

낙동강 유역 BOD, COD 및 TOC의 수문학적 플럭스 추정 Estimating BOD, CDO and TOC Hydrologic Flux in Nakdong River Basin

이아연 · 박무중* · 조덕준** · 김상단†
A Yeon Lee · Moo Jong Park* · Deok Jun Jo** · Sangdan Kim†

부경대학교 환경공학과 · *한서대학교 토목공학과 · **동서대학교 건축토목공학부
Department of Environmental Engineering, Pukyong National University

*Department of Civil Engineering, Hanseo University · **Division of Architecture & Civil Engineering, Dongseo University

(2010년 3월 28일 접수, 2010년 8월 31일 채택)

Abstract : This study presents a constituent load estimating procedure that can be operated with the present Korean TMDL monitoring system. The modified TANK model is used as a daily river flow simulation model whose parameters are estimated from 8-day intervals flow data. Constituent loads are estimated with the 7-parameter log linear model whose parameters are estimated by the minimum variance unbiased estimator. Results from Nakdong river basin reveals that the proposed procedure provides satisfactory TOC and BOD load estimates. As an application, a representative load duration curve is derived for working out a way to represent the overall hydrologic flux of BOD, COD and TOC at Nakdong river basin. The present water quality can be checked stochastically by Load Duration Curve through this study and presented visually.

Key Words : Flow Duration Curve, Load Duration Curve, Total Organic Carbon, TMDL

요약 : 본 연구에서는 현재 시행되고 있는 오염총량관리제 모니터링 시스템에 적용가능한 부하량 추정기법에 대하여 제시하였다. 수정 TANK 모형을 통하여 8일 간격 유량자료의 1일 간격 유량자료로의 확장을 시행하여 유황곡선의 작성을 가능하게 하였다. 7변수 대수 선형 모형 적용 통한 BOD, COD 및 TOC 부하량 추정에서 만족스러운 결과를 확인할 수 있었다. 연구의 적용의 일환으로, 낙동강유역의 BOD, COD 및 TOC 항목의 부하량 유황 곡선을 작성하여 전체적인 분포를 살펴보았다. 본 연구를 통하여 파악된 부하량 유황곡선은 해당 지점의 현재 전체적인 수질현황을 확률적으로 파악할 수 있음과 동시에 이를 시각적으로 도시할 수 있는 장점을 가지고 있다.

주제어 : 유량유황곡선, 부하량유황곡선, 총유기탄소, 오염총량관리제

1. 서론

하천의 오염원에 대한 모니터링은 유역을 대상으로 하는 학문적 연구뿐만 아니라 유역관리를 위한 유용한 수단이다.¹⁻³⁾ 그러나 일반적으로 오염원 이송에 대한 직접적인 측정은 쉽지 않은 것이 사실이다. 하천의 흐름을 통하여 유입되는 순간적인 부하량은 하천의 유량과 농도에 의해 결정되는데, 전형적으로 오염원 농도의 측정에는 신중한 시료 채취 및 보전이 필요하며 시료의 화학적인 분석에 많은 시간이 요구된다. 경우에 따라서는 매우 많은 비용이 소요되기도 한다.⁴⁾

또한 다수의 지류가 유입되는 대형 하천 본류의 총 오염 부하량을 추정해야 하는 경우 bias의 상대적인 중요성이 증가하는 경향이 있게 된다. 즉, 각각의 지류에서의 부하량 추정 시 발생하는 무작위적 오차들은 부분적으로 상쇄되는 경향이 있는 반면에, 본류에서의 bias에 따른 오차는 하류방향으로 점진적으로 축적되는 경향을 보이게 되기 때문이다.⁵⁾ 따라서 하천을 통해 유입되는 오염 부하량의 효율적인 추정기법이 연구될 필요가 있으며, 이를 이용하여 보다 과학적인 부하량 산출이 이루어질 필요가 있다.⁶⁾

우리나라의 경우 국립환경과학원 낙동강물환경연구소에서는 2004년부터 낙동강 오염총량관리 단위유역 말단부를 대상으로 유량 및 수질을 8일 간격의 원칙으로 동시관측하고 있으며, TOC에 관해서는 2007년부터 관측을 실시하고 있다.

이에 본 연구에서는 현재 가용한 자료의 수준을 바탕으로 하천에서의 일단위 오염부하량을 추정할 수 있는 기법을 적용하여 그에 대한 적용 가능성을 살펴보고자 한다. 이를 위해 상기 8일 간격 유량 수질(BOD, COD, TOC) 동시관측 자료를 이용하여 낙동강 오염총량관리 단위유역별 유량 및 부하량 유황곡선이 작성된다. 한수희 등⁷⁾의 연구에서 착안하여 일 유량은 하도추적기능과 증발산량 모의기능이 추가된 TANK 모형을 통하여 산출되며, 일 부하량은 최소분산비편향추정기법과 연계된 7변수 대수선형모형을 통하여 추정된다. 추정된 단위유역별 부하량 유황곡선을 이용하여 낙동강을 대표할 수 있는 대표 부하량 유황곡선이 유도되며, 이를 통하여 낙동강 유역의 전체적인 부하량 배출의 공간적 분포를 살펴보고자 하였다.

2. 연구방법

† Corresponding author E-mail: skim@pknu.ac.kr Tel: 051-629-6529 Fax: 051-629-6528

2.1. TANK 모형을 이용한 유량 유황곡선 작성

환경부에서는 수질오염총량관리 기본방침에 따라 수질오염총량관리 목표수질지점에 대한 수질·유량조사를 실시하고 있으며 수질·유량측정망 등 DB 및 웹 시스템(smat.nier.go.kr)에서 8일 간격으로 하천유량 및 수질의 변동여부를 확인하는 것이 가능하게 되었다. 이에 개념적 장기유출 수문모형인 TANK 모형을 이용하여 8일 간격 유량자료를 1일 간격 유량자료로 확장하려는 시도를 수행하였다.

TANK 모형이란 대상 유역을 오리피스형의 유출공을 가진 몇 개의 저류형 가상용기(TANK)를 조합하여 유량을 유량으로 변환하는 유출계산법으로 장기유출 해석에서 비교적 높은 평가를 받고 있는 모형 중 하나이다. TANK 모형의 적용에서 가장 어려운 점들 중 하나는 모형 매개변수의 수가 많고 이들을 시행착오에 의해서 결정하므로 직감과 경험에 의존할 수밖에 없다는 것이다. 그러나 계산법이 명확하고 유출기구가 수문현상을 잘 재현한다는 점에서 모형의 객관성을 인정받고 있다.

본 연구에서는 하도추적기능과 증발산량 모의기능 추가된 4단 TANK 모형⁸⁾을 적용하였다. 하도추적기법은 현재 가장 일반적으로 쓰이고 있는 Muskingum의 홍수추적방법을 적용하였으며, 잠재증발산량은 Penman 방법에 의해 추정된 후, 저류형 가상용기 내의 수량에 따라 실제 증발산량이 계산되도록 하였다. 또한 단위유역별로 환경기초시설의

방류수 및 취수량 자료가 일 유량 모의 시에 고려되도록 하였으며, 농업용수 취수에 의한 영향은 5월에서 9월에만 적용하였다. Fig. 1은 TANK 모형의 낙동강 유역 분할도이다.

2.2. 최소분산비편향추정법과 연계된 7변수 대수 선형 모형을 이용한 부하량 유황곡선 작성

하천을 통하여 이송되는 오염물질의 부하량을 추정하는 것과 관련하여 여러 가지 기법들이 연구되어 왔다. 이러한 연구들은 일반적으로 하천의 특정 지점에서 이송되는 오염 부하량을 추정하기 위하여 수행되어왔으며, 이러한 경우 주로 관측된 유량 Q 와 농도 C 또는 오염부하량 L 과의 관계를 근거로 한다. 본 연구에서는 미국 USGS의 하천 오염부하량 산출 모형인 7변수 대수 선형 모형을 기반으로 하여^{4,6)} TOC, BOD 및 COD의 일 부하량을 산출해 보고자 한다. 이때, 7변수 대수 선형 모형의 매개변수 추정을 위하여 최소분산비편향추정법⁹⁾이 적용되었다.

7변수 대수 선형 모형의 기본 식은 아래와 같다. 본 모형을 적용한 이유는 오로지 7개의 매개변수만 적절히 산정되면 오염원 농도의 유량변동에 대한 영향, 계절변화의 영향 및 시간변동의 영향을 살펴볼 수 있기 때문이다.

$$\ln C = \beta_0 + \beta_1 \ln [Q/\tilde{Q}] + \beta_2 \{ \ln [Q/\tilde{Q}] \}^2 + \beta_3 [T - \bar{T}] + \beta_4 [T - \bar{T}]^2 + \beta_5 \sin [2\pi T] + \beta_6 \cos [2\pi T] + \varepsilon \quad (1)$$

여기서, Q 는 유량, β 는 추정될 매개변수, T 는 일 분율(예를 들어, 1월 1일은 1/365, 1월 2일은 2/365)이며, ε 은 모형 오차이다. \bar{T} 와 \tilde{T} 는 아래와 같다.

$$\tilde{T} = \bar{T} + \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^3}{2 \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2} \quad (2)$$

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n T_i \quad (3)$$

국립환경과학원의 수질·유량측정망 등 DB 및 웹 시스템(<http://smat.nier.go.kr>)에서 제공하는 유량 및 BOD, COD, TOC 동시 관측 자료를 대상으로 최소분산비편향추정법을 통하여 식 (1)의 매개변수를 추정한 후, 사전에 TANK 모형에 의하여 모의된 일 유량 자료를 연계시키면 일 부하량의 모의가 가능하게 된다. 부하량 L 은 시간간격 $\{t_a, t_b\}$ 동안 하천의 특정단면을 통하여 이송되는 오염 물질의 양으로 정의될 수 있으며, 다음 식으로 표현된다.

$$L \equiv \int_{t_a}^{t_b} L(t) dt \equiv K_u \int_{t_a}^{t_b} C(t) Q(t) dt \quad (4)$$

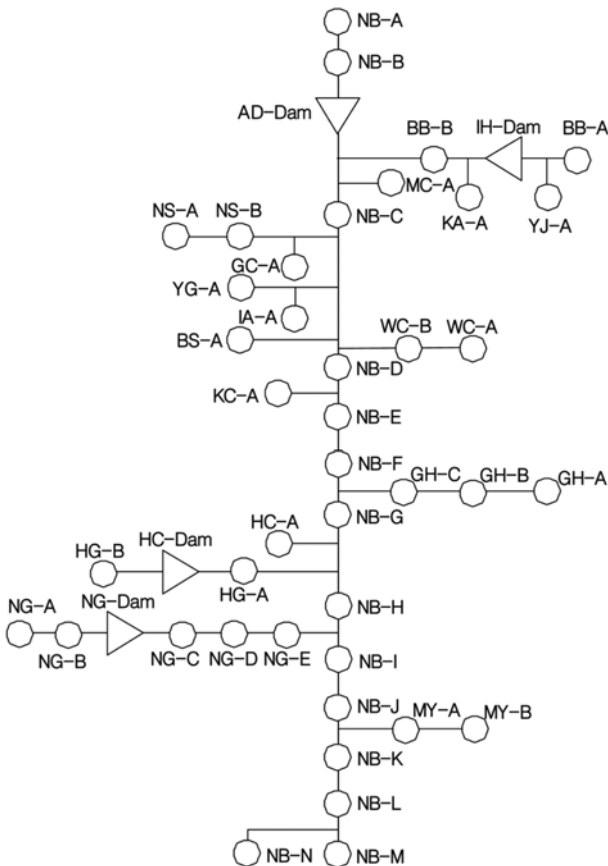


Fig. 1. Subbasins for TANK-Nakdong river model.

여기서, C 는 농도이며, K_u 는 단위환산계수이다.

하천유량 $Q(t)$ 은 관측 자료로부터 상대적으로 정확하게 장기간의 연속된 유량을 추정할 수 있으나, 하천수질 $C(t)$ 의 경우는 지속적인 관측기록이 존재하지 않고 N 개의 불연속적인 시간구간 $\{t_1, \dots, t_N\}$ 의 값이 존재한다. Rating curve는 농도의 대수 값과 유량의 대수 값 사이의 관계를 규명하는데 널리 사용되는데,^{1,10,11)} $Q(t)$ 로부터 $C(t)$ 의 값을 계산하며, 일반적으로 다음과 같이 선형 모형의 형태로 표현된다.

$$Y^* \equiv \ln(C(t)) = X(t)\beta^* + \varepsilon(t) \quad (5)$$

여기서, $X(t) = \{X_0(t), X_1(t), \dots, X_K(t)\}$ 로서 예측벡터를 의미하며, $\beta^* = \{\beta_0^*, \beta_1^*, \dots, \beta_K^*\}$ 는 $K+1$ 개의 회귀계수이다. 식 (4)에 식 (5)을 대입하면 다음과 같다.

$$L = K_u \int_{t_a}^{t_b} C(t) Q(t) dt$$

$$= K_u \int_{t_a}^{t_b} \exp(X(t)\beta^* + \ln(Q(t))) \cdot \exp(\varepsilon(t)) dt \quad (6)$$

식 (6)은 유량과 같은 연속적인 관측변수에 의해 결정된다. 식 (5)에서 $\ln(Q)$ 을 예측변수로 사용하면, 식 (5)로 정의된 모형은 아래와 같이 보다 간단한 식으로 표현된다.

$$\ln(L(t)) = X(t)\beta + \varepsilon(t) \quad (7)$$

$$L = \int_{t_a}^{t_b} \exp(X(t)\beta) \exp(\varepsilon(t)) dt \quad (8)$$

식 (6)과 식 (8)은 식 (9)에 의해 완전히 같은 모형이 된다.

$$\beta = \beta^* + \begin{bmatrix} \ln(K_u) \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

관측 자료 벡터(식 (10))와 이에 대응하는 예측 변수 행렬(식 (11))이 주어지면, 매개변수 추정을 위한 최소 자승 회귀 추정치는 식 (12)와 식 (13)에 의해 계산된다.

$$Y \equiv \begin{bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_N \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} Y_{(t_1)} \\ \vdots \\ Y_{(t_N)} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \ln(L(t_1)) \\ \vdots \\ \ln(L(t_N)) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\vec{X} = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X(t_1) \\ \vdots \\ X(t_N) \end{bmatrix}$$

$$\equiv \begin{bmatrix} 1 & \ln(Q(t_1)) & X_2(t) & \dots & X_K(t_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \ln(Q(t_N)) & \dots & \dots & X_K(t_N) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\hat{\beta} = (\vec{X}'_C \vec{X}_C)^{-1} \vec{X}'_C Y \quad (12)$$

$$s^2 = (Y - \vec{X}_C \hat{\beta})' (Y - \vec{X}_C \hat{\beta}) / (N - (K + 1)) \quad (13)$$

여기서, $\hat{}$ 은 추정치를 의미한다.

Rating curve에 의한 부하량 \hat{L}_{RC} 은 식 (14)와 같이 정의될 수 있으나, \hat{L}_{RC} 는 재변형 편향을 보이기 때문에 통계학적으로 이상적이지 않다.

$$\hat{L}_{RC} \equiv \exp(X(t)\hat{\beta})$$

$$\equiv \exp(\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \ln(Q(t)) + \dots) \quad (14)$$

유량이 $Q(t)$ 로 주어지면, 부하량의 기댓값은 식 (15)가 되며, 반면에 \hat{L}_{RC} 의 기댓값은 식 (16)이 된다.

$$E[L(t)|Q(t)] = \exp(X(t)\beta + \sigma^2/2) \quad (15)$$

$$E[\hat{L}_{RC}(t)] = E[\exp(X(t)\hat{\beta})] = \exp(X(t)\beta + h_E(t)\sigma^2/2) \quad (16)$$

여기서,

$$h_E(t) = X(t)(\vec{X}'_C \vec{X}_C)^{-1} X'(t) \quad (17)$$

표본의 크기가 증가할수록 \hat{L}_{RC} 는 부하량의 기댓값으로 수렴하지 못함을 알 수 있다. N 값이 클 경우, $E[L]$ 에 대한 \hat{L}_{RC} 의 기댓값의 비율은 $\exp(-\sigma^2)$ 에 가까워진다. 그러나 \hat{L}_{RC} 의 이와 같은 편향에도 불구하고 다른 추정기법의 근본이 되므로 중요하게 다루어질 필요가 있다.⁴⁾

이러한 편향을 보정하는 방법이 일환으로 Finney¹²⁾는 최소분산비편향추정법(Minimum Variance Unbiased Estimator, MVUE)을 제안하였으며, 기본적인 식의 형태는 아래와 같다.

$$\hat{L}_{MVUE} \equiv \hat{L}_{RC} \cdot g_m((1 - h_E(t))s^2/2) \quad (18)$$

여기서,

$$m = (N - (K + 1)) \quad (19)$$

$$g_m(t) \equiv 1 + t + \frac{m}{m+2} \frac{t^2}{2!} + \frac{m^2}{(m+2)(m+4)} \frac{t^3}{3!} + \dots \quad (20)$$

3. 연구결과

3.1. 연구대상지역 및 사용된 자료

앞서 언급한 바와 같이 대상유역은 낙동강 오염총량관리

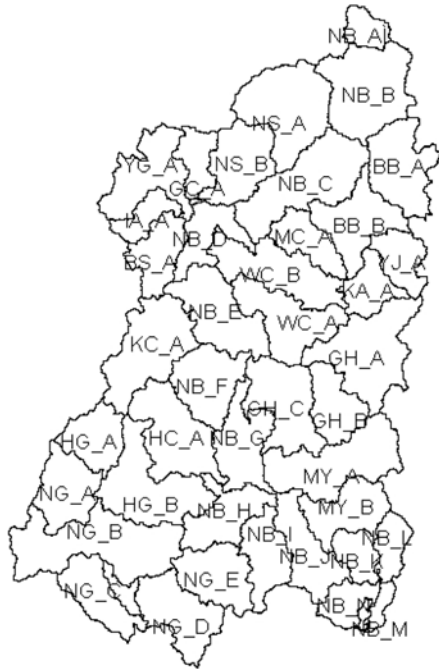


Fig. 2. Nakdong River network.

41개 단위유역이다. 그러나 본 연구에서는 서낙동강으로 분기되는 낙본N 단위유역의 경우는 취급하기 어려워 생략하고 최종적으로는 40개의 단위유역을 대상으로 하였다. 이를 Fig. 2에 도시하였다.

TANK 모형의 매개변수를 추정하기 위해서 필요한 입력 자료로는 각 단위유역의 면적, 물수지 및 농업용수 취수량 등의 자료와 일강수량, 일잠재증발산량 자료 등이 있다. 여기서는 Penman 방법으로 잠재증발산량을 산정하였으며 이를 위해 필요한 평균기온, 상대습도, 평균풍속, 일조시간 및 관측지점의 위도자료는 기상청 제공 자료를 사용하였다.

또한 보정 및 검정에 사용될 유량 및 수질 자료는 2004년부터 2009년까지의 앞서 언급한 8일 간격 유량 및 수질 관측 자료를 사용하였다. 다만 TOC에 관해서는 2007년부터 관측을 실시하고 있어 2007년부터 2009년까지의 자료를 사용하였다. Fig. 3에 수질관측 자료를 통계적으로 살펴보기 위하여 box plot형태로 나타내었다.

3.2. 적용 결과

3.2.1. 일 유량 모의 결과

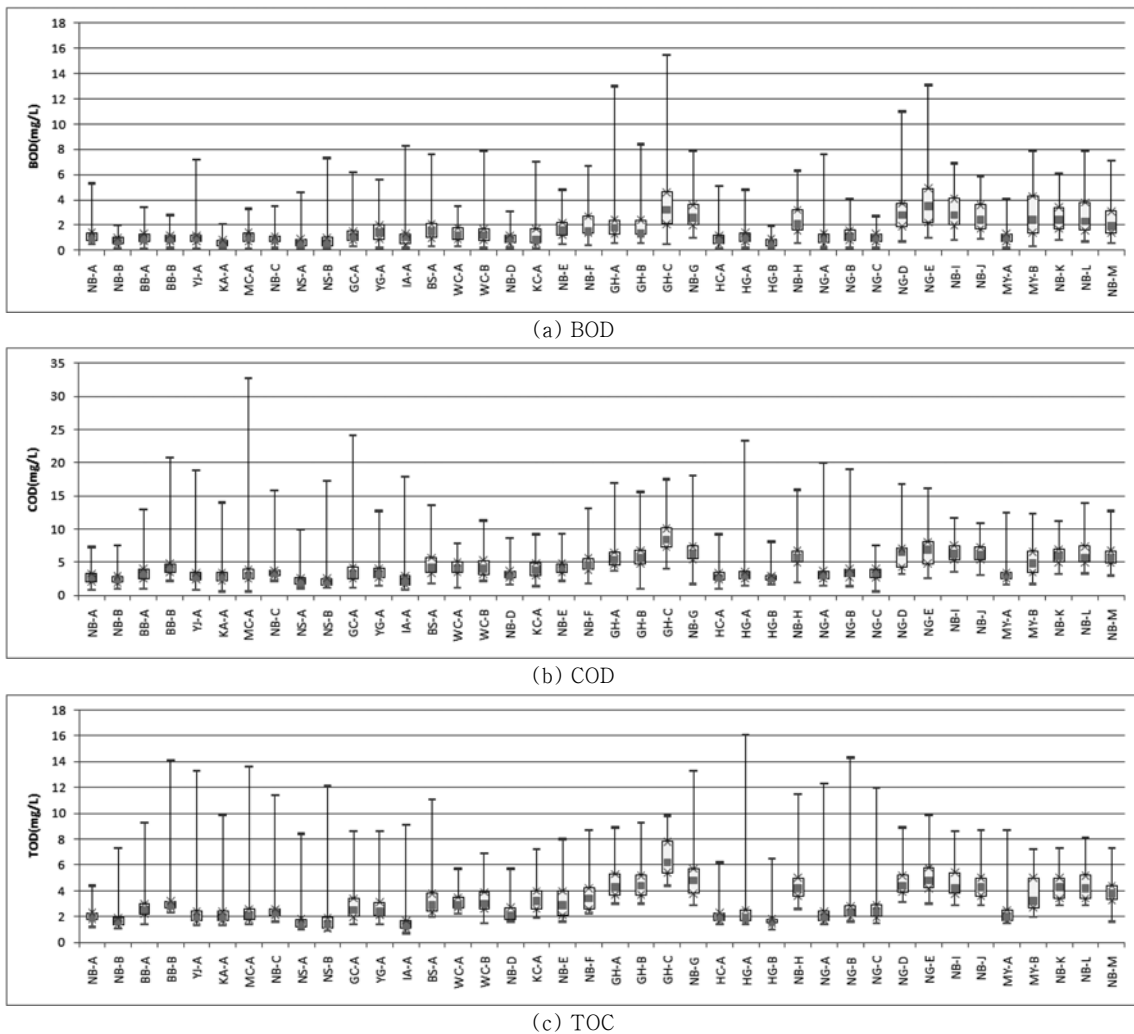


Fig. 3. Box plot of the observation data in Nakdong river.

Table 1. The values of TANK R^2 and NSC for unit watershed

Unit watershed	R^2	NSC	Unit watershed	R^2	NSC
NakbonA	0.8619	0.8010	GeumhoA	0.9063	0.7143
NakbonB	0.7339	0.7295	GeumhoB	0.9036	0.5862
Andong-Dam	0.4151	0.3232	GeumhoC	0.9418	0.9369
BanbyeonA	0.9800	0.6692	NakbonG	0.8786	0.8427
YongjeonA	0.9459	0.7533	HoicheonA	0.8173	0.7784
Imha-Dam	0.7183	0.6665	HwanggangA	0.9354	0.7652
KilanA	0.7858	0.7041	Hapcheon-Dam	0.8607	0.8587
BanbyeonB	0.9561	0.9179	HwanggangB	0.9195	0.8584
MicheonA	0.9928	0.9647	NakbonH	0.9661	0.9638
NakbonC	0.9038	0.8446	NamgangA	0.9689	0.7449
NaeseongA	0.8897	0.8397	NamgangB	0.9659	0.8288
NaeseongB	0.7554	0.7218	Namgang-Dam	0.8156	0.8145
GeumcheonA	0.7162	0.7143	NamgangC	0.5812	0.5325
YeonggangA	0.6539	0.6519	NamgangD	0.7313	0.6099
IanA	0.6638	0.6496	NamgangE	0.7617	0.6480
ByeongseongA	0.8724	0.8631	NakbonI	0.9696	0.9677
WecheonA	0.9752	0.6718	NakbonJ	0.9692	0.9688
WecheonB	0.8982	0.8976	MilyangA	0.6840	0.5010
NakbonD	0.9173	0.9165	MilyangB	0.8663	0.8481
KamcheonA	0.9285	0.9210	NakbonK	0.9051	0.9039
NakbonE	0.8533	0.8256	NakbonL	0.9051	0.9032
NakbonF	0.9255	0.9208	NakbonM	0.8310	0.6634

낙동강 유역을 대상으로 2004~2009년 일 강수량, 일 잡재증발산량 및 8일 간격 관측 유량 자료를 이용하여 TANK 모형의 매개변수를 추정하였다.

또한 관측 자료의 재현 여부를 보다 정량적으로 판단하

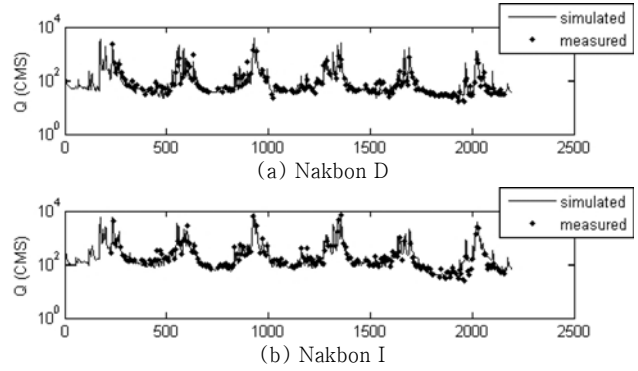


Fig. 4. Result of river flow simulation.

기 위하여 모의자료와 관측자료 사이의 통계적 상관성을 관측 자료와 모의 자료 사이의 회귀분석 결과 도출된 결정계수 R^2 와 Nash 등¹³⁾에 의해 제안된 계수인 NSC (Nash-Sutcliffe Coefficient)를 통해 살펴보았다. 그 결과를 Table 1에 도시하였다. 평균적으로 결정계수 $R^2 = 0.8498$, NSC = 0.7896으로 우수하게 관측유량자료를 재현하고 있음을 알 수 있다. Fig. 4에 낙본 D와 낙본 I의 유량모의 결과를 도시하였다.

구축된 모형을 이용하여 최근 10년간 일유량을 산정하였으며, 이 때 1999년 기상자료를 이용하여 모형을 먼저 실행하여 spin-up시킨 후, 2000~2009년 사이의 일 유량 자료를 도출하였다.

3.2.2. 최소분산비편향추정법과 연계된 7변수 대수 선형 모형을 이용한 오염부하량 추정

2004년부터 낙동강 오염총량관리 단위유역을 대상으로 유

Table 2. The values of MVUE R^2 for unit watershed in case of BOD, COD and TOC

Unit watershed	BOD	COD	TOC	Unit watershed	BOD	COD	TOC
NakbonA	0.7702	0.8911	0.9164	GeumhoA	0.8859	0.9706	0.9689
NakbonB	0.9173	0.9754	0.9740	GeumhoB	0.9359	0.9725	0.9859
BanbyeonA	0.9338	0.9864	0.8699	GeumhoC	0.8180	0.9524	0.9486
BanbyeonB	0.9604	0.9902	0.9898	NakbonG	0.8832	0.9679	0.9569
YongjeonA	0.9055	0.9784	0.9749	HoicheonA	0.8693	0.9678	0.9701
KilanA	0.9350	0.9853	0.9847	HwanggangA	0.8700	0.9414	0.9586
MicheonA	0.9460	0.9882	0.9853	HwanggangB	0.8213	0.9710	0.9511
NakbonC	0.8311	0.9742	0.9580	NakbonH	0.8475	0.9565	0.9437
NaeseongA	0.8256	0.9569	0.9472	NamgangA	0.8366	0.9602	0.9676
NaeseongB	0.8145	0.9587	0.9362	NamgangB	0.8937	0.9769	0.9696
GeumcheonA	0.9065	0.9640	0.9603	NamgangC	0.9297	0.9789	0.9595
YonggangA	0.8478	0.9508	0.9422	NamgangD	0.9079	0.9666	0.9672
IanA	0.8460	0.9483	0.9244	NamgangE	0.8639	0.9431	0.9532
ByeongseongA	0.8756	0.9647	0.9662	NakbonI	0.8912	0.9738	0.9523
WicheonA	0.9439	0.9788	0.9888	NakbonJ	0.8964	0.9694	0.9609
WicheonB	0.9099	0.9757	0.9752	MilyangA	0.9188	0.9851	0.9836
NakbonD	0.8285	0.9660	0.9551	MilyangB	0.7941	0.9463	0.9421
KamcheonA	0.8140	0.9371	0.9458	NakbonK	0.8971	0.9746	0.9676
NakbonE	0.8586	0.9628	0.9360	NakbonL	0.8869	0.9730	0.9694
NakbonF	0.8715	0.9670	0.9405	NakbonM	0.9694	0.9919	0.9939

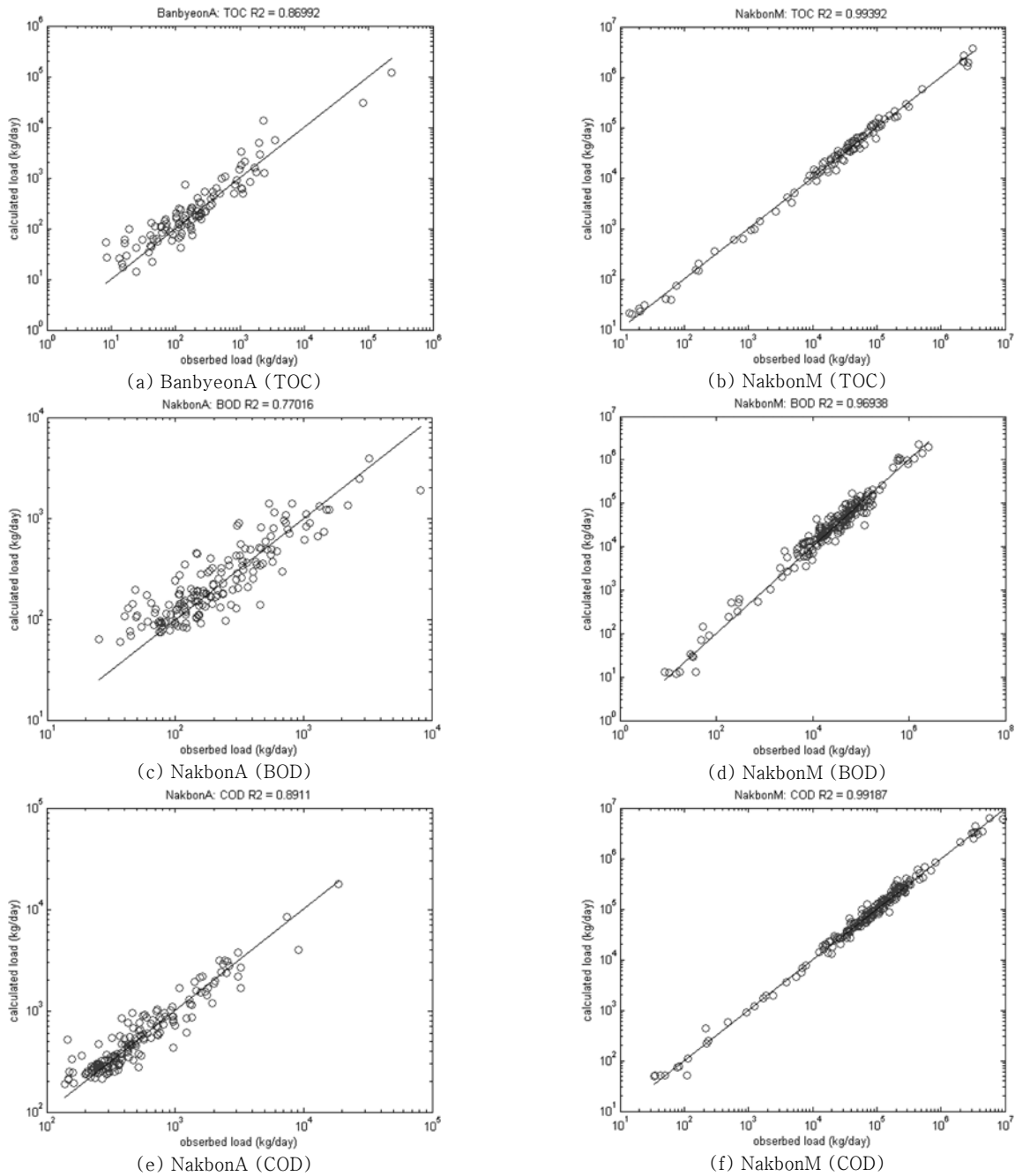


Fig. 5. Results for river water quality simulation.

량 및 수질을 8일 간격의 원칙으로 동시관측하고 있으며, TOC에 관해서는 2007년부터 관측을 실시하고 있다. 따라서 BOD와 COD의 경우 2004년부터, TOC의 경우 2007년부터 2009년까지 낙동강 40개 유역의 유량 및 수질 관측 자료를 반영하여 7변수 대수 선형 모형을 이용하여 각각의 부하량을 추정하였다.

Fig. 5에 일부 유역의 모의결과에 대한 정확도를 도시하였으며, 이는 결정계수값이 수질항목별로 최소인 유역과 최대인 유역이다. 낙본A는 Table 2에 최소분산비편향추정법을 이용한 TOC와 BOD, COD 부하량 추정 시의 회귀분석 정확도를 결정계수 R^2 를 통하여 제시하였다. 단위유역별로

편차는 있으나 평균적으로 TOC의 경우 $R^2 = 0.9585$, BOD의 경우 $R^2 = 0.8790$, COD의 경우 $R^2 = 0.9660$ 정도로 높은 정확도를 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

사전에 구축된 TANK 모형에서 모의된 최근 10년 일유량 자료를 바탕으로 최근 10년 일 부하량을 모의하였다. 또한 모의된 자료를 이용하여 유량 유향곡선을 작성하는 것과 같은 방법으로 부하량 유향곡선을 작성하였으며, 추가적으로 부하량 유향곡선을 영향면적으로 나누어 단위면적당 부하량 유향곡선(kg/day/km²)을 작성하였다. 전체 단위유역의 수질항목별 단위면적당 부하량 유향곡선이 완성되면 수질항목별로 40개 단위유역의 단위면적당 부하량 유향

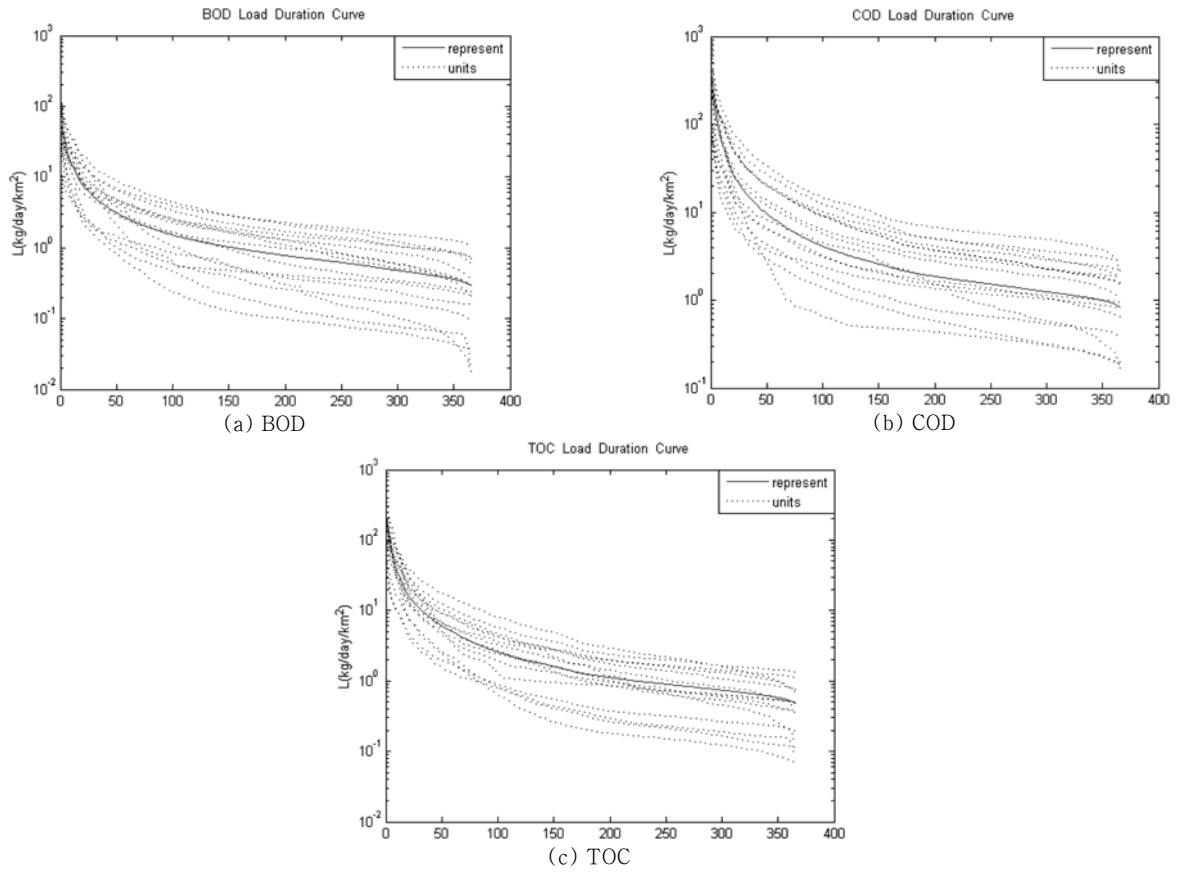


Fig. 6. Representative Load Duration Curve.

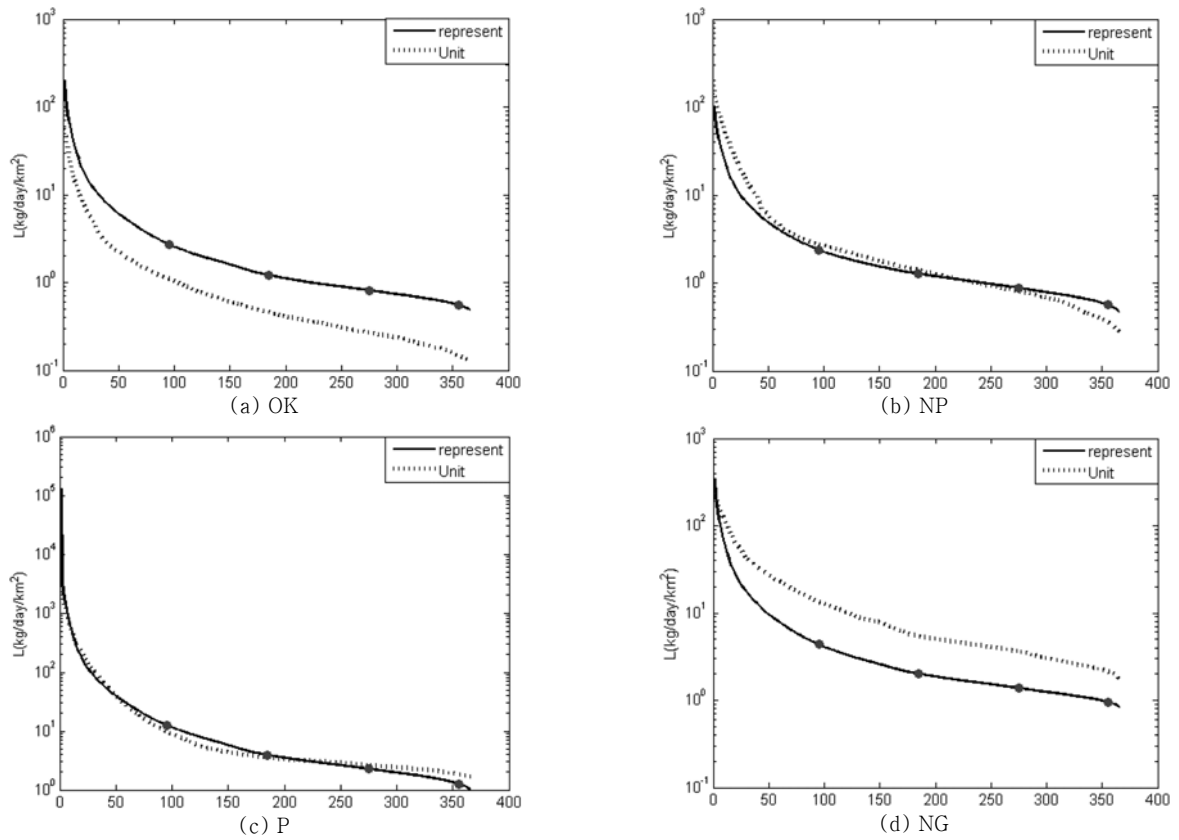


Fig. 7. Analysis of load duration curves.

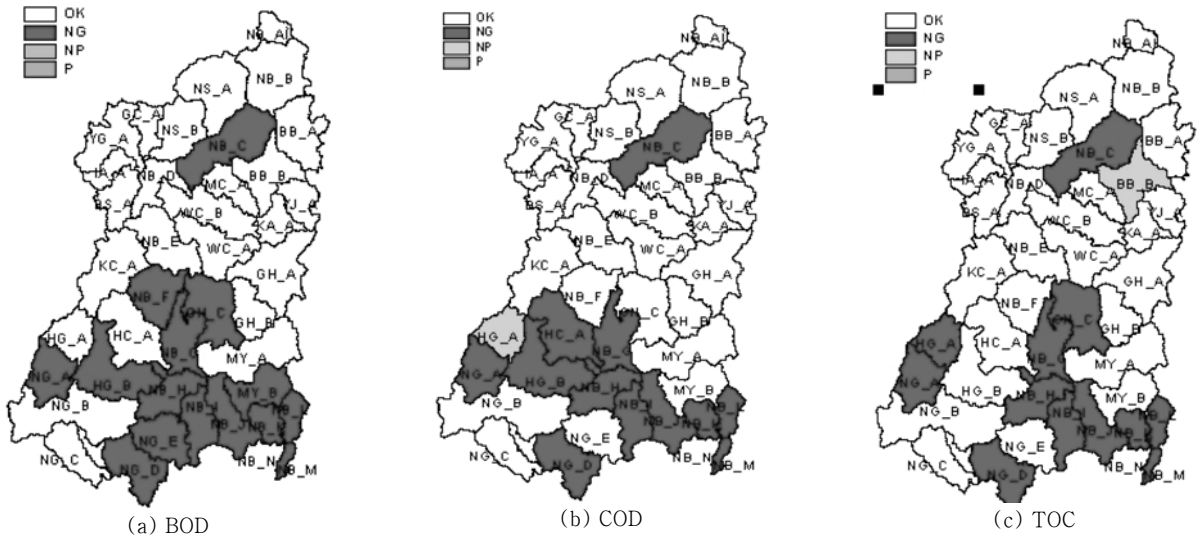


Fig. 8. Analysis of constituent load.

곡선을 산술평균하여 낙동강 유역을 대표하는 단위면적당 부하량 유향곡선을 산정하였다. Fig. 6에 40개 단위유역으로부터 계산된 단위면적당 부하량 유향곡선과 낙동강 유역 대표 단위면적당 부하량 유향곡선을 도시하였다.

대표 단위면적당 부하량 유향곡선을 기준으로 하여, 특정 단위유역의 단위면적당 부하량 유향곡선이 대표 단위면적당 부하량 유향곡선보다 아래쪽에 위치하면 ‘OK’, 위쪽에 위치하면 ‘NG’, 유량규모가 작은 경우(저수량 기준)에만 아래쪽에 위치하면 ‘NP’(비점오염원이 주 오염원인 유역), 유량규모가 큰 경우(평수량 기준)에만 아래쪽에 위치하면 ‘P’(점오염원이 주 오염원인 유역)로 분류 기준을 정하였으며(Fig. 7), 그 결과 도출된 낙동강 유역의 TOC 및 BOD, COD 부하량에 대한 전체적인 공간분포도를 Fig. 8에 도시하였다.

Fig. 8에서 살펴볼 수 있듯이 낙동강 상류에 해당하는 단위유역의 경우 OK인 지역이 많고 하류로 갈수록 NG인 단위유역이 많아지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 임하댐 상류의 반면 B의 TOC 경우는 유량규모가 작을 때는 대표 단

위면적당 부하량 유향곡선의 분포가 해당 단위유역의 곡선보다 아래쪽에 위치하지만 유량 규모가 큰 경우에는 위쪽에 위치하는 것으로 보아 상대적으로 비점오염원의 영향을 크게 받는 지역인 것으로 나타났다. 또한 낙본 C의 경우는 낙동강 상류 쪽에 위치하지만 다수의 지류 유입과 안동댐과 임하댐 방류의 영향으로 BOD, COD 및 TOC 모두 대표 단위면적당 부하량 유향곡선 보다 위쪽에 위치하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 경향은 Fig. 9~11에서도 확인할 수 있다.

낙본A~M까지 분류 단위유역의 년 평균, 4계절 평균 부하량을 각각 도시한 것으로 계절별로 차이가 존재하지만 낙본C까지 증가하다가 낙본D에서 소폭 감소 후 다시 말단부로 갈수록 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 오염 부하량의 축적으로 인한 영향으로 보인다. 예외적으로 낙본D에서는 감소하는 것은 안동댐 및 부하량이 낮은 다수의 지류의 유입으로 인한 오염 부하량의 축적보다는 희석의 작용이 우세하게 작용한 것으로 보인다.

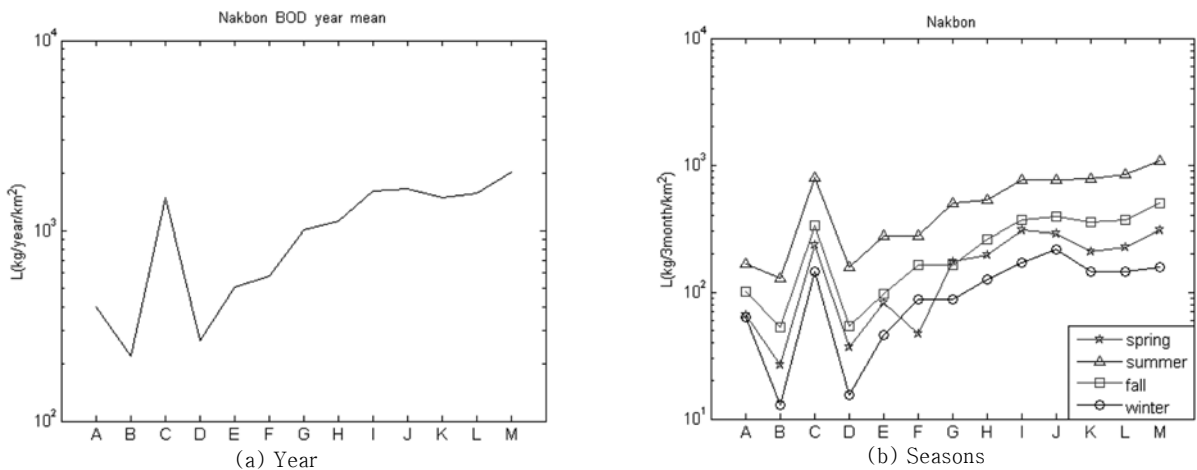


Fig. 9. Analysis of BOD load.

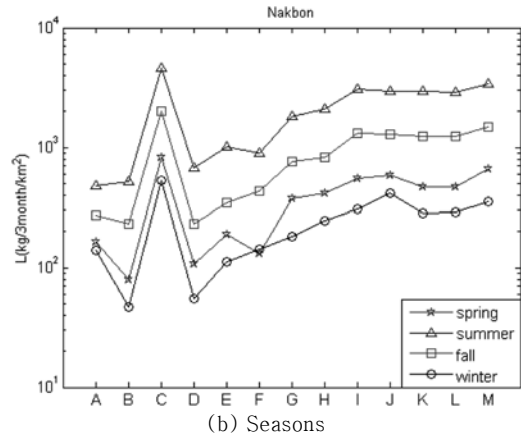
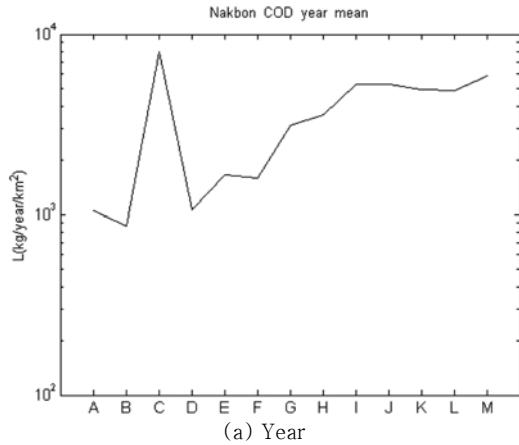


Fig. 10. Analysis of COD load.

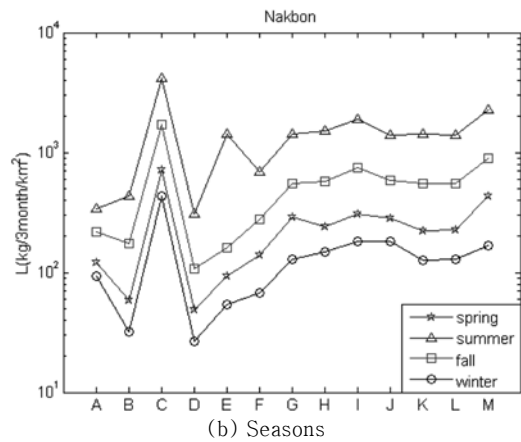
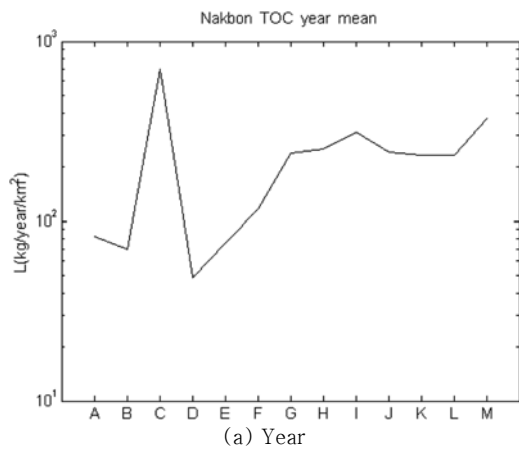


Fig. 11. Analysis of TOC load.

4. 결론

본 연구에서는 현재 가용한 자료의 수준을 바탕으로 전체 유량 조건과 그에 대응하는 수질조건을 반영하여 현재 유역의 상황을 개략적으로 평가할 수 있는 기법을 제안하고 이를 낙동강 유역에 적용하여 BOD, COD 및 TOC 부하량에 대한 전체적인 공간적 분포를 살펴보고, 이러한 공간적 분포 변화를 파악함으로써 추후 유역관리를 위한 기초 자료로 활용하고자 하였다.

이를 위하여 국립환경과학원 낙동강물환경연구소에서 제공하는 낙동강 오염총량관리 단위유역 말단부에서 8일 간격으로 관측해오고 있는 하천 유량 및 수질자료를 이용하여 각 단위유역별 유량 유향곡선 및 유량-부하량 관계를 결정하고, 이를 바탕으로 부하량 유향곡선을 구축하고자 하였다. 또한 각 단위유역별 수질항목별 대표 부하량 유향곡선을 산정하여 각 단위유역별 부하량을 비교해보고 개략적인 유역관리의 방향으로서 낙동강 전체 유역을 점 오염 및 비점오염원이 주 오염원인 지역을 평가를 시도하였다.

본 연구에서는 수정 TNAK 모델을 통하여 낙동강 유역의 유황이 분석을 실시하였다. 분석결과, 결정계수 R^2 평균 값 = 0.8498, NSC 평균 값 = 0.7896으로 모의된 일 유량과 실제

유량간의 높은 재현성을 확인할 수 있었다. 이에 산정된 매개변수를 적용하여 낙동강 유역의 최근 10년 일유량을 산정 시도하였다.

부하량의 추정에서는 7변수 대수 선형 모델을 통해 유량 변동, 시간 및 계절변동이 고려된 수질농도 변화를 추정하고, 이를 최소분산비편향 추정기법에 적용하여 유량과 수질농도의 관계식에서 부하량을 도출하였다. 그 결과 단위유역별로 편차는 있으나 평균적으로 TOC의 경우 $R^2=0.9585$, BOD의 경우 앞서 도출된 일유량 자료를 입력 자료로 하여 7변수 대수 선형모형에 적용시켜 최근 10년의 일 부하량 자료를 산정하였다.

본 연구를 통하여 파악된 부하량 유향곡선은 해당 지점의 현재 전체적인 수질현황을 확률적으로 파악할 수 있음과 동시에 이를 시각적으로 도시할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 본 연구에서 적용한 낙동강 유역 대표 단위면적당 부하량 유향곡선은 단위유역별로 계산된 곡선의 산술평균에 의해 도출되었기 때문에, 보다 정확한 대표 곡선 도출을 위한 추가 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 이러한 모형 및 기법의 적용 시에 필수적인 관측 자료의 지속적인 확보가 요구되며 BOD, COD 및 TOC 이외의 수질항목에 대한 적용 가능성도 검토가 필요할 것이다.

사 사

본 연구는 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2009-0071549).

참고문헌

1. Chon, T. A., "Recent advances in statistical methods for the estimation of sediment and nutrient transport in rivers," *U.S. Natl. Rep. Int. Union Geod. Geophys. 1991-1994, Rev. Geophys.*, **33**, 1117~1124(1995).
2. Government Accountability Office, Water quality: Improved EPA guidance and support can help states develop standards that better target cleanup efforts, *Tech. Rep. GAO-03-308*, Washington, D.C.(2003).
3. National Research Council, *Assessing the TMDL Approach to Water Quality Management*, 109 pp., Natl. Acad. Press, Washington, D.C.(2001).
4. Chon, T. A., "Estimating contaminant loads in rivers: AN application of adjusted maximum likelihood to type 1 censored data," *Water Res.*, **41**(7), W07003.1~W07003.13(2005).
5. Chon, T. A., DeLong, L. L., Gilroy, E. J., Hirsch, R. M. and Wells, D. K., "Estimating constituent loads," *Water Res.*, **25**(5), 937~942(1989).
6. Chon, T. A., Calder, D. L., Gilroy, E. J., Zynjuk, L. D. and Summers, R. M., "The validity of a simple statistical model for estimating fluvial constituent loads: An empirical study involving nutrient loads entering Chesapeake Bay," *Water Res.*, **28**(9), 2353~2364(1992).
7. 한수희, 신현석, 김상단, "낙동강 유역관리를 위한 부하량 유허곡선의 적용 가능성," *한국물환경학회지*, **23**, 620~627 (2007b).
8. 김재철, 김상단, "오염총량관리 유량측정자료를 이용한 낙동강 유역 유허분석," *한국물환경학회지*, **23**(3) 332~338 (2007).
9. 한수희, 강두기, 신현석, 유재정, 김상단, "비편향 회귀분석 모형을 이용한 낙동강 분류 부유사량 산정방법의 신뢰도 향상," *한국물환경학회지*, **23**, 251~259(2007a).
10. Colby, B. R., "The relationship of sediment discharge to streamflow," *Technical Report*, U.S. Geol. Surv., Reston, Va, (1955).
11. Miller, C. R., "Analysis of flow-duration, sediment-rating curve method of computing sediment yield, technical report," U.S. Bur. of Reclam., Washington, D.C.(1951).
12. Finney, D. J., "On the Distribution of a Variate Whose Logarithm Normally Distributed," *J. R. Stat. Soc. Suppl.*, **7**, 155~161(1941).
13. Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V., "River flow forecasting through conceptual models part 1-A discussion of principles," *J. Hydrol.*, **10**, 282~290(1970).