

# 7변수 대수선형모형을 이용한 낙동강 오염부하량 추정

## Seven-Parameter Log Linear Model for Estimating Constituent Loads in Nakdong River

이 아 연\* / 최 대 규\*\* / 김 상 단\*\*\*  
Lee, A Yeon / Choi, Dae Gyu / Kim, Sang Dan

### Abstract

In this study the flow duration curves and load duration curves for Nakdong river basin are analyzed. The TANK model is used as a hydrologic simulation model whose parameters are estimated from 8-days intervals flow data measured by Nakdong River Water Environment Laboratory. also in this study a Minimum Variance Unbiased Estimator(MVUE) is confirmed that it provides satisfactory load estimate. The Seven-Parameter Log Linear Model for estimating Total Organic Carbon(TOC) and Biochemical Oxygen Demand(BOD) loads in Nakdong river using a MVUE.

**Key words** : TANK, MVUE, 7-Parameter Log Linear Model

### 요 지

본 연구에서는 현재 시행되고 있는 오염총량관리제 모니터링 시스템에 적용가능한 부하량 추정기법에 대하여 제시하였다. 수정 TANK 모형을 통하여 8일 간격 유량자료의 1일 간격 유량자료로의 확장을 시행하였다. 그리고 최소분산 비편향 추정기법을 통한 7변수 대수 선형 모형으로 오염 부하량을 추정하였다. 그 결과 TOC 및 BOD 부하량 추정에서 만족스러운 결과를 확인할 수 있었다. 연구의 적용의 일환으로, 낙동강유역의 TOC 및 BOD 항목의 부하량 유행 곡선을 작성하여 전체적인 분포를 살펴보았다.

**핵심용어** : 유량유행곡선, 부하량유행곡선, 총유기탄소, 오염총량관리제

### 1. 서론

하천의 오염원에 대한 모니터링은 유역을 대상으로 하는 학문적 연구뿐만 아니라 유역관리를 위한 유용한 수단이다(Cohn, 1995; National Research Council, 2001; Government Accountability Office, 2003). 그러나 일반적으로 오염원 이송에 대한 직접적인 측정은 쉽지 않은 것이 사실이다.

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(Cohn et al., 1989). 따라서 하천을 통해 유입되는 오염 부하량의 효율적인 추정기법이 연구될 필요가 있으며, 이를 이용하여 보다 과

\* 부경대학교 환경공학과 석사과정 · E-mail : dkdusdlek@nate.com

\*\* 부경대학교 환경공학과 박사과정 · E-mail : aidhim@nate.com

\*\*\* 정회원 · 부경대학교 환경공학과 교수 · E-mail : skim@pknu.ac.kr

학적인 부하량 산출이 이루어질 필요가 있다(Cohn et al., 1992).

이에 본 연구에서는 현재 가용한 자료의 수준을 바탕으로 하천에서의 일 단위 오염부하량을 추정할 수 있는 기법을 제안하고 그에 대한 적용 가능성을 살펴보고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1 TANK 모형을 이용한 일 유량 추정

환경부에서는 수질오염총량관리 기본방침에 따라 수질오염총량관리 목표수질지점에 대한 수질·유량조사를 실시하고 있으며 수질·유량측정망 등 DB 및 웹 시스템에서 8일 간격 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. 본 연구에서는 하도추적기능과 증발산량 모의기능 추가된 4단 TANK 모형을 구축하였다. 또한 단위유역별로 환경기초시설의 방류수 및 취수량 자료가 일 유량 모의 시에 고려되도록 하였으며, 농업용수 취수에 의한 영향은 5월에서 9월에만 적용하였다.

### 2.2 최소분산비편향추정법과 연계된 7변수 대수 선형 모형을 이용한 부하량 추정

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 TOC 및 BOD의 일 부하량을 산출해 보고자 한다. 이 때, 7변수 대수 선형 모형의 매개변수 추정을 위하여 최소분산비편향추정법(한수희 등, 2007)이 적용되었다.

7변수 대수 선형 모형의 기본 식은 아래와 같으며, 7개의 매개변수가 적절히 산정되면 오염원 농도의 유량변동에 대한 영향, 계절변화의 영향 및 시간변동의 영향을 살펴볼 수 있게 된다.

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

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

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

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

국립환경과학원의 수질·유량측정망 등 DB 및 웹 시스템에서 제공하는 유량 및 수질 농도 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.

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

여기서,  $C$ 는 농도이며,  $K_u$ 는 단위환산계수이다.

Finney(1941)의 연구를 기반으로 하여 Braud 등(1970)은 최소분산비편향추정법(Minimum Variance Unbiased Estimator, MVUE)을 제안하였으며, 기본적인 식의 형태는 아래와 같다.

$$\hat{L}_{MVUE} \equiv \hat{L}_{RC} \cdot g_m((1 - h_E(t))s^2/2) \quad (5)$$

여기서,  $m$ 은 회귀식의 자유도이며,  $g_m$ 은 아래와 같다.

$$g_m(t) \equiv 1 + t + \frac{m}{m+2} \frac{t^2}{2!} + \frac{m^2}{(m+2)(m+4)} \frac{t^3}{3!} + \dots \quad (6)$$

### 3. 연구결과

#### 3.1 일 유량 모의 결과

낙동강 유역을 대상으로 2004~2009년 일 강수량, 일 잠재증발산량 및 8일 간격 관측 유량 자료를 이용하여 TANK 모형의 매개변수를 추정하였다. 또한 관측 자료의 재현 여부를 보다 정량적으로 판단하기 위하여 모의자료와 관측자료 사이의 통계적 상관성을 관측 자료와 모의 자료 사이의 회귀분석 결과 도출된 결정계수  $R^2$ 와 Nash 등(1970)에 의해 제안된 계수인 NSC(Nash-Sutcliffe Coefficient)를 통해 살펴보았다. 그 결과 평균적으로 결정계수  $R^2=0.8498$ , NSC=0.7896으로 우수하게 관측유량자료를 재현하고 있음을 알 수 있다. Fig. 1.에 낙본 D와 낙본 I의 유량모의 결과를 도시하였다.

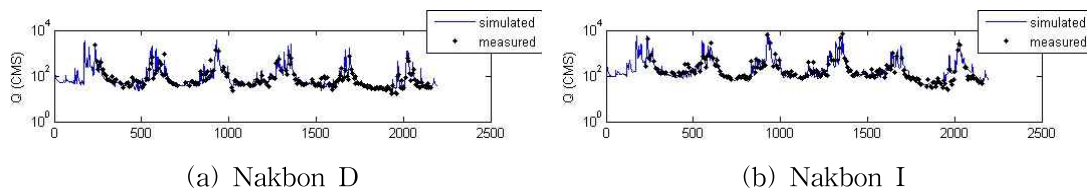


Fig. 1. Result of river flow simulation.

또한 연구의 확장으로 구축된 모형을 이용하여 최근 10년(2000~2009년)간 일 유량 자료를 도출하였다.

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

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

Fig. 2.에 일부 유역의 모의결과에 대한 정확도를 도시하였으며, 단위유역별로 편차는 있으나 평균적으로 TOC의 경우  $R^2=0.9585$ , BOD의 경우  $R^2=0.8790$  정도로 높은 정확도를 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

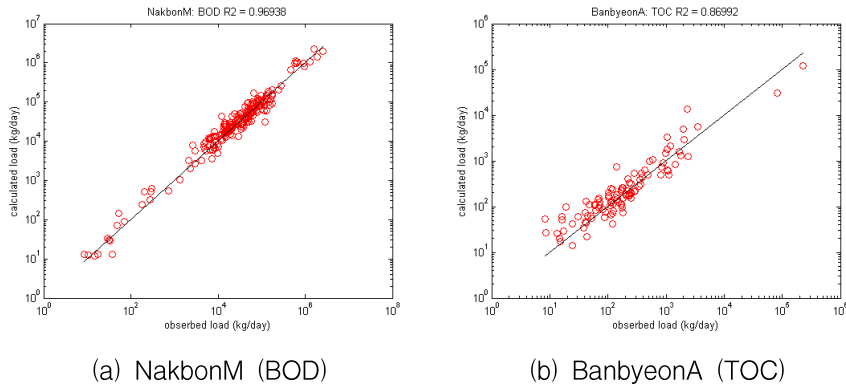


Fig. 2. Results for river water quality simulation

사전에 구축된 TANK 모형에서 모의된 최근 10년 일유량 자료를 바탕으로 최근 10년 일 부하량을 모의하였다. 또한 모의된 자료를 이용하여 부하량 유향곡선을 작성하였으며, 추가적으로 부하량 유향곡선을 영향면적으로 나누어 단위면적당 부하량 유향곡선(kg/day/km<sup>2</sup>)을 작성하였다. 전체 단위유역의 수질항목별 단위면적당 부하량 유향곡선이 완성되면 수질항목별로 40개 단위유역의 단위면적당 부하량 유향곡선을 산술평균하여 낙동강 유역을 대표하는 단위면적당 부하량 유향곡선을 산정하였다.

대표 단위면적당 부하량 유향곡선을 기준으로 하여, 특정 단위유역의 단위면적당 부하량 유향곡선이 대표 단위면적당 부하량 유향곡선보다 아래쪽에 위치하면 'OK', 위쪽에 위치하면 'NG', 유량규모가 작은 경우에만 아래쪽에 위치하면 'NP'(비점오염원이 주 오염원인 유역), 유량규모가 큰 경우에만 아래쪽에 위치하면 'P'(점오염원이 주 오염원인 유역)로 분류 기준을 정하였으며, 그 결과 도출된 낙동강 유역의 TOC 및 BOD 부하량에 대한 전체적인 공간분포도를 살펴보았다.

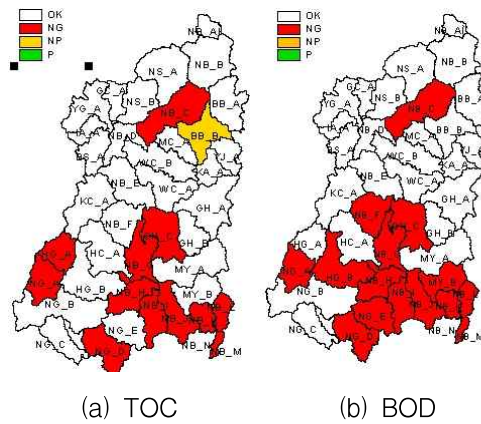


Fig. 3. Analysis of constituent load.

Fig. 3에서 살펴볼 수 있듯이 낙동강 상류에 해당하는 단위유역의 경우 OK인 지역이 많고 하류로 갈수록 NG인 단위유역이 많아지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 임하댐 상류의 반변 B의 TOC 경우는 유량규모가 작을 때는 대표 단위면적당 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 상류쪽에 위치하지만 다수의 지류 유입과 안동댐과 임하댐 방류의 영향으로 TOC 및 BOD 모두 대표

단위면적당 부하량 유행곡선 보다 위쪽에 위치하는 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

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 TOC 및 BOD 부하량에 대한 전체적인 공간적 분포를 살펴보고, 이러한 공간적 분포 변화를 파악함으로써 추후 유역관리를 위한 기초자료로 활용하고자 하였다. 또한 각 단위유역별 수질항목별 대표 부하량 유행곡선을 산정하여 각 단위유역별 부하량을 비교해보고 개략적인 유역관리의 방향으로서 낙동강 전체 유역을 점 오염 및 비점오염원이 주 오염원인 지역을 평가해보고자 하였다.

본 연구를 통하여 파악된 부하량 유행곡선은 해당 지점의 현재 전체적인 수질현황을 확률적으로 파악할 수 있음과 동시에 시각적으로 도시할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 본 연구에서 적용한 낙동강 유역 대표 단위면적당 부하량 유행곡선은 단위유역별로 계산된 곡선의 산술평균에 의해 도출되었기 때문에, 보다 정확한 대표 곡선 도출을 위한 추가 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 TOC 및 BOD 외의 수질항목에 대한 적용 가능성도 검토가 필요할 것이다.

#### 참 고 문 헌

- 한수희, 강두기, 신현석, 유재정, 김상단 (2007) "비편향 회귀분석모형을 이용한 낙동강 본류 부유사량 산정방법의 신뢰도 향상" **수질보전 한국물환경학회지**, 제23권, pp. 251-259
- Bradru, D. and Mundlak, Y. (1970) "Estimation in Lognormal Linear Models" *J. Am. Stat. Assoc.*, Vol. 65, No. 329, pp. 198-211.
- Chon, T. A. (1995). "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.*, Vol. 33, 1117-1124.
- Chon, T. A. (2005) "Estimating contaminant loads in rivers: AN application of adjusted maximum likelihood to type 1 censored data" *Water Resour. res.*, Vol. 41, No. 7, pp. W07003.1-W07003.13
- Chon, T. A., D.L. Caulder, E. J. Gilroy, L. D. Zynjuk, and R. M. Summers. (1992) "The validity of a simple statistical model for estimating fluvial constituent loads: An empirical study involving nutrient loads entering Chesapeake Bay" *Water Resour. res.*, Vol. 28, No. 9, pp. 2353-2364
- Chon, T. A., L.L. DeLong, E. J. Gilroy, R. M. Hirsch, and D. K. Wells (1989) "Estimating constituent loads" *Water Resour. Res.*, Vol. 25, No. 5, pp. 937-942.
- Finney, D. J. (1941) "On the Distribution of a Variate Whose Logarithm Normally Distributed" *J. R. Stat. Soc. Suppl.*, Vol. 7, pp. 155-161.
- Government Accountability Office. (2003) "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.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970) "River flow forecasting through conceptual models part 1-A discussion of principles" *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 282-290.
- National Research Council. (2001) "Assessing the TMDL Approach to Water Quality Management" *NATIONAL ACADEMY PRESS Washington, D.C.*