

환경기초시설의 인 기준 강화에 따른  
팔당호 유입 수계의 수질개선 효과분석

Study on the Improvement of Water Quality by the  
strengthening of T-P effluent standard for  
Environmental Facilities in Paldang Basin

정 원 구\*      한 영 한\*\*      임 재 명\*\*\*  
Jeong, Won-Gu      Han, Young-Han      Rim, Jay-Myung

Abstract

The influences on water quality of each river by effluents from environmental facilities located\* in 14 unit watersheds of North- and South-Han River, and Gyungan-cheon were analyzed. Also, the water quality modeling for study area was carried out to analyze the improvement effect of water quality by the strengthening of T-P effluent standard of environmental facilities.

For the calibration and verification of model, water quality data and effluent loading calculated for 2006 were used. Data of low water period were used for calibration, and normal water period for verification. The results of calibration and verification were well matched with the real water quality dataset of revers. Also, the validity of the results were estimated using RI(Reliability Index) method.

When the T-P effluent standards for environmental facilities were strengthened, T-P concentrations were predicted to improve from 0.025mg/l to 0.023mg/l in the outlet location of North-Han River, from 0.056mg/l to 0.040mg/l for South-Han River, and from 0.233mg/l to 0.146mg/l for Gyungan-cheon. Also, the T-P concentrations of tributaries including Jojong-cheon, Dal-cheong, Sumgang, Chungmi-cheon, Bokha-cheon, Heuk-cheon, and Wonju-cheon were predicted to improve from 0.063mg/l to 0.010mg/l, from 0.091mg/l to 0.053mg/l, from 0.199mg/l to 0.100mg/l, from 0.168mg/l to 0.148mg/l, from 0.186mg/l to 0.105mg/l, from 0.019mg/l to 0.013mg/l, and from 0.822mg/l to 0.236mg/l, respectively.

키워드 : *Qualko2* 모델, 팔당호, 환경기초시설, 방류수 총인 기준 강화, 수질개선

Keywords : *Qualko2* model, Paldang basin, Environmental facilities, Strengthening of T-P effluent standard, Improvement of water quality

1. 서론

우리나라는 1996년 이후 하천 및 호소의 부영양화를 야기시키는 질소, 인 등의 영양염류를 제거하

기 위하여 환경기초시설의 방류수 수질기준을 설정함으로써 신규 하수종말처리장 및 기존에 운영 중인 하수종말처리장에 생물학적 영양염류 제거공정(BNR)을 도입하였고, 또한 팔당 상류지역에 시설 용량 457,825m<sup>3</sup>/d의 환경기초시설 134개소가 가동되고 있다. 이 중 약 56%가 활성슬러지 공법에 의해 처리되고 있으며, 44%가 생물학적 영양염류 처리공법(BNR)으로 운영되고 있다[7]. 이와 같이 환경기초시설의 수질관리를 강화하여 공공수역의

\* 강원대학교 환경공학과 박사과정

\*\* 강원발전연구원, 공학박사

\*\*\* 강원대학교 환경공학과 교수, 공학박사, 교신저자

수질을 개선시키기 위한 많은 노력에도 불구하고 하천의 목표수질을 달성하지 못하고 있다.

공공수역의 수질변화 추이를 파악하기 위해 운영 중인 환경부 수질측정망 자료에 의하면 지난 10년간 팔당호(팔당댐 2)의 수질은 TP 0.049mg/L로 호소 수질환경기준 I<sub>a</sub>등급인 0.01mg/L에 비하면 매우 높은 III등급(TP기준)의 수질을 나타내고 있으며[3], 이는 OECD 영양단계기준에서 부영양(0.1~0.035mg/L)단계에 해당된다[9]. 이러한 결과로 조류예보제 시행 이래 전국적으로 조류 발생일수는 감소하고 있으나, 팔당호의 경우 2008년 조류 발생일수가 36일로 가장 많은 조류가 발생하고 있는 실정이다[6].

우리나라는 종전에 유기물 제거 목적인 생물학적 처리공정 중심으로 관리하였으나, 난분해성 유기물질 생성의 주요인자인 총인의 체계적인 관리가 상대적으로 미흡하여 공공수역의 부영양화가 심화됨에 따라 2012년부터 공공하수처리시설(1일하수처리용량 500m<sup>3</sup>이상)의 총인 방류수 수질기준을 4개 지역으로 구분하여 I지역에 0.2mg/L, II지역에 0.3mg/L, III지역에 0.5mg/L, 기타지역에 2.0mg/L이하로 처리하도록 하수도법을 강화하였다[8]. 또한, 2012년부터 시행되는 방류수 수질기준을 달성하기 위하여 방류수역에 부영양화로 인한 조류 발생을 억제시키기 위해 환경기초시설 및 대규모 배출원의 인 저감 처리시설에 대한 단계적 공정 도입을 추진하고 있다.

따라서 본 연구에서는 환경기초시설 방류수의 총인기준을 강화시켰을 경우 팔당호의 분류 및 지류하천에 대한 수계별 수질개선 효과를 예측 및 평가하여, 팔당호 유역의 효율적인 하천관리방안을 마련하기 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 모델링의 시·공간적 범위

환경기초시설의 방류수가 저수기일 때 방류수역에 미치는 영향에 대한 수질개선 효과분석을 위하여 2009년도 한강수계 환경기초조사사업에서 수행된 QUALKO2 모델을 인용하여 시·공간적 기준 및 범위를 설정하였다[1][2]. 수질 및 유량자료는 2006년도 단위유역별 측정결과 중에서 수질오염 총량 관리제에서 제시한 저수기 및 평수기의 수질 및 유량을 사용하였으며, 저수기의 자료를 이용하여 모델의 보정을 수행하였다[4][5]. 또한 방류수역에 대한 수질개선의 효율적인 효과분석을 위해 팔당호 상류수계의 환경기초시설 중 처리용량이 6,000m<sup>3</sup>/d이상인 시설을 대상으로 2008년~2009년 동안 현장에서 직접 측정된 저수기의 수질 및 유량자료를 적용하였다.

모델링 구간을 Fig.1에 나타내었다. 주요 하수종

말처리장, 분뇨처리장, 축산폐수처리장 및 산업폐수처리장 등 환경기초시설의 방류수가 방류수역의 수질에 미치는 영향을 분석할 수 있도록 모델링 구간을 검토하였으며, 팔당호 상류수계인 남한강은 충주댐 방류지점, 북한강은 청평댐 방류지점, 경안천은 최상류 지점으로부터 팔당호 유입지점까지를 모델링 구간으로 설정하였다.



Fig. 1. Map of study area

### 2.2. 수질모델 선정 및 구축

본 연구에서는 2009년도 한강수계 환경기초조사사업에서 방류수 수질 개선에 따른 방류수역의 효과분석을 위해 수행되었던 QUALKO2모델을 인용하여 적용하였으며[2], 점오염원의 영향을 효율적으로 분석할 수 있는 모델 구축을 위하여 Table 1에 나타난 바와 같이 각 element의 크기는 500m로 설정하였다. 팔당호 상류 본류수계 중 북한강의 모델링 구간은 총 55km이며, Reach수는 8개이고, 점오염원의 수는 15개로 구성되었다. 경안천은 총 35.5km의 모델링 구간을 설정하여 Reach 5개, 점오염원은 13개로 구성되었다. 또한 남한강은 총 352km 구간의 하천에 대하여 모델링 구간을 설정하였으며, Reach 수는 51개, 그리고 수계내 위치하고 있는 점오염원의 수는 85개로 구성되었다.

### 2.3. 수리계수 및 유달계수 평가

#### (1) 수리계수

QUALKO2 모형에서는 식 (1) 및 (2)에 나타낸 바와 같이 각 하천 구간별 유속과 수심에 대한 수리계수(속도계수, 속도지수, 수심계수, 수심지수)가 요구된다. 대상하천에 대한 자료 확보가 어려운 경우 효율적인 자료 활용을 위해 수질오염총량관리

Table 1. The result of segmentations in the Pal-Dang watershed[2]

Basin	Watershed		Distance (km)	Reach Number	Element Number	Point source
North-Han river	Main watershed		23	4	46	10
	Sub stream	Jo-Jong cheon	32	4	64	5
	Sum		55	8	110	15
South-Han river	Main watershed		104	18	208	26
	Sub stream	Dal cheon	81	10	162	19
		Sum gang	57	7	114	15
		Won-Ju cheon	7.5	1	15	3
		Cheong-Mi cheon	46.5	7	93	9
		Yang-Hwa cheon	16	3	32	2
		Bok-Ha cheon	20	3	40	7
	Heuk cheon	20	2	40	4	
Sum		352	51	704	85	
Gyung-An cheon	Main watershed		35.5	5	71	13
	Sum		35.5	5	71	13
Total sum			443.5	64	889	114

제 및 물환경관리계획 등 기연구사례를 통해 구축된 수질 및 수리모델 자료를 최대한 활용하여 각 구간(Reach)별 수리계수로 이용하였다.

$$U = \alpha Q^b \quad (1)$$

$$H = \alpha Q^d \quad (2)$$

(2) 유달계수

본 연구에서 사용된 유달율은 식 (3)과 식 (4)에 나타낸 바와 같이 일반적으로 실측된 자료가 있는 유역의 연평균 배출부하량과 실측 오염부하량을 이용하여 유달율을 산정하였고, 또한 수질오염총량 관리제에서 단위유역별 유달율을 추정하기 위하여 사용되고 있는 실측된 소유역별 유달율과 회귀식을 이용하여 소유역 면적 및 유량조건별 유달율을 사용하였다.

$$R = \frac{L_D}{L_i} \quad (3)$$

여기서, R은 오염부하유달율,  $L_D$ 는 실측 오염부하량 그리고  $L_i$ 는 유역의 연평균 배출부하량이다.

$$R_1, R_2, R_3 \dots \Rightarrow R_j = a \left( \frac{Q}{A} \right)^b \quad (4)$$

여기서,  $R_j = L_D/L$  ( $j$  : 실측부하량 측정횟수)이다. 또한 환경물환경연구소에서 단위유역별로 실측된 2006년 유량 및 수질자료를 활용하였으며, 각 측정일에 대한 대상 단위유역별 BOD, T-N 및 T-P의 유달부하량은 식 (5)를 이용하여 산정하였다.

$$L = a \cdot Q^b \quad (5)$$

여기서 Q는 유량, L은 물질부하량, a, b는 상수이다.

2.4. 오염부하량 산정

수질모델링을 수행하기 위한 입력자료의 하나인

오염부하량은 수계오염총량관리 기술지침 개정(2008)에 따라 북한강 1개, 남한강 11개, 경안천 2개 등 총 14개 단위유역을 대상으로 산정하였다. 발생부하량 산정시 적용하는 발생원단위는 실측자료를 우선으로 하되 실측자료가 없는 경우 수계오염총량관리기술지침에서 제시하는 발생원단위를 적용하였다. 시군의 오염물질 발생 및 배출부하량은 각 오염원별 오염원 현황에 수계오염총량관리지침 상의 각 오염원별 발생부하량 산정방식 등의 자료를 이용하여 산정하였다. 오염물질 배출부하량은 배출유량과 배출부하량으로 구분하여 배출유형별로 산정하였으며, 배출부하량 산정시 수계오염총량관리지침에서 제시하는 원단위를 사용하였다[4].

2.5. 수계별 환경기초시설 배출부하량

수계별 수질개선 효과를 분석하기 위하여 북한강, 남한강, 경안천의 3개 분류 수계와 조종천, 달천, 섬강, 청미천, 양화천, 북하천, 흑천, 원주천 등 8개 주요 수계에 대한 분석을 수행하였으며, 대상 수계내 환경기초시설의 배출부하량은 환경부의 전국오염원조사자료를 이용하여 2006년도 저수기일 때 시설별 부하량 자료와 2008년~2009년 동안 저수기일 때 북한강 3지점(청평, 화도1,2), 남한강 7지점(충주, 횡성, 원주, 문막, 여주, 이천, 양평), 경안천 4개 지점(용인, 곤지암, 광주, 경안)에 대하여 실측한 수질 및 유량자료를 비교·평가하여 활용하였다.

2.6. 모델보정 및 검증

모델보정은 2006년을 기준으로 산출된 배출부하량 및 수질자료를 이용하여 유달율을 산출하였고, 모델내에 입력되는 각 점오염원별 입력농도를 산정하여 모델 보정을 수행하였다. 모델보정 지점별

로 실측치와 모델값의 오차범위가 ±10%이내로 보정기준을 정하였다. 모델 보정결과에 대한 신뢰성 분석은 식 (6)에 나타난 바와 같이 주로 이용되는 신뢰도 지수(Reliability Index, RI)에 의한 평가방법을 적용하였다.

$$RI = \frac{1 + \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \frac{[1 - Y_{tn}/X_{tn}]^2}{[1 + Y_{tn}/X_{tn}]^2}}}{1 - \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \frac{[1 - Y_{tn}/X_{tn}]^2}{[1 + Y_{tn}/X_{tn}]^2}}} \quad (6)$$

여기서  $Y_{tn}$ 은 실측자료이며,  $X_{tn}$ 은 모델자료,  $T$ 는 측정기간의 횟수 그리고  $N$ 은 ( $X, Y$ )조의 수이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 수질모델 구축 및 보정·검증

##### (1) 대상수계내 오염부하량 및 환경기초시설의 배출부하량 산정

팔당호 상류 수계에 대하여 오염원별 발생부하량 및 배출부하량을 산정한 결과는 Table 2에 나타난 바와 같이, T-P 발생부하량은 축산계가 전체의 81.9%로 가장 많이 발생되는 것으로 나타났으며, 그 밖에 생활계 7.1%, 토지계 5.9%, 산업계 5.0% 순으로 발생되는 것으로 분석되었다. 또한 오염원별 T-P 배출부하량은 토지계, 축산계, 생활계, 산업계, 양식계, 매립계 순으로 나타났으며, 토지계가 차지하고 있는 비율이 전체 T-P 배출부하량의 46.2%인 것으로 조사되었다. 또한 BOD와 T-N의 경우에도 토지계에서 가장 높은 배출부하량을 나타내었다. 다음으로 축산계는 전체 오염원 중 38.5%를 차지하였으며, 이는 발생부하량 대비 10.1%가 배출되는 것으로서 이는 축산분뇨의 자원 화율이 높기 때문으로 판단된다.

팔당호 상류 수계의 수질개선효과를 분석하기 위하여 연구대상 범위에 위치한 환경기초시설의 분포와 배출부하량을 조사한 결과는 Table 3에 나타내었다. 연구대상 범위내의 환경기초시설은 유역

면적이 가장 넓은 남한강 유역에 28개소로 가장 많이 분포하고 있으며, 북한강 유역 9개소, 경안천 유역 8개소, 팔당호 유역 9개소가 각각 분포하는 것으로 조사되었다. 본 연구대상 유역 내 산정된 환경기초시설의 배출부하량은 총인의 경우 북한강 22.55kg/d, 남한강 344.95kg/d, 경안천 82.56kg/d로 남한강 유역의 배출량이 가장 높았으며, 남한강유역 내 소유역 중에서는 섬강유역의 환경기초시설 배출부하량이 205.41kg/d로, 가장 많은 배출부하량을 나타내는 것으로 조사되었다.

##### (2) 수리계수 및 유달부하량 분석

본 연구에서는 북한강, 남한강, 경안천유역의 각 하천 구간별 유속과 수심에 대해 적용된 수리계수는 Table 4에 나타난 바와 같이 남한강의 경우 속도계수(a)는 0.0004~0.8114, 속도지수(b)는 0.0507~0.99, 수심계수(c)는 0.0693~6.1178, 수심지수(d)는 0.0000~0.6723로 가장 넓은 분포를 나타내는 것으로 분석되었다. 또한 각 단위유역별로 실측 및 검토했던 유량 및 유달부하량을 이용하여 유량-유달부하량의 회귀식을 분석한 결과는 Table 5에 나타난 바와 같이 상관계수  $R^2$ 은 BOD의 경우 0.38~0.78, T-N은 0.44~0.95, T-P는 0.35~0.94의 분포를 나타냈다.

유량-유달부하량의 회귀식을 활용하여 각 단위유역별로 저수기 및 평수기의 기준유량시기에 해당하는 유달율은 Table 6에 나타난 바와 같이 분석하였으며, T-P의 경우 연구대상 단위유역 중 섬강B유역의 유달율이 저수기일 때 0.262, 평수기일 때 0.348로 가장 높은 것으로 분석되었다.

##### (3) 보정 및 검증에 적용된 수질자료

수질보정 및 검증자료를 선정하기 위하여 Table 7에 나타난 바와 같이 환경부 측정망 자료를 이용하여 단위유역별 기준유량 및 수질자료를 비교 분석한 결과 모델링 구간에 해당하는 측정망의 수질자료 중 3월 및 4월의 수질이 저수기의 수질을 보이는 것으로 판단되어 이들의 평균값을 저수기의 보정자료로 활용하였으며, 평수기에 대한 수질자료로는 9월의 측정값을 활용하였다.

Table 2. The generation & discharge loading by the source[2]

Source	Generation loading			Discharge loading		
	BOD(%)	T-N(%)	T-P(%)	BOD(%)	T-N(%)	T-P(%)
Living system	93,523.4(17.2)	23,154.1(15.8)	2,559.4(7.1)	19,276.4(14.5)	10,549.3(13.1)	1,011.9(12.9)
Livestock system	321,554.6(59.3)	77,804.5(53.1)	29,708.7(81.9)	34,570.2(26.0)	20,204.0(25.0)	3,023.3(38.5)
Industry system	82,633.1(15.2)	17,978.4(12.3)	1,824.2(5.0)	4,067.0(3.1)	3,886.1(4.8)	140.5(1.8)
Land system	43,984.7(8.1)	27,212.7(18.6)	2,149.6(5.9)	74,108.2(55.8)	45,887.2(56.9)	3,627.0(46.2)
Landfill system	66.4(0.0)	151.9(0.1)	1.3(0.0)	0.6(0.0)	1.9(0.0)	0.0(0.0)
Farm system	826.1(0.2)	155.9(0.1)	44.8(0.1)	831.6(0.6)	157.0(0.2)	44.6(0.6)
Sum	542,588.3	146,457.5	36,288	132,854.0	80,685.5	7,847.3

산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제30권 B호, 2010.

환경기초시설의 인 기준 강화에 따른 팔당호 유입 수계의 수질개선 효과분석

Table 4. The range of the hydraulic coefficient applied for model[2]

Basin	Reach Number	a	b	c	d
North-Han river	8	0.1541~0.3195	0.2868~0.5016	0.1014~0.4921	0.3550~0.5201
South-Han river	51	0.0004~0.8114	0.0507~0.99	0.0693~6.1178	0.0000~0.6723
Gyung-An cheon	5	0.0021~0.3759	0.2204~0.8625	0.0160~0.8057	0.171~0.6078

Table 5. Relationship between flow rate and delivered loading for each watershed[2]

Watershed	BOD	T-N	T-P	Watershed	BOD	T-N	T-P
Gyun -An A	Relation L=485.03Q <sup>0.75</sup> R <sup>2</sup> 0.59 b 0.75	L=919.59Q <sup>0.69</sup> 0.77 0.69	L=52.43Q <sup>0.67</sup> 0.60 0.67	Yang -Hwa A	Relation L=158.91Q <sup>1.09</sup> R <sup>2</sup> 0.59 b 1.09	L=287.66Q <sup>1.03</sup> 0.83 1.03	L=11.51Q <sup>1.18</sup> 0.84 1.18
Gyun -An B	Relation L=384.34Q <sup>0.84</sup> R <sup>2</sup> 0.38 b 0.84	L=413.32Q <sup>0.89</sup> 0.75 0.89	L=20.22Q <sup>0.86</sup> 0.35 0.86	Jo -Jong A	Relation L=77.78Q <sup>0.95</sup> R <sup>2</sup> 0.64 b 0.95	L=200.16Q <sup>1.04</sup> 0.88 1.04	L=1.22Q <sup>1.54</sup> 0.85 1.54
Dal cheon n A	Relation L=92.68Q <sup>0.96</sup> R <sup>2</sup> 0.75 b 0.96	L=109.38Q <sup>1.15</sup> 0.92 1.15	L=0.66Q <sup>1.58</sup> 0.85 1.58	Cheong -Mi A	Relation L=211.56Q <sup>0.94</sup> R <sup>2</sup> 0.53 b 0.94	L=236.38Q <sup>1.08</sup> 0.82 1.08	L=6.72Q <sup>1.24</sup> 0.83 1.24
Dal cheon n B	Relation L=90.83Q <sup>1.94</sup> R <sup>2</sup> 0.54 b 1.94	L=468.24Q <sup>0.86</sup> 0.44 0.86	L=14.84Q <sup>1.25</sup> 0.41 1.25	Heuk A	Relation L=90.00Q <sup>0.85</sup> R <sup>2</sup> 0.57 b 0.85	L=160.18Q <sup>1.12</sup> 0.92 1.12	L=1.45Q <sup>1.40</sup> 0.79 1.40
Bok -Ha A	Relation L=269.61Q <sup>0.73</sup> R <sup>2</sup> 0.54 b 0.73	L=592.54Q <sup>0.83</sup> 0.85 0.83	L=27.16Q <sup>0.92</sup> 0.88 0.92	Han river D	Relation L=216.06Q <sup>0.80</sup> R <sup>2</sup> 0.53 b 0.80	L=174.47Q <sup>1.00</sup> 0.95 1.00	L=0.08Q <sup>1.70</sup> 0.88 1.70
Sum gang A	Relation L=105.50Q <sup>0.90</sup> R <sup>2</sup> 0.78 b 0.90	L=164.64Q <sup>1.00</sup> 0.93 1.00	L=1.69Q <sup>1.27</sup> 0.92 1.27	Han river E	Relation L=239.74Q <sup>0.84</sup> R <sup>2</sup> 0.52 b 0.84	L=287.54Q <sup>0.94</sup> 0.82 0.94	L=0.31Q <sup>1.55</sup> 0.81 1.55
Sum gang B	Relation L=204.36Q <sup>0.85</sup> R <sup>2</sup> 0.55 b 0.85	L=662.78Q <sup>0.72</sup> 0.84 0.72	L=44.58Q <sup>0.64</sup> 0.67 0.64	Han river F	Relation L=259.50Q <sup>0.85</sup> R <sup>2</sup> 0.66 b 0.85	L=192.16Q <sup>0.98</sup> 0.93 0.98	L=0.36Q <sup>1.42</sup> 0.94 1.42

Table 6. Delivery rate estimated for low and normal water period[2]

Watershed	Low water period			Normal water period		
	BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P
Gyung-An A	0.068	0.276	0.117	0.091	0.361	0.152
Gyung-An B	0.086	0.223	0.108	0.125	0.330	0.157
Da lcheon A	0.037	0.076	0.012	0.063	0.144	0.029
Dal cheon B	0.147	0.258	0.192	0.299	0.352	0.303
Bok-Ha A	0.050	0.225	0.118	0.064	0.298	0.161
Sum gang A	0.068	0.135	0.030	0.107	0.225	0.057
Sum gang B	0.101	0.440	0.262	0.148	0.607	0.348
Yang-Hwa A	0.029	0.092	0.033	0.049	0.150	0.057
Jo-Jong A	0.037	0.145	0.011	0.068	0.282	0.029
Cheong-Mi A	0.043	0.102	0.031	0.071	0.180	0.059
Han river D	0.161	0.361	0.011	0.382	1.000	0.067
Han river E	0.123	0.338	0.011	0.231	0.678	0.036
Han river F	0.423	0.763	0.065	0.617	1.000	0.122
Heuk cheon A	0.043	0.115	0.013	0.074	0.238	0.033

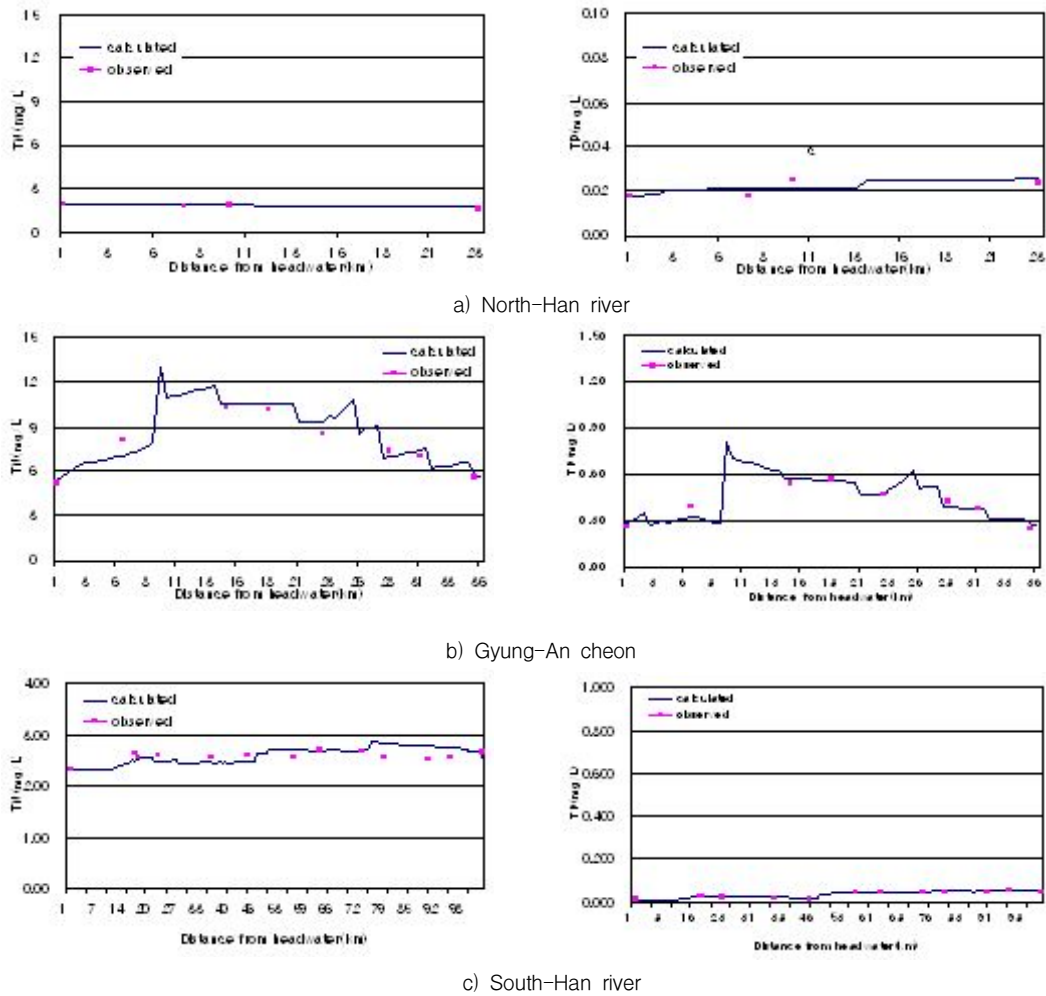


Fig. 2. The calibration result of Qualko2 model

(4) 모델보정 및 검증

2006년도를 기준년도로 산정된 배출부하량 및 지점별 수질자료를 활용하여 유달율을 산정한 후 모델보정을 수행하였다. 모델보정 지점별로 실측치와 모델값의 오차범위가 가급적  $\pm 10\%$ 이내에 들도록 보정을 수행하였다. 모델검증은 2005년도 저수기일 때 수질측정망 지점별 수질자료와 하수처리장 방류수 수질을 이용하였으며, 지점별로 실측치와 모델값의 오차범위가  $\pm 20\%$  이내에 들도록 검증기준을 설정하였다. 북한강, 남한강 경안천 수계별로 수행된 보정 및 검증결과는 Fig.2에 나타낸 바와 같이 매우 양호한 것으로 나타났다.

또한 모델의 보정 및 검증 결과의 타당성 평가를 위하여 신뢰도 지수(Reliability Index, RI)에 적용하여 평가한 결과는 Table 7과 Table 8에 나타내었다. 연구대상 수계에 대한 신뢰도 지수(RI)의

범위는 BOD 1.109~1.145, 1.148~1.294, T-N 1.069~1.084, 1.147~1.345, T-P 1.091~1.267, 1.162~1.491로 모델 보정 및 검증의 적합성 판단 기준인 2이하로 보정 및 검증결과가 매우 양호하여 모델의 활용에 문제가 없는 것으로 분석되었다.

Table 7. RI values estimated for calibration results[2]

Basin	BOD	T-N	T-P
North-Han river	1.109	1.069	1.127
South-Han river	1.145	1.070	1.091
Gyung-An cheon	1.133	1.084	1.267

Table 8. RI values estimated for verification results[2]

Basin	BOD	T-N	T-P
North-Han river	1.148	1.147	1.162
South-Han river	1.156	1.345	1.348
Gyung-An cheon	1.294	1.345	1.491

### 3.2. 팔당호 상류 수계별 수질변화 모의분석

#### (1) 수계의 유하거리별 수질변동 특성

QUALKO2모형을 이용하여 저수기일 때 팔당호 상류수계의 환경기초시설 방류수가 유하거리별 방류수역에 미치는 영향에 대하여 모의 분석하였다. 방류수가 유하거리에 따라 대상수계에 미치는 영향은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 각각의 유역별 실선 그래프로 나타났다.

북한강의 경우 연구대상 구역의 최상류인 청평댐 방류수의 총인농도는 0.018mg/L였으나, 최상류로부터 약 1km 하류지점에서 조종천이 유입되면서 총인 수질이 0.019mg/L로, 조종천 합류 후 약 12km 하류지점에서 묵현천이 유입되면서 총인농도가 0.022mg/L에서 0.023mg/L로, 묵현천 합류지점으로부터 약 7.5km 하류에서 송촌하수처리장 방류수의 영향으로 총인농도가 0.024mg/L에서 0.025mg/L까지 소폭 증가한 후 팔당호로 유입되는 것으로 분석되었다. 또한 북한강의 제1지류하천인 조종천은 조사구간 최상류로부터 약 18km 하류지점에서 현리하수처리장 방류수가 유입됨에 따라 총인농도가 0.027 mg/L에서 0.056mg/L로 상승하였고, 현리하수처리장 방류지점부터 약 13km 하류지점에서 청평하수처리장 방류수가 유입되면서 총인농도가 0.017mg/L에서 0.066mg/L로 수질이 급격히 악화되는 것으로 분석되었다.

남한강 본류의 수질 모의결과는 연구대상구역의 최상류인 충주댐 방류수의 경우 총인농도는 0.011mg/L였으나, 최상류에서부터 약 12km 하류에 달천이 합류하면서 총인농도가 0.011mg/L에서 0.022mg/L로, 달천 합류지점으로부터 약 35.5km 하류에서 섬강이 합류하면서 총인농도가 0.020 mg/L에서 0.042mg/L로, 섬강 합류지점으로부터 약 3km 하류에서 청미천의 합류로 총인농도가 0.042mg/L에서 0.048mg/L로, 청미천 합류지점으로부터 약 25.5km 하류에서 북하천이 합류하면서 총인농도가 0.055mg/L에서 0.060mg/L로 증가하였으나, 자정작용에 의하여 최종적으로 0.056mg/L의 총인이 팔당호에 유입되는 것으로 조사되었다. 남한강 제1지류하천의 총인 수질은 달천의 종말지점에서 0.092mg/L, 섬강의 종말지점에서 0.199mg/L, 청미천의 종말지점에서 0.168mg/L, 북하천의 종말지점에서 0.186mg/L, 흑천의 종말지점에서 0.019 mg/L의 총인 수질이 남한강에 유입되는 것으로 분석되었다. 또한 섬강의 제1지류인 원주천은 종말지점에서 총인 수질이 0.822mg/L의 높은 농도로

섬강에 유입되는 것으로 분석되었다.

경안천의 수질변화는 연구대상구역의 최상류지점의 총인농도가 0.278mg/L로 높은 오염도를 나타냈으며, 최상류지점으로부터 약 9km 하류지점에서는 총인농도가 0.281mg/L에서 0.762mg/L로 높게 나타났는데, 이는 용인하수처리장 방류수가 방류수역에 직접적으로 영향을 미친 것으로 판단된다. 이후 자정작용에 의해 감소하다가 용인하수처리장 방류지점으로부터 약 14km 하류에서 환경기초시설 방류수가 포함된 묵현천과 곤지암천이 유입되면서 다시 총인농도가 0.616mg/L까지 증가한 후 감소하다가 최종적으로 경안천 발달지점에서 총인 수질이 0.233mg/L로 팔당호에 유입되는 것으로 분석되었다.

#### (2) 수질기준 강화에 따른 방류수역의 수질변화 예측분석

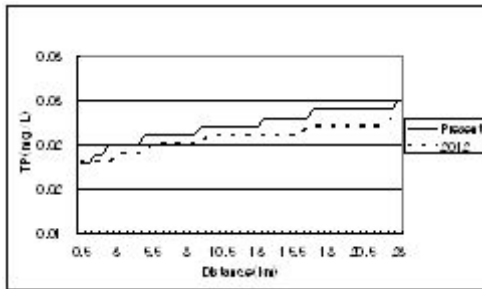
QUALKO2모형을 이용하여 팔당호 상류수계의 3개 본류 및 8개 지류하천에 대하여 2012년 1월부터 적용되는 공공하수처리시설 방류수의 총인 수질기준이 강화되었을 경우 방류수역의 총인 수질이 개선되는 효과에 대하여 모의 분석하였다.

본 연구에서는 연구대상 구역에 운영되고 있는 환경기초시설 54개소를 대상으로 하였으며, 이 중 1일 하수처리용량이 500m<sup>3</sup>이상인 하수처리장의 경우 4개 지역(I 지역, II 지역, III 지역, 기타지역)으로 구분하여 방류수 수질기준을 적용하였고, 또한 1일 하수처리용량 50m<sup>3</sup>이상 500m<sup>3</sup>미만인 하수처리장에 대하여 방류수 총인 수질기준을 2.0mg/L이하로 적용하였다.

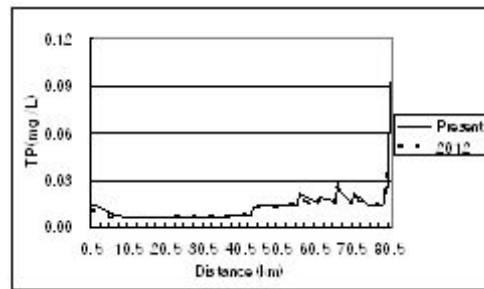
이와 같이 총인 방류수 수질기준을 연구대상에 적용한 결과는 Table 3에 나타낸 바와 같이 1일 하수처리용량 500m<sup>3</sup>이상인 환경기초시설 중 방류수 총인 수질기준 III 지역(0.5mg/L 이하)에 해당하는 환경기초시설은 달천유역의 음성, 음성(소이), 괴산, 미원, 속리산, 충주, 수안보처리장과 섬강유역의 횡성, 원주처리장이었고, II 지역(0.3mg/L 이하)에 해당하는 환경기초시설은 청미천유역의 금양처리장, 양화천유역의 가남처리장이 해당되었으며, 그 외 환경기초시설은 I 지역(0.2mg/L 이하)에 해당되었다. 또한 연구대상 환경기초시설 중 1일 하수처리용량이 500m<sup>3</sup>미만 50m<sup>3</sup>이상인 하수처리장은 북한강유역의 삼봉1, 시우, 송촌, 서중처리장과 팔당호유역의 능내1, 능내2, 귀여, 삼성처리장으로 총인 수질기준을 2mg/L 이하로 적용하여 분석하였다.

방류수 수질기준 강화에 따른 대상수계의 총인 수질 변화는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 각각의 유역별 점선 그래프로 나타났다. 대상수계에 대한 총인 수질을 모의한 결과 북한강의 경우 팔당호 유입지점은 0.025mg/L에서 0.023mg/L, 남한강은 0.056mg/L에서 0.040mg/L, 경안천은 0.233mg/L에서 0.146mg/L까지 총인의 수질이 개선되어 팔당호

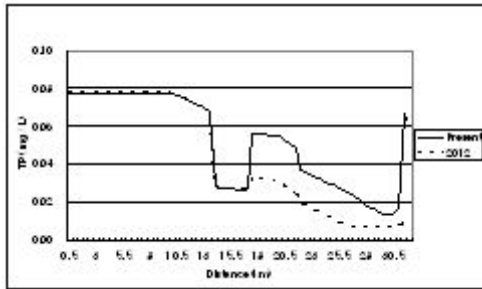




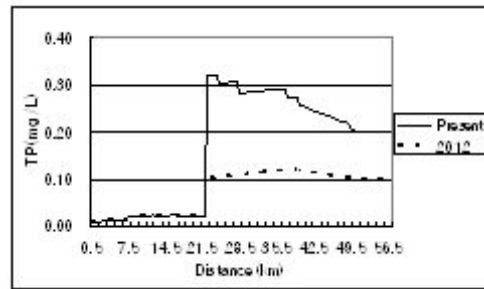
a) North-Han river



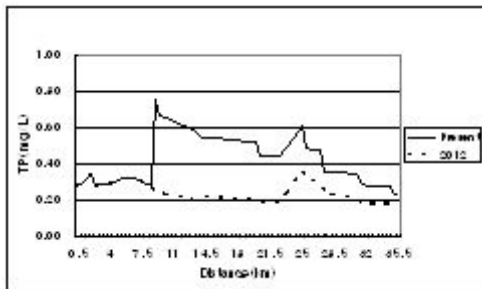
e) Dal cheon



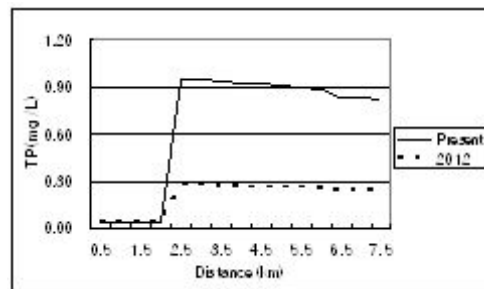
b) Jo-Jong cheon



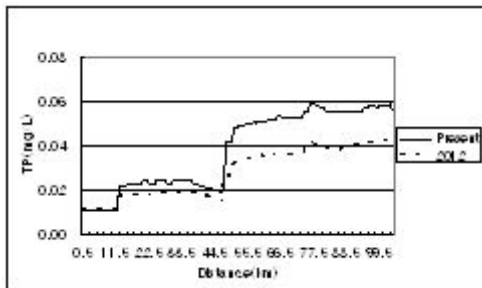
f) Sum gang



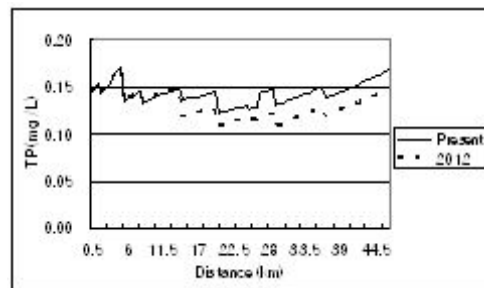
c) Gyung-An cheon



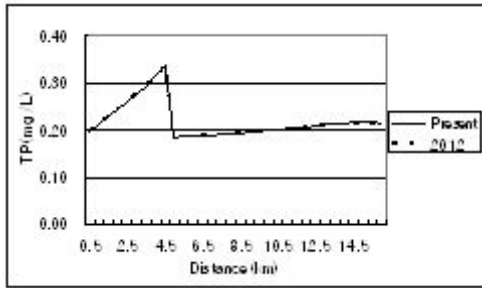
g) Won-Ju cheon



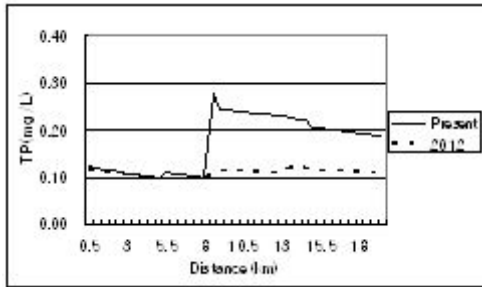
d) South-Han river



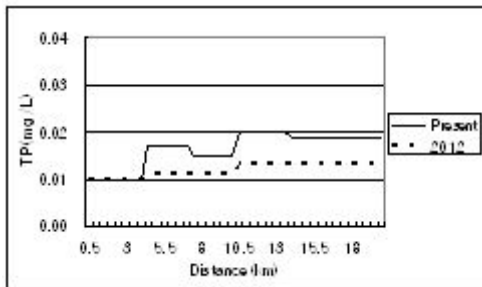
h) Cheong-Mi cheon



i) Yang-Hwa cheon



j) Bok-Ha cheon



k) Heuk cheon

Fig. 3. T-P concentration predicted by Qualko2 model

로 유입되는 것으로 예측되었다.

팔당호로 유입되는 수계별 지류하천의 총인농도에 대하여 수질개선 효과를 예측·분석한 결과 북한강의 제1지류인 조종천의 경우 0.063mg/L에서 0.010mg/L, 남한강의 제1지류인 달천의 경우 0.091mg/L에서 0.053mg/L, 섬강은 0.199mg/L에서 0.100mg/L, 청미천은 0.168mg/L에서 0.148mg/L, 북하천은 0.186mg/L에서 0.105mg/L, 흑천은 0.019mg/L에서 0.013mg/L, 섬강의 제1지류인 원주천은 0.822mg/L에서 0.236mg/L로 총인의 수질이 개선되는 것으로 나타났다. 그러나 양화천의 경우 환경기초시설이 지류하천인 대신천유역에 1개소가 위치하고 있어 방류수 총인의 수질농도 강화에 따른 수질개선 효과는 거의 없는 것으로 분석되었다.

대상수계 중 팔당호 상류 분류수계의 경우 경안천이 37.3%로 가장 높은 수질개선 효과를 나타냈는데, 이는 환경기초시설 방류수가 방류수역으로의 직접적인 유입으로 인한 것으로 판단된다. 또한 제1지류하천 중에서 조종천의 경우 84.1%, 섬강은 49.7%, 달천은 44.3%, 북하천은 43.6%로 높은 수질개선 효과를 나타내었다. 이는 제1지류하천 중에서 북한강의 조종천은 현리, 청평하수처리장 방류수가 방류수역으로 직접 배출되므로 수질개선 효과가 가장 높게 나타났고, 남한강은 환경기초시설의 총인 배출부하량이 많은 달천, 섬강, 북하천유역에 대하여 방류수 총인농도를 강화할 경우 수질개선효과가 큰 것으로 나타났다.

### 3.3. 수질기준 강화에 따른 총인부하량 변화 분석

연구대상 수계 내 환경기초시설에 대하여 2012년부터 시행되는 공공하수처리시설 방류수 수질(총인)기준을 QUALKO2모델에 적용하여 삭감 가능한 총인부하량 및 부하율에 대하여 분석하였다. 강화되는 방류수 수질기준에 따른 대상지역을 구

Table 9. Estimated T-P concentration and loading by the model

Watershed	Present standard		New standard strengthened		Reduced amount	
	T-P(mg/L)	T-P loads(kg/d)	T-P(mg/L)	T-P loads(kg/d)	T-P(mg/L)	T-P loads(kg/d)
North-Han river	0.025	247.92	0.023	228.09	0.002	19.83
Jo-Jong cheon	0.063	7.24	0.010	1.15	0.053	6.09
Gyung-An cheon	0.233	147.36	0.146	92.34	0.087	55.02
South-Han river	0.056	575.72	0.040	411.23	0.016	164.49
Dal cheon	0.091	69.91	0.053	38.97	0.038	30.94
Sum gang	0.199	195.32	0.100	98.15	0.099	97.17
Won-Ju cheon	0.822	169.03	0.236	48.53	0.586	120.50
Cheong-Mi cheon	0.168	66.33	0.148	58.44	0.02	7.89
Yang Hwa cheon	0.214	27.18	0.213	27.05	0.001	0.13
BokHa cheon	0.186	61.23	0.105	34.56	0.081	26.67
Heuk cheon	0.019	2.53	0.013	1.73	0.006	0.80

분·적용하여 각 주요 수계별 말단지점인 팔당호 유입전의 총인 삭감부하량을 분석한 결과는 Table 9에 나타내었다. 북한강 말단지점을 기준으로 19.83kg/d, 남한강 말단지점은 164.49kg/d, 경안천 말단지점은 55.02kg/d가 삭감되어 수질이 개선되는 것으로 예측되었고, 또한 총인부하량 삭감율은 북한강 8.0%, 남한강 28.6%, 경안천 37.3%로 본류하천 중 삭감율이 가장 높은 것은 경안천, 가장 많은 양이 삭감되는 수계는 남한강으로 예측되었다.

경안천의 경우 저수기에 용인시와 광주시에서 많은 양의 환경기초시설 방류수가 경안천으로 유입되므로 수질개선효과가 클 것으로 분석되었다. 또한 제1지류하천 중 섬강과 달천이 97.17kg/d, 30.94kg/d로 가장 많은 총인부하량이 삭감되는 것으로 조사되었으며, 총인부하량 삭감율은 조종천 84.1%, 섬강 49.7%, 달천 44.3%로 수질개선 효과가 큰 것으로 예측되었다.

#### 4. 결론

환경기초시설의 총인 방류수 기준을 강화시켰을 경우 저수기일 때 팔당호 상류수계의 인 수질개선 효과분석을 위해 수질 모델링을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 연구대상 수계에 대하여 현재 총인농도의 수질변화를 모의한 결과 북한강은 연구대상 전 구간에서 지류와 환경기초시설 방류수에 의한 총인 수질 변동 폭이 적었으며, 경안천은 환경기초시설에 의해 직접적인 영향을 받는 것으로 조사되었고, 남한강은 환경기초시설을 보유한 지류 하천의 유입으로 총인농도가 증가하는 경향을 나타냈다.

2) 환경기초시설 방류수의 총인 수질기준이 강화될 경우 북한강, 남한강, 경안천의 3개 본류 하천을 대상으로 예측 분석한 결과 북한강의 경우 총인농도가 0.025mg/L에서 0.023mg/L, 남한강은 0.056mg/L에서 0.040mg/L, 경안천 0.233mg/L에서 0.146mg/L까지 총인 수질이 개선되어 팔당호로 유입되는 것으로 예측되었고, 또한 북한강의 제1지류인 조종천의 경우 0.063mg/L에서 0.010mg/L, 남한강의 제1지류인 달천의 경우 0.091mg/L에서 0.053mg/L, 섬강은 0.199mg/L에서 0.100mg/L, 청미천은 0.168mg/L에서 0.148mg/L, 복하천은 0.186mg/L에서 0.105mg/L, 흑천은 0.019mg/L에서 0.013mg/L, 섬강의 제1지류인 원주천은 0.822mg/L에서 0.236mg/L로 총인에 대한 수질이 개선되는 것으로 예측되었다.

3) 팔당호 상류수계에 위치한 환경기초시설에 강화된 방류수 총인농도가 적용될 때 팔당호에 미치는 수질개선 효과는 상류 본류 수계 중에서 경안천, 본류로 유입되는 제1지류하천 중에서 조종천, 섬강, 달천, 복하천의 수질 개선효과가 큰 것으로

평가되었다.

4) 환경기초시설 방류수 수질기준이 강화될 경우 총인 삭감부하량을 분석한 결과 북한강 19.83 kg/d, 남한강 164.49kg/d, 경안천 55.02kg/d가 삭감되어 수질이 개선되는 것으로 조사되었고, 삭감율은 북한강 8.0%, 남한강 28.6%, 경안천 37.3%로 본류하천 중 총인부하량 삭감율이 가장 높은 것은 경안천, 삭감량이 가장 많은 수계는 남한강으로 조사되었고, 또한 제1지류하천 중 섬강과 달천의 총인부하량 삭감량이 97.17kg/d, 30.94kg/d로 조사되었으며, 총인부하량 삭감율은 조종천 84.1%, 섬강 49.7%, 달천 44.3%로 수질이 개선효과가 큰 것으로 평가되었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 공동수, 정동일, *QUALKO2 설명자료*, 국립환경 과학원, 2007.
- [2] 국립환경과학원, *상수원 호소 상류지역의 물리 화학적 인처리 공정도입 타당성 검토*, 2009.
- [3] 국립환경과학원, *물환경정보시스템*, 2001-2006.
- [4] 국립환경과학원, *수계오염총량관리기술지침개정*, 2004.
- [5] 국립환경과학원, *수질·유량 측정망 등 DB 웹 시스템*, 2003-2008.
- [6] 국립환경과학원, *조류예보제*, 2008.
- [7] 환경부, *환경백서*, 2007.
- [8] 환경부(2009), *하수도법시행규칙*, 2009.
- [9] Vollenweider R. A and Kerekes, *OECD cooperative programme on monitoring of inland water, Synthesis Report*, 1982.