

확률분포를 이용한 남한강 보 건설 전·후 수질변화 분석

김경섭[†]

국립한경대학교 토목·안전·환경공학과

Analysis of Water-Quality Constituents Variations before and after Weir Construction in South Han River using Probability Distribution

Kyung Sub Kim[†]

Department of Civil, Safety & Environmental Engineering, Hankyong National University
(Received 27 September 2018, Revised 16 November 2018, Accepted 17 January 2019)

Abstract

The Four Major Rivers Restoration Project started in 2009 and completed in early 2013 is a large-scale inter-ministry SOC project investing ₩22.2 10¹² and one of the Project's objectives was to enhance the water-quality grade through recovering the river eco-system and environment. The average concentration and probability distribution of water-quality constituents at given and selected sampling sites are very significant elements for analyzing and controlling the water-quality of rivers or reservoirs effectively. Average concentration can be estimated by point estimator, distribution function of water-quality constituents or Bootstrap method, in which the distribution function estimated with more data in case of insufficient dataset, is applied. Ipo and Gangcheon water-quality monitoring stations in South Han River were selected to compare and analyze the variation of concentration before and after Ipo and Gangcheon Weirs construction, using the whole 4-year's data, from 2005 to 2008 and from 2014 to 2017. Water-quality constituents such as BOD and COD relating to oxygen demanding wastes and TP and Chlorophyll-a relating to the process of nutrient enrichment called eutrophication were also selected. The guidelines for water-quality control and management after weir construction including evaluation of water-quality constituents' variations can be presented by this paper.

Key words : Average concentration, Probability distribution, South Han River, Water-quality constituents variations, Weir construction

[†] Corresponding author, 교수(Professor), kskim@hknu.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0002-4546-0866>

1. Introduction

4대강 사업은 2009년도에 시작하여 2013년도 초에 마무리가 된 법정부적으로 추진한 약 22.2조가 투입된 대규모 SOC 사업으로 사업 내용을 살펴보면, 첫째 장래 물 부족 대비 수자원 확보를 위하여 하도 준설, 보설치 및 농업용 저수지 증고 등이며, 둘째 홍수 피해 복구비용을 줄이기 위하여 이상기후 홍수에 대비한 홍수조절지 및 강변저류지 등을 조성하며, 셋째 정체상태에 있는 수질오염도를 개선하여 하천의 생태적 건강성을 증진하고, 넷째 수변공간을 지역주민과 함께하는 문화·여가 등의 복합공간으로 창조하여 강을 중심으로 한 지역발전을 유도하는 것이다. 4대강 사업이 진척되기 전 16개의 보 건설에 의한 하천 수질은 개선될 것이다 또는 악화될 것이다 등으로 다양하게 표출되었으며, 보 건설 후 약 4년 정도가 지난 이 시점에서 보 건설 전과 건설 후 동일지점에서 주요 수질항목의 변화를 파악하는 것은 효율적인 하천수질관리에 의미 있는 일이다.

하천 및 호소의 수질을 효율적으로 관리하기 위해서는 수질관리 또는 수질목표 지점에서 관리대상 수질항목의 대표성 있는 평균 농도 및 분포 형태를 파악하는 것이 매우 중요하다(Chapra, 1997). 수질항목의 평균 농도는 강건성을 확보한 점추정량(point estimator)을 사용하는 방법(Kim et al., 2002; Li, 1992; Tsai and Franceschini, 2005), 적합한 확률분포를 파악하여 구하는 방법(Di Toro, 1984; Kim and Ahn, 2010; Novotny, 2004; Tung and Hathhorn, 1988) 및 자료가 부족한 표본의 경우 자료를 생성하여 분포를 통하여 파악하는 Bootstrap 방법(Chang et al., 2007; Efron, 1979; Jhun, 1990; Kim, 2010; Manly, 2006) 등이 있다. 수질항목의 확률분포는 해석해 또는 수치해로 구성된 결정론적 모델과 연계하여 모의결과의 불확실성 및 신뢰성 등 지표수 수질관리에 효율적으로 사용될 수 있다(Han et al., 2001; Melching and Yoon, 1996). 수질관리 분야에서 Bootstrap 기법은 오염원관리를 위한 통계모델에 적용하기도 한다(Schwarz et al., 2006).

본 논문에서는 남한강에 설치한 강천보, 여주보 및 이포보 등 3개의 보 가운데 보 건설 전부터 수질을 측정하고 건설 후에도 꾸준히 측정하여 보 건설 전·후 수질변화를 비교·분석할 수 있는 상류부에 위치한 강천과 하류부에 위치한 이포를 비교지점으로 선정하였다. 한해의 자료만을 사용하여 결과를 비교·분석하고 평가하는 것은 연간 변화를 반영하지 못하는 한계를 나타내므로 보 건설 전 4년(2005~2008)과 건설 후 4년(2014~2017) 자료를 모두 사용하여 한계를 나타내는 점추정법 대신 비슷한 자료가 중첩 또는 편중되거나 이상치가 존재하더라도 자료의 평균 등 대표성을 쉽게 확보할 수 있는 확률분포를 적용하는 방법을 사용하였으며 수질항목은 산소요구물질인 BOD 및 COD, 그리고 부영양화 물질인 TP 및 Chlorophyll-a (Chl-a) 등으로 하였다. 본 연구의 목적은 보 건설 전·후 4개의 주요 수질항목의 4년간의 월평균 측정자료 48개를 활용하여 각 항목의 수질이 악화되었는지 아니면 개선되었는지 비교·분석하

는 것이며, 또한 보 건설로 인한 수질변화 양상을 명확히 평가하여 장래 보 수질관리 가이드라인에 활용하는 것이다.

2. Materials and Methods

2.1 대상유역

남한강에는 강천, 여주 및 이포 등 3개의 보가 건설되었으며, 남한강 보 건설 전·후 수질자료 분석을 위하여 환경부 물환경정보시스템(Water Environment Information System, WEIS)에서 제공하는 원주, 강천, 여주1, 여주2, 이포 및 강상 등 남한강 본류지점가운데 보 건설에 의해 수질에 영향을 받을 수 있는 강천 지점(보 상류 400 m) 및 이포 지점(보 상류 300 m)을 선정하였다(ME, 2018). Fig. 1에 강천보, 여주보 및 이포보 지점과 남한강 본류 및 지류 주요 수질측정지점이 나타나 있다. 보가 위치한 남한강 유역으로 유입하는 주요하천은 섬강, 청미천, 금당천, 양화천, 복하천 및 흑천 등이 있다.

2.2 확률분포 분석

2.2.1 적정 확률 분포형

수질항목 분포 형태를 파악하기 위한 고려 대상 확률 분포는 정규분포, 대수정규분포, Gamma 분포 및 Weibull 분

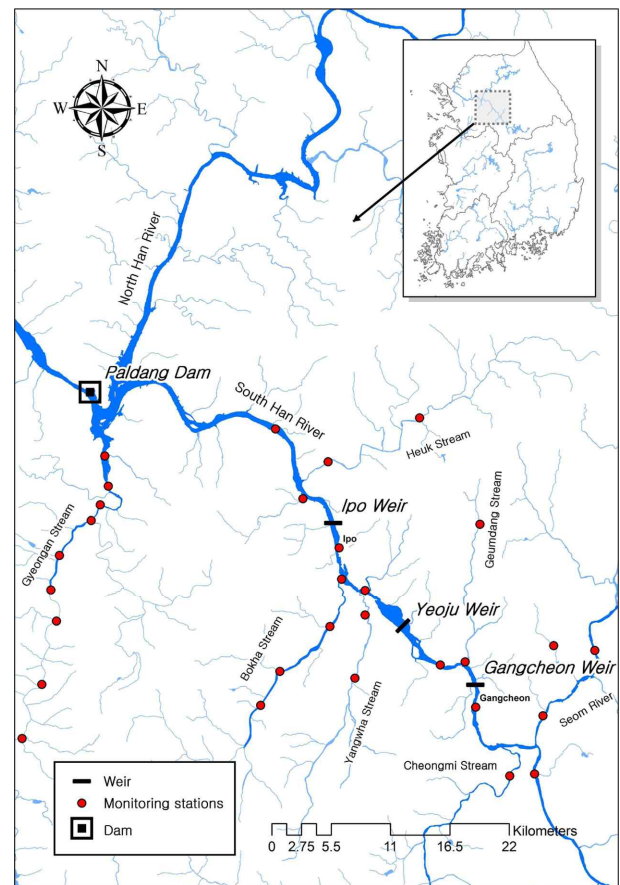


Fig. 1. South Han River Weirs (Gangcheon, Yeoju, Ipo) and monitoring stations.

포 등이 있으며 본 연구에서는 일반적으로 분포적용이 검증된 대수정규분포를 적용하였다. 대수정규분포의 평균 및 표준편차를 μ 및 σ , 대수를 취한 확률변수에 대한 평균 및 표준편차를 λ 및 ζ 라 하면 각 확률변수간의 관계는 식 (1)과 식 (2)와 같다.

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

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

2.2.2 Kolmogorov-Smirnov 검정

확률분포의 적합도 검정에 가장 광범위하게 사용되는 Kolmogorov-Smirnov 방법은 비 매개변수방법의 하나로 실측자료의 누적확률분포와 가정된 이론 확률분포의 누적분포함수(Cumulative Distribution Function, CDF)를 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 (3)과 같다(Ang and Tang, 2007; Reckhow et al., 1990).

$$P(D_{max} \leq D_n^\alpha) = 1 - \alpha \tag{3}$$

보 건설 전·후 수질자료 분석을 위하여 2005년부터 2008년까지 그리고 2014년부터 2017년까지 각 4년 동안 자료

Table 1. Critical value of D_n^α

n	α			
	0.20	0.10	0.05	0.01
48	0.154	0.174	0.194	0.234

크기 48 및 임의 유의수준에 대한 한계편차는 Table 1과 같이 주어진다.

2.3 위험도 분석

위험도 분석은 모델의 물리적 한계, 실측자료 오차 및 대표성, 매개변수 추정 등으로 나타나는 모델의 불확실성을 설명할 수 있다. 수질관리 측면에서 목표수질 달성의 성공 또는 실패 여부는 수질기준의 준수로 판단할 수 있으며, 계산치를 C (Computed concentration), 목표치를 S (Standard concentration)라 하면 계산치와 목표치의 비인 $W(C/S)$ 가 1보다 작으면 성공, 1보다 크면 실패로 정의할 수 있다. W 가 실패로 나타나는 위험도는 실패가 발생할 확률로 식 (4)와 같이 표현된다(Franceschini and Tsai, 2008).

$$P(W > 1) = \int_{w=1}^{+\infty} p(w)dw \tag{4}$$

여기서, $p(w)$ 는 W 의 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF)이다. 어느 지점의 목표수질이 설정되면 식 (4)로부터 목표수질 위반의 위험도를 파악할 수 있다.

3. Results and Discussion

3.1 수질 변화_시간 기준

Fig. 2는 이포지점에서 2003년 1월부터 2017년 12월까지 약 15년간 월평균 자료를 사용하여 시간변화에 따른 BOD, COD, TP 및 Chl-a를 나타낸 것으로 보 건설 전·후 수질변화 양상을 파악할 수 있다. 이포지점은 주간자료의 사용도 가능하나 월평균 자료의 사용만으로도 시간변화 양상을 명확히 파악할 수 있다. BOD는 보 건설 전에 미미하게 증가

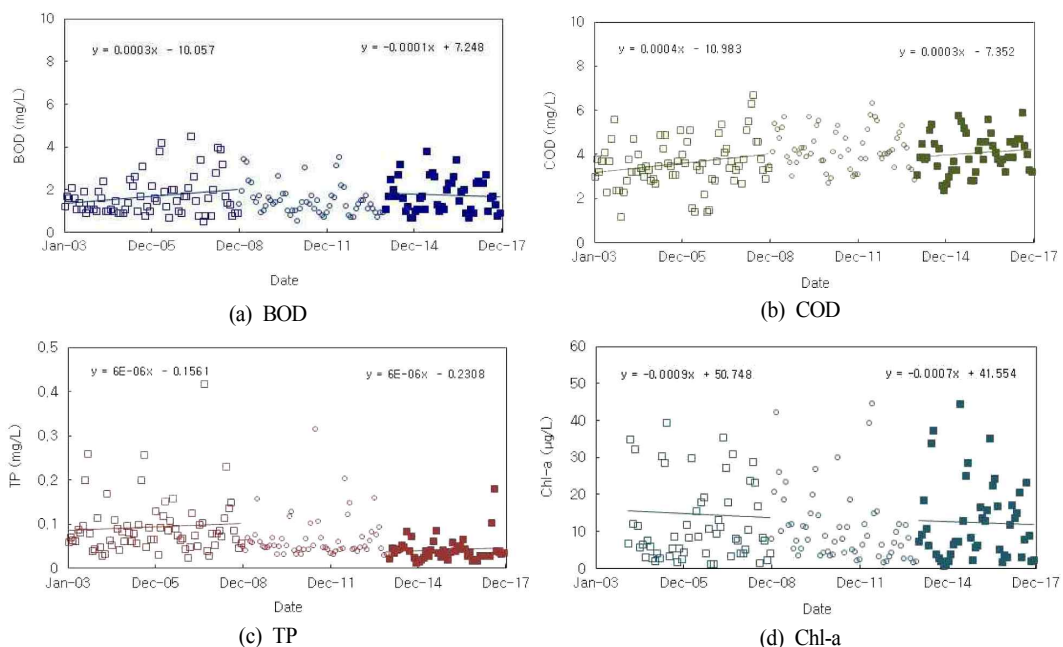


Fig. 2. Ipo water-quality constituents variation.

하나 건설 후 감소추세를 나타냄을 알 수 있으며 COD는 보 건설 전·후 모두 약간 증가하는 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. TP는 보 건설 전·후 모두 시간변화 양상이 미미하나 공공폐수처리시설 총인 방류수 수질기준이 강화된 4대강 사업이후에는 사업 전보다 개선되는 것을 알 수 있으며, Chl-a는 보 건설 전·후 모두 약하게나마 감소하는 추세를 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 3는 Fig. 2와 같이 강천지점에서 시간변화에 따른 BOD, COD, TP 및 Chl-a를 나타낸 것으로 BOD는 이포지점과 같이 보 건설 전에 미미하게 증가하나 건설 후 감소추세를 나타내며, COD도 보 건설 전·후 모두 약하게 증가하는 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. TP도 보 건설 전·후 시간변화 양상이 모두 미미하며, Chl-a는 보 건설 전·후 모두 약하게나마 증가하는 추세를 나타냄을 알 수 있다.

3.2 확률 분포

Fig. 4와 Fig. 5는 이포 및 강천 지점의 COD 실측자료와 대수정규 누적분포함수 곡선을 보 건설 전 2005년부터 2008년까지, 건설 후 2014년부터 2017년까지 각 4년간 월

평균 자료를 사용하여 나타낸 것으로 실측자료와 누적분포함수는 잘 적합하는 것을 알 수 있다. 월평균 자료의 사용은 보 건설 전·후 각각 48개가 확보됨으로 확률 분포의 유의성을 확보할 수 있을 것으로 판단한다. 각 지점에서 수질항목별 최대편차가 Table 2에 나타나 있으며, Table 3은 유의수준 0.2 및 0.05에서 Table 1의 한계편차를 고려하여 확률분포의 기각 또는 채택을 나타낸 것으로 대수정규분포는 유의수준 크기에 상관없이 수질항목 분포를 잘 나타내는 것을 알 수 있다. BOD, TP 및 Chl-a 실측자료 분포도 대수정규분포로 잘 나타나며 유의수준에 관계없이 대수정규분포를 채택할 수 있는 것으로 파악되었다.

3.2.1 분포 분석_이포

Fig. 6은 이포지점 BOD, COD, TP 및 Chl-a 수질항목의 이포보 건설 전·후 실측자료와 이를 적합하는 대수정규분포를 보여주고 있으며 Table 4는 적합한 대수정규분포의 각 수질항목별 평균 및 표준편차를 나타내고 있다. BOD, TP 및 Chl-a 분포 평균은 보 건설 전에 비하여 건설 후 감소하나 COD는 반대로 증가하며 4개 수질항목 모두 표준

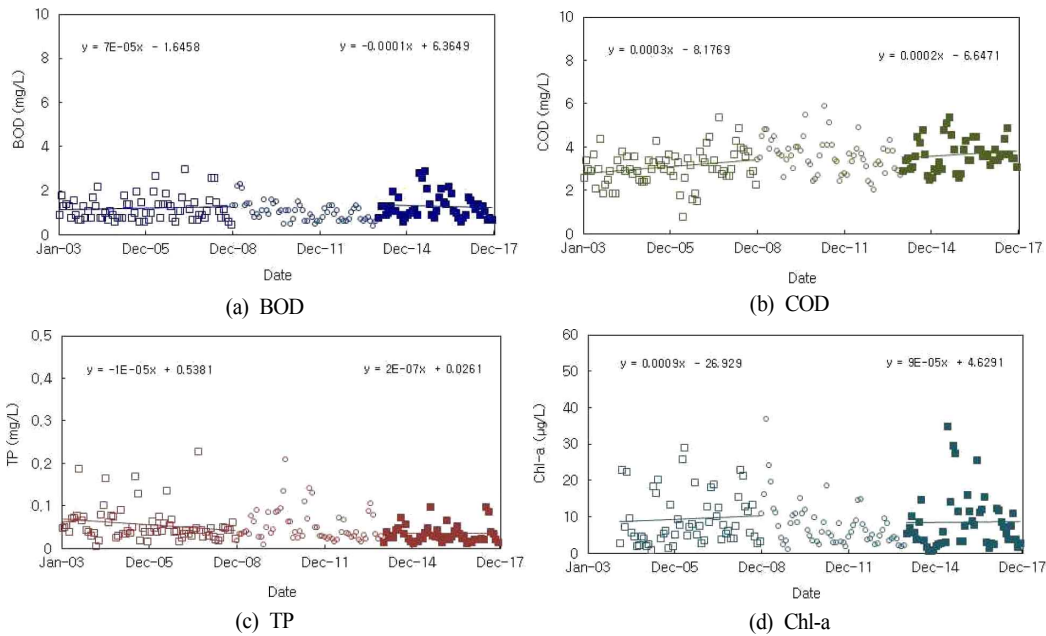


Fig. 3. Gangcheon water-quality constituents variation.

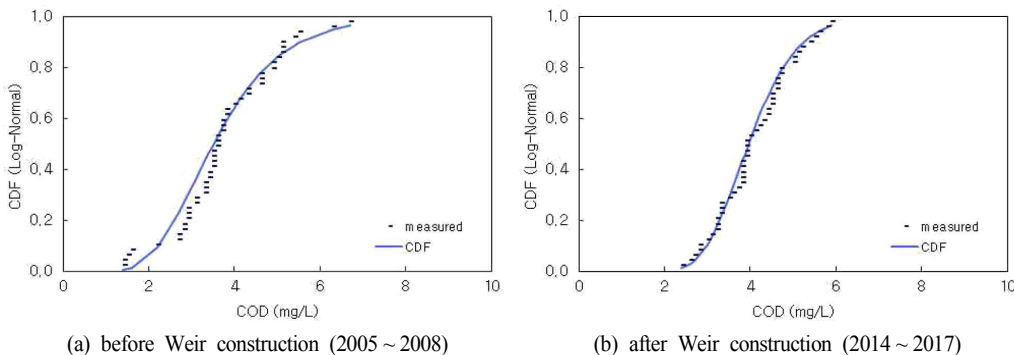


Fig. 4. Monitoring data and theoretical Cumulative Distribution Function of COD at Ipo.

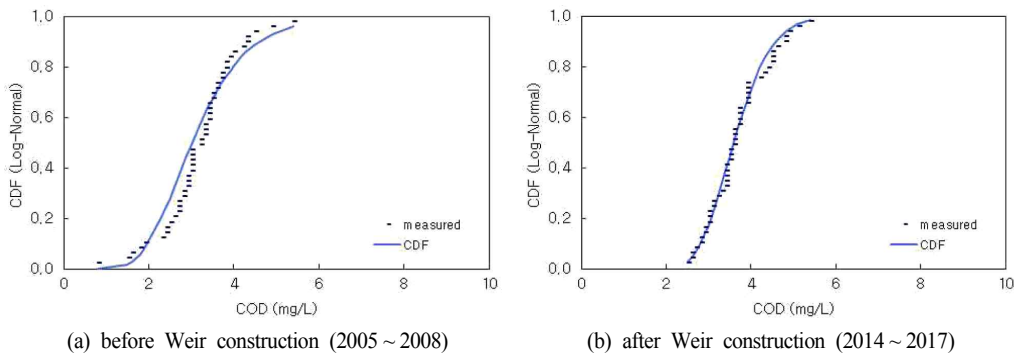


Fig. 5. Monitoring data and theoretical Cumulative Distribution Function of COD at Gangcheon.

Table 2. Maximum difference (D_{max}) of water-quality constituents (unit : mg/L)

Water-quality constituents	Ipo		Gangcheon	
	'05~'08	'14~'17	'05~'08	'14~'17
BOD	0.090	0.118	0.128	0.109
COD	0.121	0.077	0.141	0.073
TP	0.064	0.086	0.136	0.095
Chlorophyll-a	0.065	0.085	0.082	0.071

편차는 보 건설 전보다 건설 후 작아 최근 자료가 평균에 가깝게 분포함을 알 수 있다.

Table 5는 이포보 건설 전·후 COD 누적분포함수(Φ)에 해당하는 COD 값을 보여주고 있으며 Fig. 7은 이를 확률 밀도함수에 도시한 것으로 보 건설 전 자료는 분포평균에 분산하여 나타나나 건설 후 자료는 분포평균에 밀집하여

나타남을 알 수 있다.

3.2.2 분포 분석_강천

강천지점 BOD, COD, TP 및 Chl-a 수질항목의 강천보 건설 전·후 실측자료 및 대수정규분포는 이포지점과 같이 적합성이 확인되었으며 Table 6은 실측자료를 적합한 각 대수정규분포의 수질항목별 평균 및 표준편차를 나타내고 있다. TP 및 Chl-a 분포 평균은 이포지점과 같이 보 건설 전에 비하여 건설 후 감소하나 BOD 및 COD는 반대로 증가하며, BOD, COD 및 TP 표준편차는 이포지점과 같이 보 건설 전보다 건설 후 작아지나 Chl-a는 반대로 커지는 것으로 파악되었다.

Table 7은 강천보 건설 전·후 COD 누적분포함수(Φ)에 해당하는 COD 값을 보여주고 있으며 이포지점과 같이 보 건설 전 자료는 분포평균에 분산하여 나타나나 건설 후 자료는 분포평균에 밀집하여 나타남을 알 수 있다.

Table 3. Rejection and acceptance of probability distribution

Water-quality constituents	$\alpha = 0.2$				$\alpha = 0.05$			
	Ipo		Gangcheon		Ipo		Gangcheon	
	'05~'08	'14~'17	'05~'08	'14~'17	'05~'08	'14~'17	'05~'08	'14~'17
BOD	○	○	○	○	○	○	○	○
COD	○	○	○	○	○	○	○	○
TP	○	○	○	○	○	○	○	○
Chl-a	○	○	○	○	○	○	○	○

note) × : reject, ○ : accept

Table 4. Mean and standard deviation(s.d.) of the water-quality constituents at Ipo (unit : mg/L, μ g/L)

Period	BOD		COD		TP		Chl-a	
	mean	s.d.	mean	s.d.	mean	s.d.	mean	s.d.
2005~2008	1.858	1.101	3.750	1.374	0.097	0.058	15.082	21.566
2014~2017	1.759	0.855	4.064	0.912	0.042	0.023	13.414	17.506

Table 5. COD value of cumulative distribution function at Ipo (unit : mg/L)

Period	mean	Φ_{25}	Φ_{50}	Φ_{75}	Φ_{90}	Φ_{95}
2005~2008	3.750	2.771	3.521	4.473	5.549	6.313
2014~2017	4.064	3.415	3.966	4.605	5.269	5.711

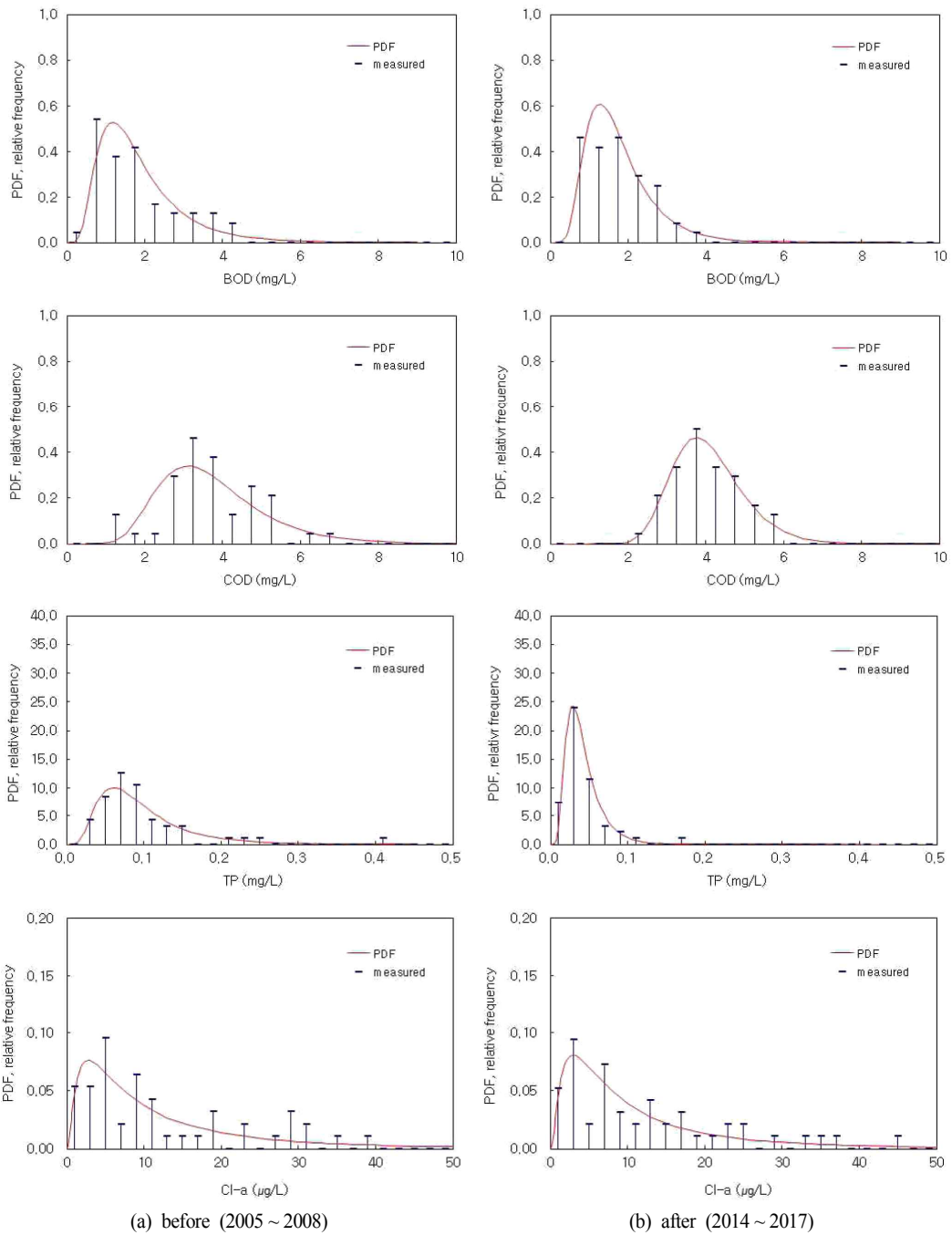


Fig. 6. Distribution of water-quality constituents before and after Ipo-Weir construction.

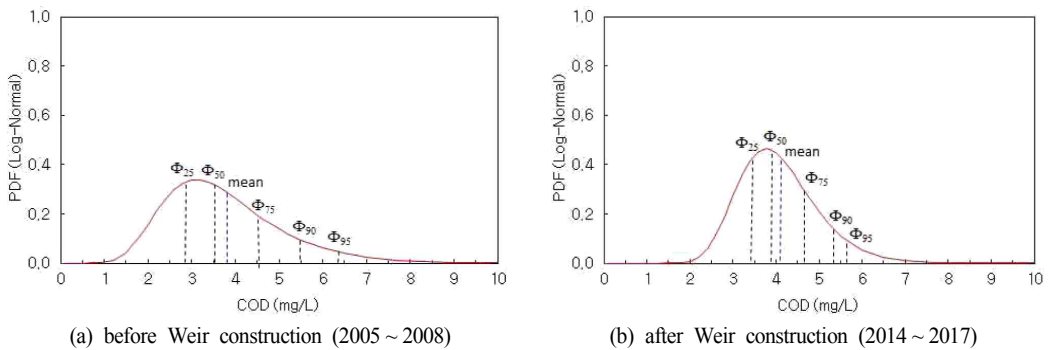


Fig. 7. COD probability distribution at Ipo.

Table 6. Mean and standard deviation of the water-quality constituents at Gangcheon (unit : mg/L, µg/L)

Period	BOD		COD		TP		Chl-a	
	mean	s.d.	mean	s.d.	mean	s.d.	mean	s.d.
2005 ~ 2008	1.246	0.581	3.190	1.074	0.051	0.030	10.133	9.499
2014 ~ 2017	1.293	0.535	3.661	0.707	0.034	0.019	8.954	10.430

Table 7. COD value of cumulative distribution function at Gangcheon (unit : mg/L)

Period	mean	Φ_{25}	Φ_{50}	Φ_{75}	Φ_{90}	Φ_{95}
2005 ~ 2008	3.190	2.424	3.023	3.771	4.601	5.182
2014 ~ 2017	3.661	3.160	3.595	4.090	4.593	4.924

Table 8. Null hypothesis test with significance level $\alpha = 0.05$

Water-quality constituents	Ipo	Gangcheon
BOD	○	○
COD	×	×
TP	×	×
Chl-a	○	○

note) × : reject, ○ : accept

3.2.3 보 건설 전·후 평균 차의 검정

보 건설 전·후 BOD, COD, TP 및 Chl-a 수질항목의 평균의 차이가 존재하는지, 존재하지 않는지 파악하기 위하여 차이가 없음을 귀무가설로, 차이가 있음을 대립가설로 유의수준 0.05에서 가설검정을 실시하였으며 결과가 Table 8에 나타나 있다. 이로부터 BOD 및 Chl-a는 5% 위험하에서 보 건설 전·후 평균농도의 증감은 있지만 유의한 차이가 없는 것으로 즉, 보 건설 전·후 평균이 동일한 의미인 것으로 나타났으며, COD 및 TP는 유의한 차이가 있는 것으로 파악되었다.

Table 9. Risk of COD water-quality grade violation at Ipo (unit : %)

Period	COD grade		
	$\geq II$	$\geq III$	$\geq IV$
2005 ~ 2008	36.0	16.2	2.6
2014 ~ 2017	48.5	14.8	0.5

3.3 위험도

3.3.1 위험도 분석_이포

이포보 건설 전·후 COD 수질항목 수질등급 위반 위험도가 Table 9에 나타나 있으며 Fig. 8에 도시되어 있다(2015년 12월 31일까지 적용된 COD기준 적용). 보 건설 전 수질기준 II등급 이상 위험도는 36.0%에서 건설 후 48.5%로 증가하나 수질기준 III등급 이상 위험도는 16.2%에서 건설 후 14.8%로 감소하며 수질기준 IV등급 이상 위험도도 III등급 이상 위험도와 비슷하게 보 건설 전에 비하여 건설 후 감소하는 경향을 나타낸다.

Table 10에는 COD와 같이 BOD, TP 및 Chl-a 수질등급 위반 위험도가 나타나 있다. BOD, TP 및 Chl-a 모두 수질

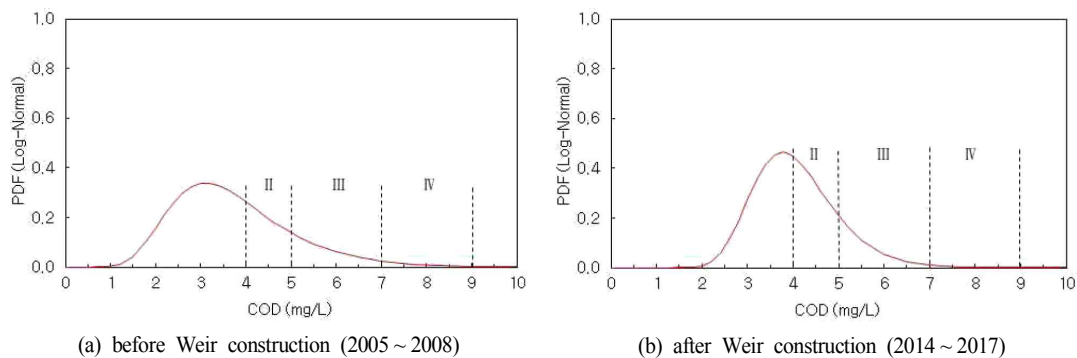


Fig. 8. Risk analysis of COD at Ipo.

Table 10. Risk of BOD, TP and Chl-a water-quality grade violation at Ipo (unit : %)

Period	BOD grade			TP grade			Chl-a grade		
	$\geq II$	$\geq III$	$\geq IV$	$\geq II$	$\geq III$	$\geq IV$	$\geq II$	$\geq III$	$\geq IV$
2005 ~ 2008	34.2	12.6	1.9	90.6	36.9	5.7	48.5	32.4	21.3
2014 ~ 2017	30.5	8.2	0.6	44.2	2.4	0.0	46.1	29.4	18.4

Table 11. Risk of COD water-quality grade violation at Gangcheon (unit : %)

Period	COD grade		
	≥ II	≥ III	≥ IV
2005 ~ 2008	19.6	6.2	0.5
2014 ~ 2017	28.8	4.2	0.0

Table 12. Risk of BOD, TP and Chl-a water-quality grade violation at Gangcheon (unit : %)

Period	BOD grade			TP grade			Chl-a grade		
	≥ II	≥ III	≥ IV	≥ II	≥ III	≥ IV	≥ II	≥ III	≥ IV
2005 ~ 2008	9.9	1.4	0.0	57.0	6.7	0.3	40.2	21.1	10.5
2014 ~ 2017	9.7	1.0	0.0	29.1	1.0	0.0	32.0	17.2	9.2

등급 위반 위험도가 보 건설 전에 비하여 건설 후 감소하는 것을 알 수 있으며 Chl-a는 하천 수질등급이 설정되어 있지 않아 호소 수질등급을 적용한 결과이다.

3.3.2 위험도 분석_강천

강천보 건설 전·후 COD 수질항목 수질등급 위반 위험도가 Table 11에 나타나 있으며 이포보와 같이 보 건설 전 수질기준 II등급 이상 위험도는 19.6%에서 건설 후 28.8%로 증가하나 수질기준 III등급 이상 위험도는 6.2%에서 건설 후 4.2%로 감소하며 수질기준 IV등급 이상 위험도도 III등급 이상 위험도와 비슷하게 보 건설 전에 비하여 건설 후 감소하는 경향을 나타낸다.

Table 12에는 COD와 같이 BOD, TP 및 Chl-a 수질등급 위반 위험도가 나타나 있다. BOD, TP 및 Chl-a 모두 수질등급 위반 위험도가 보 건설 전에 비하여 건설 후 감소하는 것을 알 수 있다.

4. Conclusions

보 건설 전 4년(2005년~2008년)과 건설 후 4년(2014년~2017년) 동안 주요 수질항목 BOD, COD, TP 및 Chl-a의 WEIS 수질자료를 비교·분석하였으며 결과는 다음과 같다.

1) 보 건설 전·후 4년간 수질자료는 Kolmogorov-Smirnov의 확률분포 적합도 검정을 통하여 대수정규분포에 잘 적합하는 것으로 파악되었다.

2) 확률분포 평균을 통하여 보 건설 전·후 각 수질항목의 변화를 파악하였다. 이포지점 BOD, TP 및 Chl-a 농도는 보 건설 전 1.858 mg/L, 0.097 mg/L 및 15.082 µg/L에서 건설 후 1.759 mg/L, 0.042 mg/L 및 13.414 µg/L로 감소하나 COD는 3.750 mg/L에서 4.064 mg/L로 증가하는 것으로 파악되었다. 강천지점 TP 및 Chl-a 농도는 보 건설 전 0.051 mg/L 및 10.133 µg/L에서 건설 후 0.034 mg/L 및 8.954 µg/L로 감소하며 BOD는 1.246 mg/L에서 1.293 mg/L로 COD는

3.190 mg/L에서 3.661 mg/L로 증가하는 것으로 파악되었다.

3) 이포지점 COD, BOD, TP 및 Chl-a 표준편차는 보 건설 전보다 건설 후 모두 작아 건설 후 자료가 평균에 가깝게 분포하는 특성을 나타냈다. 강천지점 BOD, COD 및 TP 표준편차는 이포지점과 같이 보 건설 전보다 건설 후 작아 지나 Chl-a는 반대로 커지는 것으로 파악되었다.

4) 보 건설 전·후 수질항목 평균 차의 유의성 검정을 실시하였다. 이포 및 강천지점 모두 BOD 및 Chl-a는 유의수준 5%에서 보 건설 전·후 평균농도의 변화가 없는 것으로 나타났으며, COD는 보 건설 후 악화되고, TP는 개선되는 것으로 파악되었다.

5) 수질항목의 대수정규분포 분석을 통하여 목표수질 위반의 위험도를 파악하였다. 이포지점 BOD, TP 및 Chl-a 수질기준 II등급 이상 위반 위험도는 보 건설 전 34.2%, 90.6% 및 48.5%에서 건설 후 30.5%, 44.2% 및 46.1%로 낮아지나 COD는 36.0%에서 48.5%로 높아지는 것으로 파악되었다. 그러나 COD의 경우 수질기준 III 및 IV등급 이상 위반 위험도는 수질기준 II등급 이상 위험도와 다르게 보 건설 전보다 건설 후 낮아지는 것으로 나타났다. 강천지점 BOD, TP 및 Chl-a 수질기준 II등급 이상 위험도는 보 건설 전 9.9%, 57.0% 및 40.2%에서 건설 후 9.7%, 29.1% 및 32.0%로 낮아지며 COD는 이포보와 비슷하게 19.6%에서 28.8%로 높아지는 것으로 파악되었다.

6) 보 건설에 따른 수질변화는 수질항목에 따라 악화되거나 개선되어 한마디로 좋아진다, 나빠진다 결론 내리기가 쉽지 않음을 알 수 있다. 그러나 관심 수질항목은 실측자료의 분포분석을 통하여 평균, 자료의 분포 및 수질등급 위반 위험도 등을 세밀하게 파악할 수 있어 하천 수질관리의 수월성을 확보할 수 있다.

References

- 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, 293-296.
- Chang, K. Y., Hong, K. O., and Pak, S. I. (2007). Bootstrap simulation for quantification of uncertainty in risk assessment, *Journal of Veterinary Science*, 47(2), 259-263.
- Chapra, S. C. (1997). *Surface water-quality modeling*, McGraw-Hill, New York, 317-341.
- Di Toro, D. M. (1984). Probability model of stream quality due to runoff, *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, 110(3), 607-628.
- Efron, B. (1979). Bootstrap method: Another look at the jackknife, *The annuals of statistics*, Institute of Mathematical Statistics, 7(1), 1-26.
- Franceschini, S. and Tsai, C. W. (2008). Incorporating reliability into the definition of the margin of safety in total maximum daily load calculation, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 134(1), 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), 695-708.
- Jhun, M. (1990). A computer intensive method for modern statistical data analysis I; bootstrap method and its applications, *Journal of the Korean Statistical Society*, 3(1), 121-141. [Korean Literature]
- Kim, K. S. (2010). Analysis of BOD mean concentration and confidence interval using bootstrap technique, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 26(2), 297-302. [Korean Literature]
- Kim, K. S. and Ahn, T. (2010). Characteristics of probability distribution of BOD concentration in Anseong stream watershed, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 25(3), 425-431. [Korean Literature]
- Kim, K. S., Kim, B., and Kim, J. H. (2002). Robust measures of location in water-quality data, *Water Engineering Research*, 3(3), 195-202.
- Li, K. S. (1992). Point-estimate method for calculating statistical moments, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 118(7), 1506-1511.
- Manly, B. F. J. (2006). *Randomization, bootstrap and monte carlo methods in biology*, Chapman & Hall/CRC, Florida.
- 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), 105-113.
- Ministry of Environment (ME). (2018). *Water Environment Information System (WEIS)*, <http://water.nier.go.kr> (accessed Aug. 2018).
- Novotny, V. (2004). Simplified databased total maximum daily loads, or the world is log-normal, *Journal of Environmental Engineering*, 130(6), 674-683.
- 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), 250-268.
- Schwarz, G. E., Hoos, A. B., Alexander, R. B., and Smith, R. A. (2006). *The SPARROW surface water-quality model: theory, application and user documentation*, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- Tsai, C. W. and Franceschini, S. (2005). Evaluation of probabilistic point estimate methods in uncertainty analysis for environmental engineering application, *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, 131(3), 387-395.
- Tung, Y. K. and Hathhorn, W. E. (1988). Assessment of probability distribution of dissolved oxygen deficit, *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, 114(6), 1421-1435.