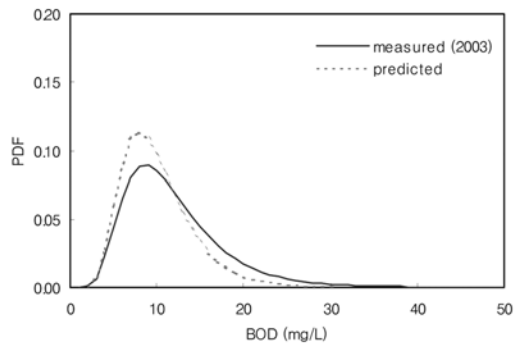
진위천3 지점 BOD는 이 지점이 진위천2 및 황구지천3 지점에서 멀지 않아 진위천2 및 황구지천3 지점의 BOD가 하천내에서 반응역학적 변화 없이 직접적으로 영향을 미친다고 가정하였고, 확률분포는 적용 가능한 대수정규분포, Gamma 분포 및 Weibull 분포 가운데 매개변수 추정이 필요 없는 대수정규분포를 적용하였다. Fig. 5는 진위천2 및 황구지천3의 실측 BOD농도 확률분포를 사용하여 진위천3 지점의 BOD농도 확률분포를 예측하고 이를 실측 BOD농도 확률분포와 비교한 것으로, 2001 및 2002년도의 진위천3 지점의 BOD농도 확률분포는 실측 BOD농도 확률분포를 잘 나타내고 있으며(자료크기 50에 대한 2001년 오차 = 14.189, 2002년 오차 = 6.637), 2003년도는 분포에서 약간의 변이를 보이는 것으로(2003년 오차 = 30.259) 파악되었다. 진위천2 및 진위천3 지점의 유량은 Table 1에 주어진 회화 및 동연교 지점 자료를 사용하였으며 황구지천3 지점의 유량은 회화 및 동연교 지점 사이의 특별한 유량감소 조건이 발생하지 않음으로 두 자료의 차이를 적용하였다. Table 5는 년도별 BOD농도 확률분포의 실측치 및 예측치의 평균, 표준편차 및 변동계수(Coefficient of Variation : COV)를 나타낸 것으로 2001년, 2002년 및 2003년의 BOD 평균 농도 예측 오차는 8.3%, 3.3% 및 14.9%를 각각 나타



(a) Year 2001



(b) Year 2002



(c) Year 2003

Fig. 5. Probability distributions of BOD at Jinwi3.

내었다. 변동계수 예측치는 년도에 상관없이 실측치와 유사하게 나타났다.

Table 3. Rejection and acceptance of probability distribution

Distribution	$\alpha = 0.2$				$\alpha = 0.05$			
	Anseong3	Jinwi3	Jinwi2	Hwangguji3	Anseong3	Jinwi3	Jinwi2	Hwangguji3
Normal	×	○	×	×	×	○	○	×
Log-normal	○	○	○	○	○	○	○	○
Gamma	○	○	○	○	○	○	○	○
Weibull	○	○	○	○	○	○	○	○

note) × : reject, ○ : accept

Table 4. Parameter estimation of Gamma & Weibull distributions

Parameters	Gamma distribution				Weibull distribution			
	Anseong3	Jinwi3	Jinwi2	Hwangguji3	Anseong3	Jinwi3	Jinwi2	Hwangguji3
α	3.056	3.372	3.167	3.474	0.031	0.006	0.017	0.002
β	1.849	3.315	2.396	5.166	1.910	2.022	1.924	2.071

Table 5. Characteristics of probability distribution of BOD

year	Measured			Estimated		
	μ (mg/L)	σ (mg/L)	COV	μ (mg/L)	σ (mg/L)	COV
2001	13.790	6.711	0.487	14.936	6.152	0.412
2002	12.819	6.238	0.487	13.246	6.055	0.457
2003	11.917	5.799	0.487	10.137	4.312	0.425

3.3. 진위천3 수질관리

진위천3 지점의 수질은 진위천2 지점(회화)과 황구지천3 지점(송산)의 수질에 직접적인 영향을 받는다. 과거 3년간의 유량자료를 평균하여 진위천3 지점의 BOD농도 변화를 파악하였으며 BOD 수질등급과 함께 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. Fig. 6로부터 진위천3 지점의 BOD농도는 황구지천3에 더 민감함을 알 수 있으며 이는 황구지천3 지점의 평균 부하량(5963.2 kg/d)이 진위천2 지점의 평균 부하량(1680.2 kg/d)보다 높아 나타난 결과로 사료된다. 진위천3 지점의 목표수질은 III등급이므로 이를 달성하기 위한 진위천2 및 황구지천3 지점의 BOD농도는 Fig. 6을 사용하여 파악가능하다.

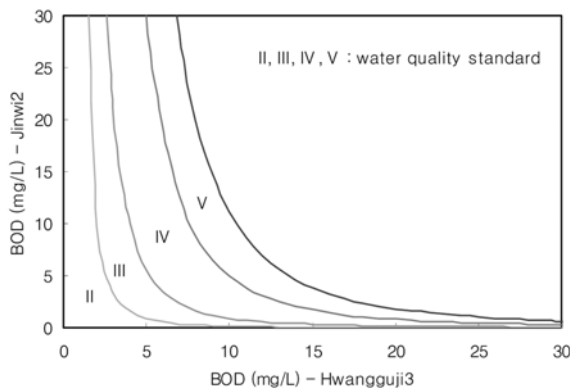


Fig. 6. BOD representation of Jinwi3.

4. 결론

본 연구에서는 하천의 수질관리를 위하여 안성천 유역의 BOD농도 분포에 적합한 확률 분포형을 파악하여 보았으며, 파악한 확률 분포형을 진위천3 지점 확률분포 추정 및 수질관리에 적용하여 보았다. 연구결과 및 장래연구방향을 서술하면 다음과 같다.

- 1) BOD농도 확률 분포형은 가장 많이 적용되는 매개변수 방법 중의 하나인 Kolmogorov-Smirnov 검정 방법을 사용하여 파악하였다.
- 2) 일반적으로 안성천의 BOD농도는 정규분포보다는 대수정규분포, Gamma 분포 및 Weibull 분포에 잘 적합되는 것을 알 수 있었다. 정규분포는 유의수준에 따라 적용가능하나, 대수정규분포, Gamma 분포 및 Weibull 분포는 유의수준에 관계없이 적용 가능한 것으로 나타났다.
- 3) BOD농도 확률분포에 적용 가능한 Gamma 및 Weibull 분포는 실측자료를 재현하는 매개변수를 파악하는 계산 단계를 필요로 하나, 대수정규분포는 계산단계 없이 실

측자료를 그대로 활용하므로 Gamma 및 Weibull 분포보다 용이성이 높게 나타났다.

- 4) 진위천2 및 황구지천3 지점의 수질 및 유량자료를 기초로 적용가능한 대수정규분포를 사용하여 진위천3 지점의 BOD농도 확률분포를 2001, 2002 및 2003년 3개년에 걸쳐 살펴보았으며, 이를 실측치와 비교해 본 결과 재현성이 높게 나타났다. 신뢰성 있는 수질 및 유량자료가 확보되면 BOD농도는 더욱 실측치에 근접할 것으로 판단한다.
- 5) 본 연구에서 파악한 BOD농도 확률분포는 우리나라 오염총량관리제에서 추진하고 있는 목표수질 달성여부의 신뢰성 또는 불확실성을 확률적으로 설명할 수 있어 더욱 과학적인 수질관리가 가능할 것으로 판단한다.
- 6) 우리나라 오염총량관리제의 경우 관리대상 수질항목은 BOD 이외에 TN, TP도 선정 가능하므로 이들 오염물질에 대한 분포 특성도 파악하면 효율적인 수계 수질관리가 가능할 것이다.

사 사

본 연구의 일부는 건설교통부 및 한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(08건설핵심B01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

건설교통부. 한강홍수통제소. <http://www.hrfco.go.kr>.
 환경부. (2007). 수질측정망 운영계획.
 Ang, A. H-S. and 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.
 Brown, L. C. and Barnwell, Jr. T. O. (1987). The Enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: documentation and user manual. EPA/600/3-87/007, USEPA, Envir. Res. Lab., Athens, G.A.
 Chapra, S. C. (1997). Surface water-quality modeling. McGraw-Hill, New York, N.Y.
 Di Toro, D. M. (1984). Probability model of stream quality due to runoff. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 110(3), pp. 607-628.
 Franceschini, S. and Tsai, C. W. (2008). Incorporating reliability into the definition of the margin of safety in total maximum daily load calculations. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 134(1), pp. 34-44.
 Han, K-Y., Kim, S-H. and Bae, D-H. (2001). Stochastic water

- quality analysis using reliability method. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(3), pp. 695-708.
- Melching C. S. (1992). Improved first-order uncertainty method for water-quality modeling. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 118(5), pp. 791-805.
- Melching, C. S. and Yoon, C. G. (1996). Key sources of uncertainty in QUAL2E model of Passaic river. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, 122(2), pp. 105-113.
- Reckhow, K. H., Clements, J. T. and Dodd, R. C. (1990). Statistical evaluation of mechanistic water-quality models. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 116(2), pp. 250-268.
- Tung, Y-K. and Hathhorn W. E. (1988). Assessment of probability distribution of dissolved oxygen deficit. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 114(6), pp. 1421-1435.