

낙동강 오염총량관리 단위유역 유달율 경험공식

김문성 · 신현석* · 박주현** · 김상단†

부경대학교 환경시스템공학부
*부산대학교 사회환경시스템공학부
**국립환경과학원 물환경연구부

Empirical Equation for Pollutant Loads Delivery Ratio in Nakdong River TMDL Unit Watersheds

Mun Sung Keem · Hyun Suk Shin* · Ju Hyun Park** · Sangdan Kim†

Department of Environmental System Engineering, Pukyong National University

*Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

**Water Environment Research Department, National Institute of Environmental Research

(Received 3 February 2009, Revised 10 June 2009, Accepted 11 June 2009)

Abstract

In this study daily flow rates and delivered pollutant loads of Nakdong river basin are simulated with modified TANK model and minimum variance unbiased estimator. Based on the simulation results, flow duration curves, load duration curves, and delivery ratio duration curves have been established. Then GIS analysis is performed to obtain several hydrological geomorphic characteristics such as watershed area, stream length, watershed slope and runoff curve number. Finally, multiple regression analysis is carried out to estimate empirical equations for pollutants delivery ratio. The results show that there is positive relation between the flow rates and delivery ratios, and the proposed empirical formulas for delivery ratio can predict well river pollutant loads.

keywords : Delivery ratio, Multiple regression analysis, Pollutant loads, TMDL

1. 서론

최근 낙동강 유역의 산업 및 주변 환경이 복잡하고 광역 화됨에 따라 환경오염 원인 또한 다양해지고 있어(윤영삼 등, 2003) 수질 관리에 어려움이 따르고 있다. 하지만 하천 수질은 근본적으로 하천에 유입되는 오염물질의 절대적인 양에 의해 결정되므로 효과적인 수질관리를 위해서는 하천으로 유입되는 오염물질 부하량을 정확하게 파악하는 것이 필수적이라 할 수 있다(박지형 등, 2007). 하천으로 유입되는 오염물질의 양(즉, 배출부하량)은 일반적으로 유역 내의 오염원 정보로부터 원단위법에 기초하여 계산된다. 하지만 동일한 배출부하량을 갖는 유역이라도 오염물질의 유출 경로나 지형조건, 토지 피복 형태, 시기별 수문 특성 등에 따라 실제 하천에 유입되는 부하량이 다르게 나타나며, 따라서 효과적인 유역관리를 위한 신뢰성 있는 하천 수질 모형을 구축하기 위해서는 오염 물질의 유출특성을 고려하여 하천에 유입되는 부하량을 정확하게 산출할 필요가 있다(하성룡과 배명순, 2003). 이를 위하여 현재 오염원으로부터 하천으로 유입되는 배출부하량과 해당 유역의 출구까지 도달한

부하량인 유달부하량과의 관계를 나타내는 유달율에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다(박지형 등, 2007; 손명기 등, 1995; 윤영삼 등, 2007a, 2007b; 하성룡과 배명순, 2003).

유달율을 산정하는 방법으로는 침식 토양을 이용한 방법, 합리식의 유출계수를 이용하는 방법, 통계적인 이론을 이용하는 방법, 실측치에 의한 방법, 유역모형을 이용한 방법 등 다양하다. 그 중에서도 유역 모형을 이용한 방법이 유역의 지형적 특성과 수리 수문학적 특성을 고려할 수 있고 오염원의 공간적 분포 특성 반영, 비점오염원 유출 구조 반영 등의 장점으로 많은 연구가 이루어져 왔으나(김만식과 정승권, 2007; 류덕희 등, 2008; 임상준, 2000; Mostaghini et al., 1997), 유역 모형에 대한 전문적인 지식이 요구되고 입력 자료의 제한성 때문에 보편적으로 사용되지 못하는 한계점이 있어 왔다(박지형 등, 2007). 이러한 한계점을 극복하기 위하여 실측자료를 통해 유달부하량을 배출부하량으로 나누는 단순 부하량비 기법이 널리 사용되어 왔으나(손명기 등, 1995), 이 방법 역시 유량과 수질을 동시에 측정할 수 있는 자료들이 많지 않은 관계로 미세측 유역에서의 유달율 산정이 불가능하다는 한계점을 지니고 있다. 또 단순비로서 유달율이 산정되기 때문에 유역의 자정능력이나 수리·수문학적 특성을 반영하지 못한다는 단점도 아울러 내포하고 있다. 최근 이러한 한계점을 극복하기 위하여 지형

† To whom correspondence should be addressed.
skim@pknu.ac.kr

특성정보를 이용한 연구들이 수행되고 있으나(배명순, 2003; Ha et al., 1998) 이 또한 단일 유량 값만 고려하고 있어 특정 기준유량에 대한 유역관리에는 효과적으로 적용될 수 있겠으나 전체 유량 변동에 따른 유달부하량의 변화를 파악할 수 없는 한계를 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 국립환경과학원 낙동강물환경연구소에 의해 2004년 하반기부터 낙동강 오염총량관리 단위유역 말단부에서 8일간격으로 관측해오고 있는 하천 유량 및 수질자료를 일 단위의 유량·수질 자료로 확장·모의하여 유역별로 전체적인 유량변동의 영향을 파악할 수 있도록 유량 유향곡선(Flow Duration Curve, FDC)과 부하량 유향곡선(Load Duration Curve, LDC)를 작성하였으며 이를 이용하여 일 단위 유달을 및 유달부하량을 모의하고 유달을 유향곡선(Delivery Ratio Duration Curve, DRDC)를 작성하여 유량 변동에 따른 유달의 변화를 분석하였다. 또한 오염물질의 이송에 영향을 미치는 유역 면적, 하천 길이, 유역 경사, 토양 및 토지이용상태 등을 고려하여 낙동강 유역 전체를 대상으로 한 유달을 경험공식을 산정하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 대상 유역 및 입력 자료

본 연구는 낙동강 유역의 오염총량관리 단위유역을 대상으로 연구를 진행하였다. 다만, 유량모의 시에는 낙본N 단위유역의 경우 낙동강 본류에서 서낙동강으로 분기되는 유역으로 본 연구의 대상에서 제외하였으며, 유량 모의 시

낙동강 수계 내의 댐 방류 영향을 고려하기 위하여 낙본C, 반변B, 황강B, 남강C 단위유역 내에 각각 위치한 안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐 유역을 추가하여 총 44개 소유역을 대상으로 하였다. 유량 모의 모형의 입력자료 중 강수자료는 낙동강 유역의 총 24개 강수 관측망의 2000년부터 2008년 6월까지 일 강수자료를 티센면적가중평균을 적용하여 단위유역별 공간평균 강수자료를 구축하였다. 또 잠재증발산량은 2000년부터 2008년 6월까지 기상청의 일 상대습도, 기온, 풍속, 일조시간 자료를 바탕으로 Penman 방법을 통해 일 단위로 산정하여 입력하였으며, 국가수자원관리종합정보시스템(www.wamis.go.kr, 2008)에서 제공하고 있는 4개 다목적 댐의 일별 유입·방류량을 입력자료로 사용하였다. 유량 및 수질보정에 사용된 자료는 2004년부터 2008년 6월까지의 낙동강물환경연구소의 8일간격 유량·수질자료를 이용하였다. 주목할 것은 본 연구에서 최상류지역(낙본A, 반변A, 영강A, 금호A 등)을 제외한 단위유역의 분석시 상류 유역을 누가하여 분석하였다는 점이다. 예로써 낙본C의 유달부하량 및 유달을 모의 시 낙본C 단위유역 뿐 아니라 낙본A, 낙본B, 반변A, 영강A, 감천A, 반변B, 미천A 단위유역을 포함한 누가 면적, 최장 하천길이, 평균 유역경사, 누가 배출부하량 자료를 구축하여 유달부하량 및 유달을을 산정하고자 하였다. 이는 유달부하량 및 유달을 특성상 해당 단위유역의 배출부하량과 유출 특성뿐만 아니라 상류유역에서 유입되는 유입수의 부하량과 유출 특성 역시 해당 유역의 유달부하량에 영향을 미치기 때문이다. Fig. 1에 대상 유역의 단위 유역도를 도시하였다.

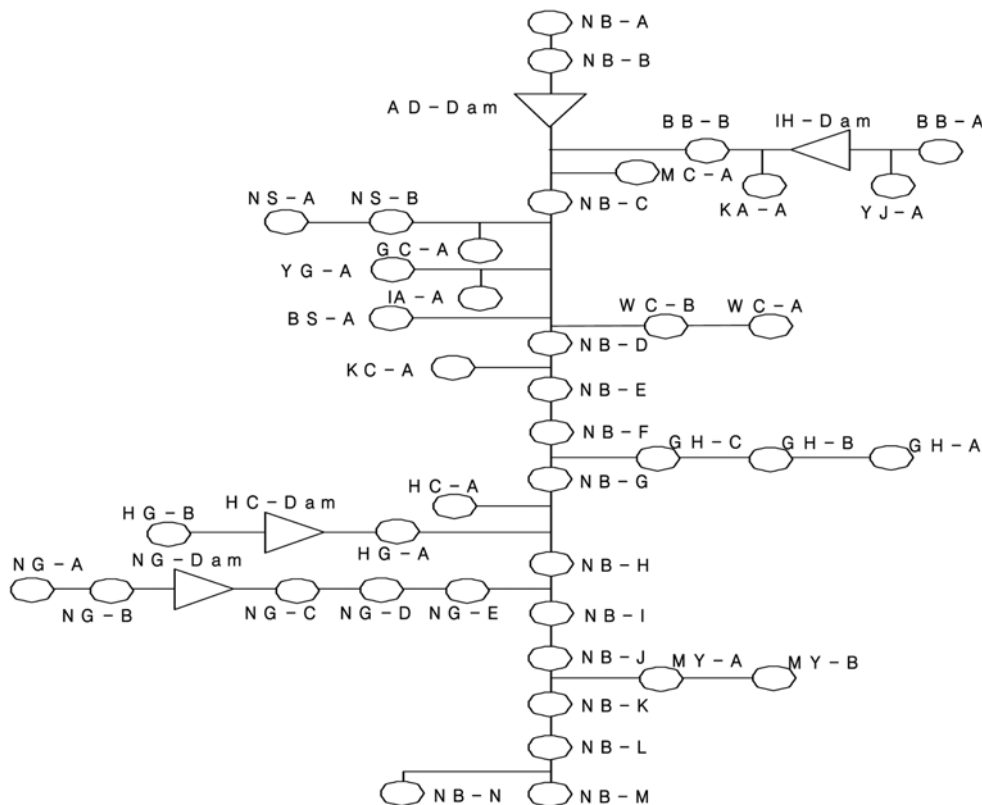


Fig. 1. Subbasins of study area.

2.2. 대상 유역 지형 인자 추출 및 배출부하량 산정

낙동강 유역의 지형 인자를 추출하기 위하여 30 m×30 m 격자망 DEM(Digital Elevation Model)정보와 ArcGIS를 이용하여 공간정보를 구축하였다. 지형정보로부터 하천망을 추출하기 위해서 DEM 정보의 함몰·돌출된 값을 수정한 다음, 각 셀의 고도 정보를 분석하여 흐름 방향을 결정한 후 지표면 이용 상태에 따른 유출 특성을 고려하기 위하여 강우유출에 대한 가중치를 토지 피복 형태에 따라 적용, 지형적 특성을 고려한 하천망을 생성하였다(하성룡과 배명순, 2003). 낙동강 오염 총량관리 41개 단위유역을 재현할 수 있도록 ArcGIS를 사용하여 소유역을 분할한 후, GIS를 이용하여 유역면적, 하천길이 및 평균 유역경사를 산정하였다. 하천길이는 DEM 정보로부터 추출된 수평 유역 하천길이와 평균 경사도를 이용하였다.

$$L_i = L_{DEM} \times \frac{1}{\cos \theta_i} \quad (1)$$

여기서, L_i 는 유역 하천 길이(km)이고, L_{DEM} 은 DEM으로부터 추출된 하천길이(km), θ_i 는 유역의 평균 경사도이다.

단위유역별 배출부하량은 낙동강 오염총량관리 기본계획(강원도, 2005; 경상남도, 2005; 경상북도, 2005; 대구광역시, 2004; 부산광역시, 2004)의 자료를 전용하여 사용하였다.

2.3. 단위유역별 유달을 산정

본 연구에서는 먼저 2004년부터 2008년 6월까지 낙동강 물환경연구소에서 오염총량관리 단위유역 별로 측정된 8일간격 유량자료와 티센 공간 평균 강수량, Penman 방법을 통한 잠재 증발산량 자료, 단위유역별 물수지 자료 등을 수정 TANK모형(김재철과 김상단, 2007)에 입력하여 일 단

위 유량자료로 확장·모의하였으며, 이를 바탕으로 유량 유황곡선(FDC)을 작성하였다.

한편, 하천 오염물질의 농도는 농도가 하천 유량에 크게 의존한다고 판단하여 대상 항목의 농도를 유량에 대한 비선형적 관계로 가정하여 추정하고자 하였다. 대상 항목은 BOD, TN, TP이며 추정을 위한 기본적인 식의 형태는 다음과 같다.

$$C = aQ^b \quad (2)$$

여기서 C 는 오염물질의 농도(ppm), Q 는 C 에 대응하는 하천유량(m^3/sec), a 와 b 는 회귀계수이다. 식 (2)는 양변을 대수화 함으로써 단순 선형회귀 분석으로 풀이가능하다. 하지만 이 경우 대수공간에서 실제 공간으로 변환하는 과정에서 심각한 오차가 발생된다(Ferguson, 1986, 1987; Koch and Smillie, 1986). 이를 보정하기 위하여 본 연구에서는 한수희 등(2007a)이 적용한 최소분산 비편향 추정기법(Minimum Variance Unbiased Estimator, MVUE)을 이용하여 편차가 보정된 유량-수질 관계곡선을 구축하였다. 단위유역별로 모의된 일 유량자료와 상기 유량-수질 관계곡선으로부터 일 유달부하량 자료를 구축하였으며 작성된 FDC상의 유량에 대응하는 부하량을 도시함으로써 오염원별 부하량 유황곡선(Load Duration Curve, LDC)을 작성하였다. 부하량 유황곡선 작성의 보다 상세한 방법은 한수희 등(2007b)을 참조할 수 있다.

모의된 단위유역별 일 유달부하량을 배출부하량으로 나눠줌으로써 일 단위 유달율을 산정할 수 있으며, 이를 바탕으로 유달율 유황곡선(Delivery Ratio Duration Curve, DRDC)을 작성하였다. 단위 유역별 유달율 산정 과정을 Fig. 2에 도식화하여 나타내었다.

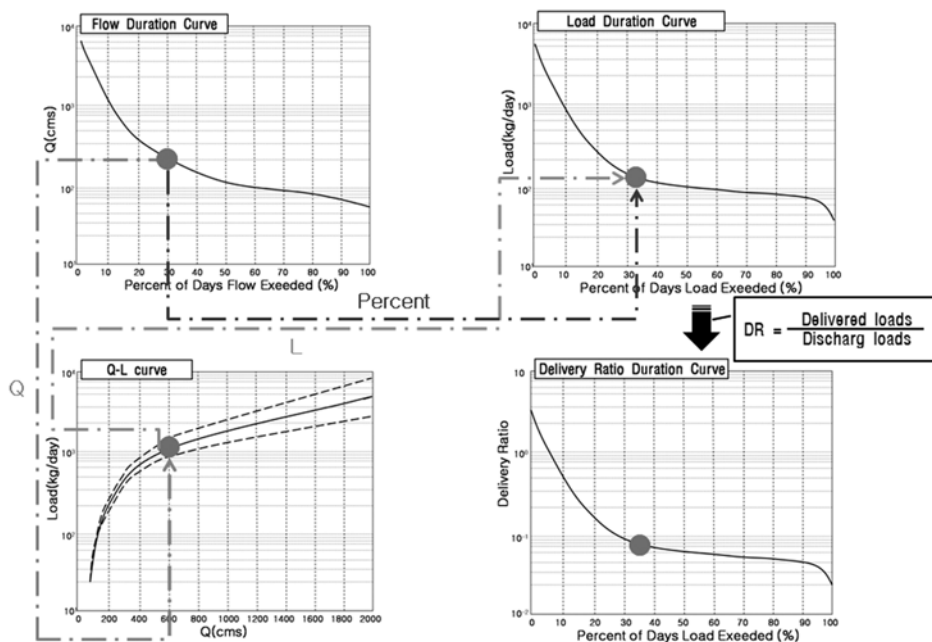


Fig. 2. Outline of simulating DRDC.

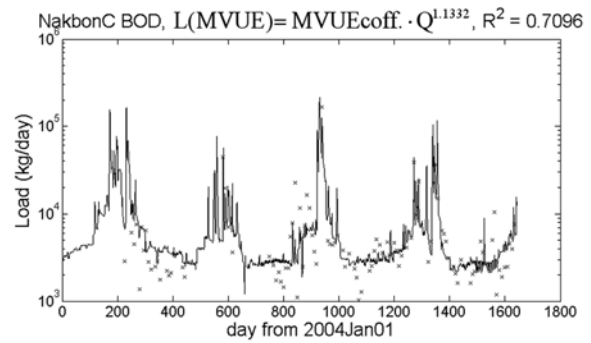
3. 결과 및 고찰

3.1. 단위유역별 유황별 유달을 산정 결과

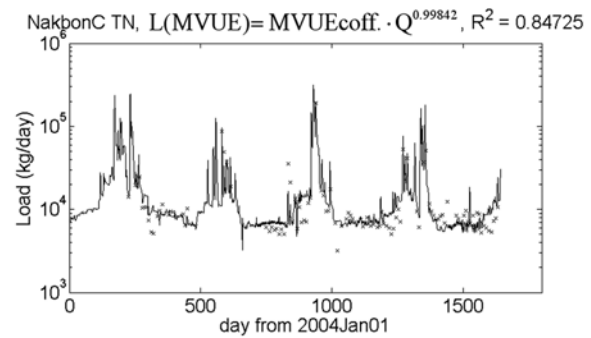
낙동강 유역의 44개 단위유역을 대상으로 한 유량 모의 결과 중 낙본C의 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 모의 결과의 관측 자료 재현여부를 정량적으로 분석하기 위해 결정계수 R^2 와 Nash and Sutcliffe(1970)가 제안한 모형효율계수 (Nash-Sutcliffe Coefficient, NSC)를 이용하였으며, 그 결과 모의된 단위유역별로 편차는 있으나 평균적으로 R^2 는 0.85, NSC는 0.78 정도로 비교적 우수하게 관측유량자료를 재현하고 있는 것으로 나타났다.

모의된 유량자료와 유량-농도 관계곡선을 이용하여 일 단위 유달부하량을 산정한 결과 중 낙본C 단위유역에 대한 BOD, TN, TP 모의 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 모의 결과 단위유역별로 편차가 존재하지만 평균적으로 BOD, TN, TP 각각 R^2 는 0.74, 0.87, 0.82, NSC는 0.72, 0.87, 0.80 정도로 관측 수질을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 단, TP모의의 경우 낙본 A의 자료가 다른 단위유역의 자료와 비교할 때, 매우 다른 경향을 나타내어 분석 대상에서 제외하였다.

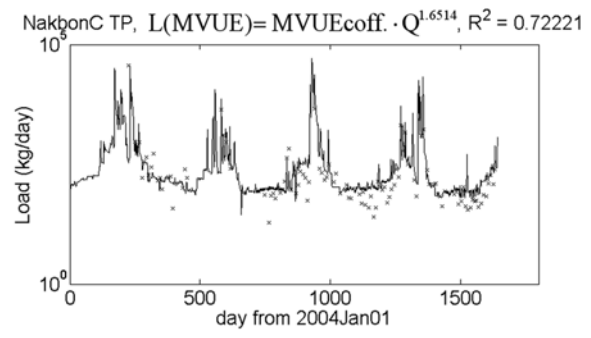
한편, 모의된 유량과 유달부하량의 일 변동성이 매우 크다는 것을 Fig. 3과 Fig. 4를 통해 알 수 있다. 이는 단일 유량과 유달부하량을 토대로 해당 단위유역의 유달을 추정하기에는 무리가 있으며 전체적인 유량·수질의 변동성을 고려할 필요가 있음을 보여주는 결과이다. 따라서 본 연구에서는 모의된 일 유량 및 부하량 자료를 토대로 전체 유량조건과 수질조건을 고려하여 그에 따른 유달부하량과 유달을 분석할 목적으로 단위유역별로 누가된 FDC, LCD 및 DRDC를 각각 구축하였다. 상기 결과 중 낙본C에 대한 FDC, LDC, DRDC를 Fig. 5에 도시하였다. 모의 결과 중 낙본 F의 BOD의 경우 풍수량, 평수량, 저수량, 갈수량에 대한 누가 유달을 결과가 각각 0.2161, 0.1074, 0.0799, 0.0339로 유량이 감소하면서 유달을 또한 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 6 참조). 이와 같은 결과는 TN, TP의 경우에도 동일하게 나타났으며 다른 단위유역에서도 같은 경향성을 나타내는 것으로 분석되었다. 이는 유량 증가로 인하여 하천 유속이 변화하고 이로부터 오염 물질의 이송을 증가와 하상 영양 물질의 재부상, 강우 시 비점오염물질과 자연 영양 물질의 하천 유입 등에 기인한 것으로 판단된다.



(a) BOD loads in NakbonC



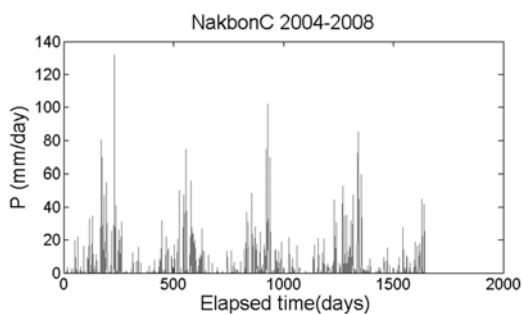
(b) TN loads in NakbonC



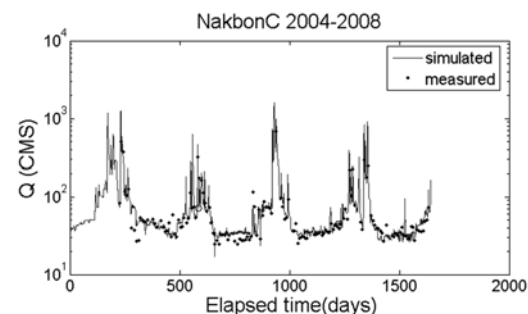
(c) TP loads in NakbonC

Fig. 4. Pollutant load simulation results (x: observed data, -: simulated data).

구축된 누가 단위유역별 4대 유황(풍수량, 평수량, 저수량, 갈수량)별 유달을 자료는 유량 변동에 따른 유달율의 변화를 반영하기 위하여 이후 유달을 경험공식의 개발 시에 독립변수로서 사용된다.



(a) Daily precipitation time series



(b) Flow rate simulation result

Fig. 3. Flow rate simulation result (NakbonC)

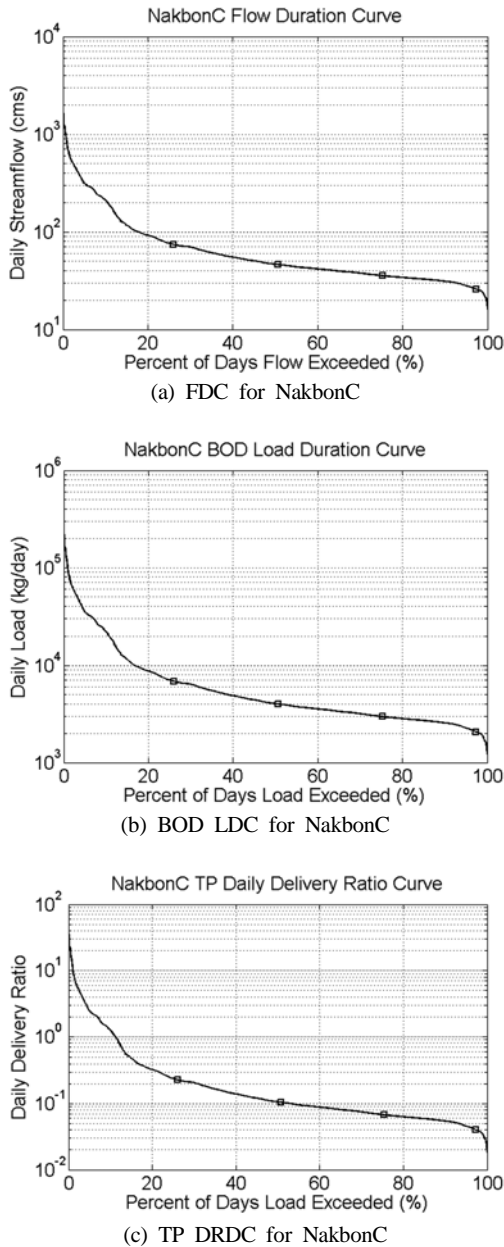


Fig. 5. FDC, LDC and DRDC in Nakdong river basin.

3.2. 유달을 경험공식

수계오염총량관리지침(국립환경과학원, 2008)에 따르면 유달율은 강우량, 강우강도, 강우지속시간 등 유역의 유달특성에 영향을 미치는 기상요인과 유역경사, 하천길이, 토양종류, 토지이용상태 등 유역의 물리적인 유달특성을 이용하여 회귀식 형태의 경험식을 산정하도록 권고하고 있다. 본 연구에서는 강우량과 같은 기상인자보다는 유량이 보다 유역의 특성을 보다 더 반영할 수 있다고 판단, 이를 이용하였고 유역면적, 하천길이, 하천경사, 유역평균 CN값을 물리적 인자로 채택하였으며 이외에 배출부하량을 추가하여 다중회귀분석을 통하여 경험식을 산정하고자 하였다. CN값의 경우 유역의 토양도와 토지이용도로부터 산출되는 바, 유역의 토지이용상태를 적절히 반영할 수 있는 지수라 판단하여 분석에 추가하였다.

특히 유량의 경우 그 변동에 따라 유달을 또한 다르게 나타나기 때문에(Fig. 6 참조) 각 누가 단위유역의 풍수량, 평수량, 저수량, 갈수량에 해당하는 유량을 회귀분석 시에 독립변수로 사용하였다. 유달을 경험공식 산정에 대한 전체적인 연구 흐름도를 Fig. 7에 나타내었다.

먼저 낙동강 40개 누가 단위유역의 오염원별 유행별 유달율과 다중회귀분석에 사용된 각각의 매개변수들과의 관계를 알아보기 위하여 식 (3)의 형태를 기준으로 단순회귀분석을 수행하였으며 그 결과 중 BOD의 유달율 추정 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

$$DR = \alpha(factor)^\beta \tag{3}$$

여기서 DR은 유달율, α , β 는 회귀분석에 의한 회귀계수이며 factor는 유달율에 영향을 주는 인자이다. 회귀식에 의한 추정값의 관측 자료 재현여부를 정량적으로 판단하기 위하여 결정계수 R^2 를 사용하여 나타내었으며 Fig. 8에 나타난 것처럼 유달율은 상기 각 매개변수 중 유량에 가장 크게 의존한 유달 특성을 지니고 있는 것으로 나타났다. 유량을 제외한 항목들의 경우는 관측자료의 재현성 및 그 신뢰도가 많이 떨어짐을 알 수 있었다. 이는 이들 매개변수의

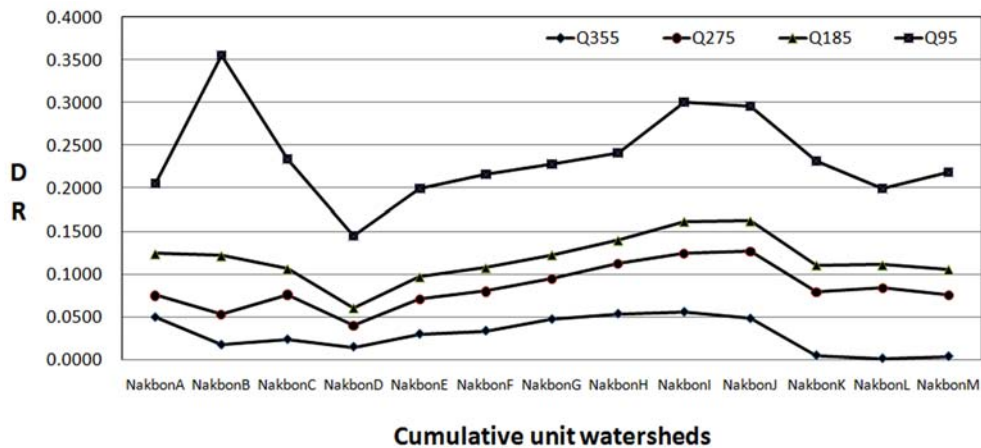


Fig. 6. BOD delivery ratios in case of Q_{355} , Q_{275} , Q_{185} and Q_{95} .

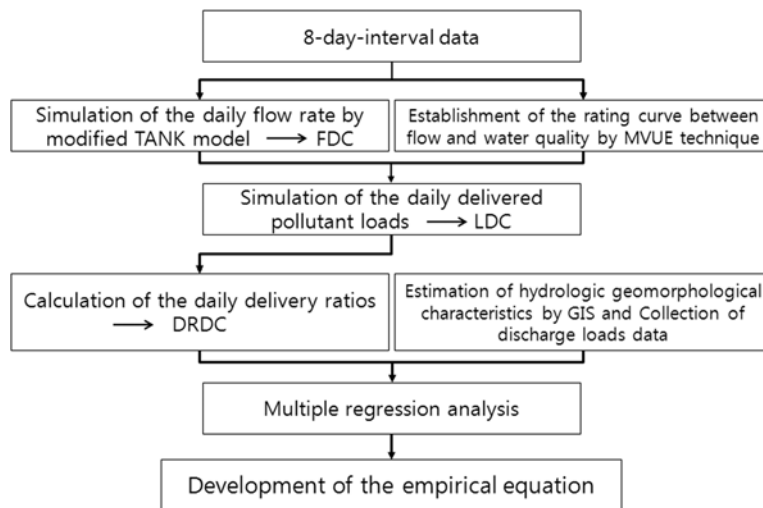


Fig. 7. Outline of developing the empirical equation for the delivery ratio.

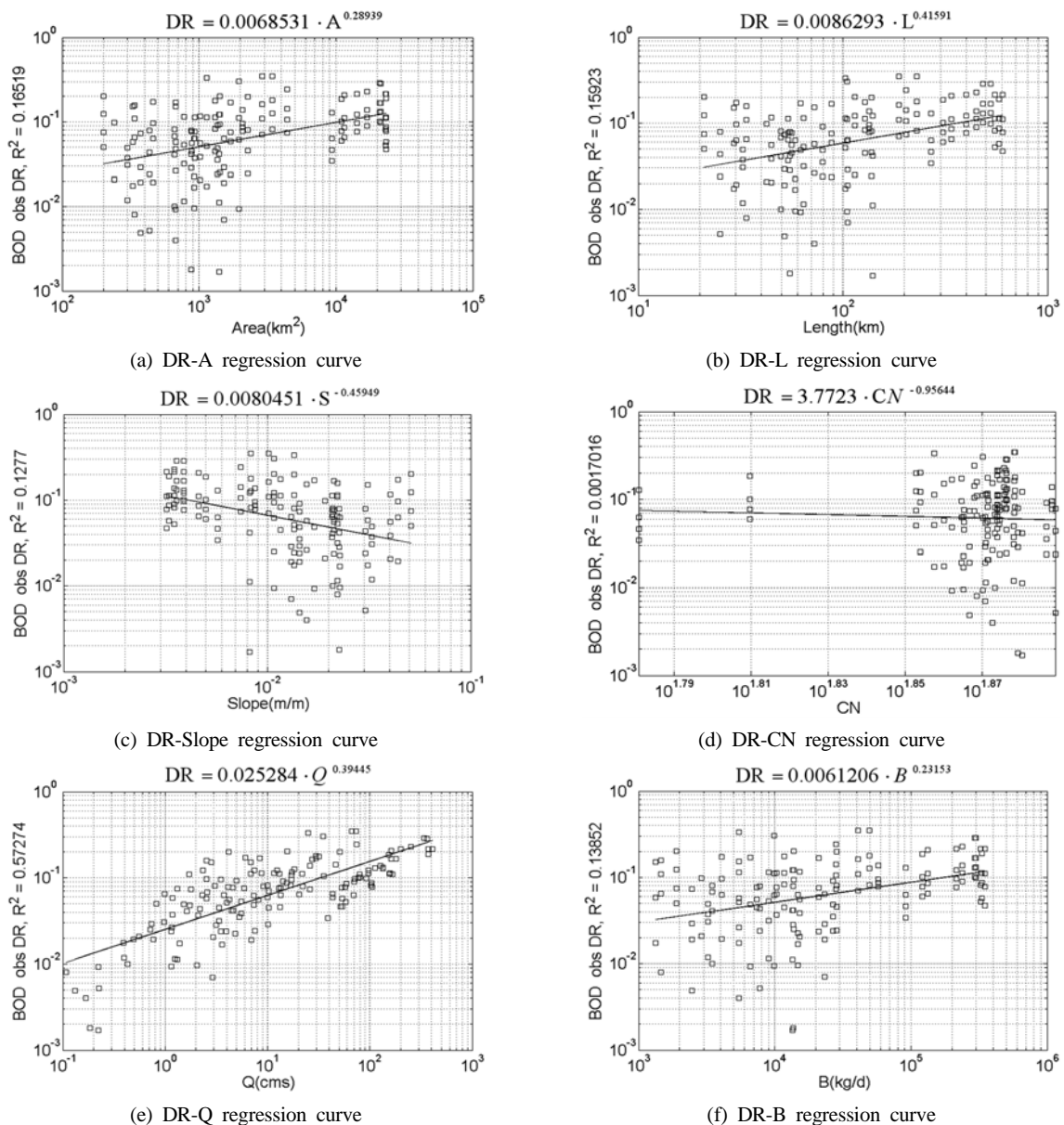


Fig. 8. Regression curves for BOD delivery ratio.

경우 지형 특성 및 배출부하량 자료로서 유량 변화에 따라 변동하는 유달율과는 상이하게 유량 변동 시에도 단위 유역별로 동일한 값을 지니고 있기 때문에 유달율의 변화를 설명할 수 없어 이러한 결과를 나타낸 것으로 판단된다.

결국 상기 변수들 중 하나를 단일 독립변수로 설정하여 유달율 경험공식을 산정할 수 없다고 판단하였으며, Fig. 8에 나타낸 변수 모두를 포함하여 식 (4)와 같은 다중 회귀식을 설정하여 유달율 경험공식을 산정해 보았다.

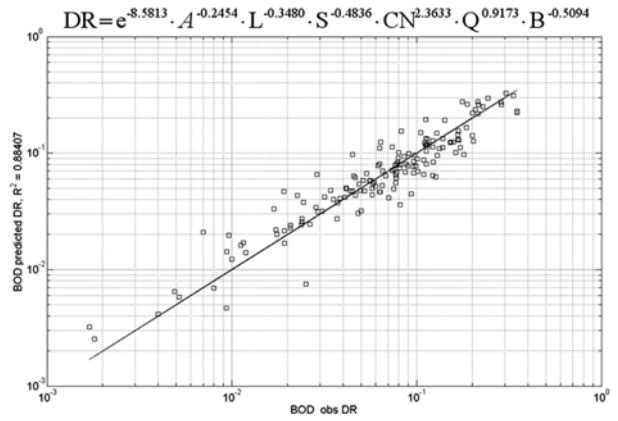
$$DR = aA^b L^c S^d CN^e Q^f B^g \quad (4)$$

여기서 DR은 유달율, *a, b, c, d, e, f, g*는 회귀분석으로부터 추정된 회귀계수이고 *A*는 누가 유역 면적(km²), *L*는 최장 하천 길이(km), *S*는 누가 유역 평균경사(m/m), *CN*은 누가 유역 평균 *CN*값, *Q*는 하천 유량(m³/sec), *B*는 누가 배출부하량(kg/day)이다. 이러한 다중회귀분석을 통하여 회귀식을 산정하는 경우, 독립변수들 간의 다중공선성 문제를 검정할 필요가 있으나 본 연구에서는 통계적 검정보다는 자료의 재현성에 초점을 맞추어 분석을 실시하였다. 추정 결과 BOD, TN, TP 각각의 경우 그 결정계수 *R*²가 0.89, 0.95, 0.74로 비교적 우수한 결과를 나타내었다(Fig. 9). 이러한 결과는 상기 매개변수들 중 유달율에 대한 기여도가 가장 큰 매개변수인 유량과 단일 매개변수로는 큰 영향을 차지하지 않았던 매개변수들이 상호 보완 작용을 하여 추정식의 관측자료 재현성을 높인 것으로 판단된다.

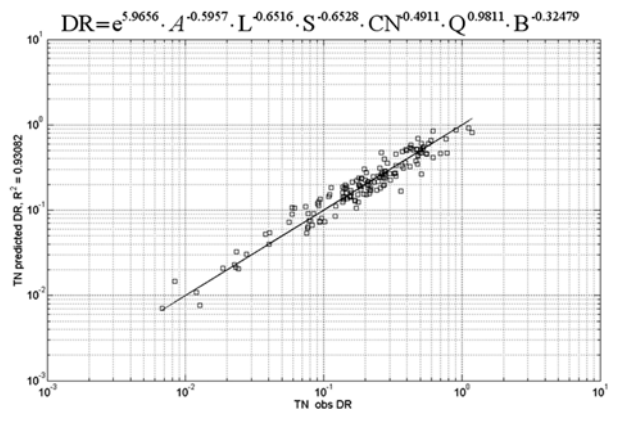
하지만 Fig. 9의 결과는 관측 자료의 재현성 여부는 만족스러우나 유달율 추정을 위한 회귀식의 독립변수가 다소 많아 그 효율성은 떨어진다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 위 결과를 바탕으로 각 매개변수의 추정된 회귀계수가 매개변수와 유달율 사이의 관계를 잘 재현하고 있는지 분석·판단하여 그 조건에 만족하는 매개변수를 대상으로 보다 단순화된 추정 공식을 산정하고자 하였다. 상기 매개변수 중 유역 면적과 하천길이는 그 크기와 길이가 증가할수록 유달율이 작게 산정되고(반비례 관계) 유역 경사와 *CN*, 유량 등은 그 크기가 증가할수록 유달율이 크게 산정되는(비례 관계) 것이 물리적으로 타당하다 할 수 있다. 추정된 회귀계수의 이러한 물리적인 유의성 반영 여부가 유효 매개변수 추출의 판단 근거로 사용되었다. 각 오염원별로 2변수, 3변수, 4변수, 5변수, 6변수의 총 57가지 경우에 대한 매개변수 조합 분석을 실시하였으며 그 결과 *A*와 *Q*를 매개변수로 하는 식 (5)과 같은 2변수 유달율 경험공식이 BOD, TN, TP 모두 공통적으로 가장 적합한 것으로 나타났다.

$$DR = aA^b Q^c \quad (5)$$

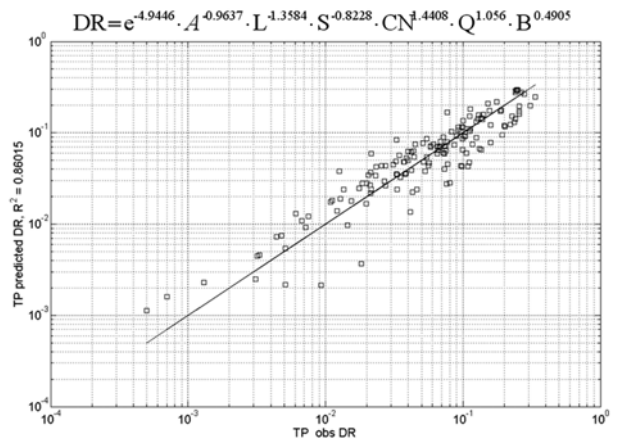
여기서 *a, b, c*는 회귀분석으로부터 추정된 회귀계수이고, *A*는 누가 유역 면적(km²), *Q*는 하천 유량(m³/sec)이다. BOD, TN, TP 각 항목별 모의 결과 실측 유달율과 추정 유달율 사이의 결정계수 *R*²가 0.85, 0.94, 0.72 정도였으며 (Fig. 10), 모든 매개변수를 사용한 경험공식의 결정계수(Fig. 9)



(a) BOD



(b) TN



(c) TP

Fig. 9. Results of multiple regression considering all factors.

보다는 다소 예측 정확도가 작아졌지만, 경험공식의 효율성을 고려하였을 때 그 차이는 무시할 수 있을 정도로 작다고 볼 수 있다. 이 정도의 상관관계라면 비교적 우수하게 관측 자료를 재현한다고 볼 수 있으며, 따라서 본 경험공식이 추후 낙동강 유역 내의 미계측 유역에 대한 유달율 산정에 충분히 기여할 것으로 판단된다. 또 낙동강 유역과 상이한 유역특성, 강우특성, 하천특성을 지니고 있는 유역에서도 본 연구 방법을 적용하여 미계측 유역에 대한 효율적인 유달율 경험공식을 산정 가능할 것으로 기대된다.

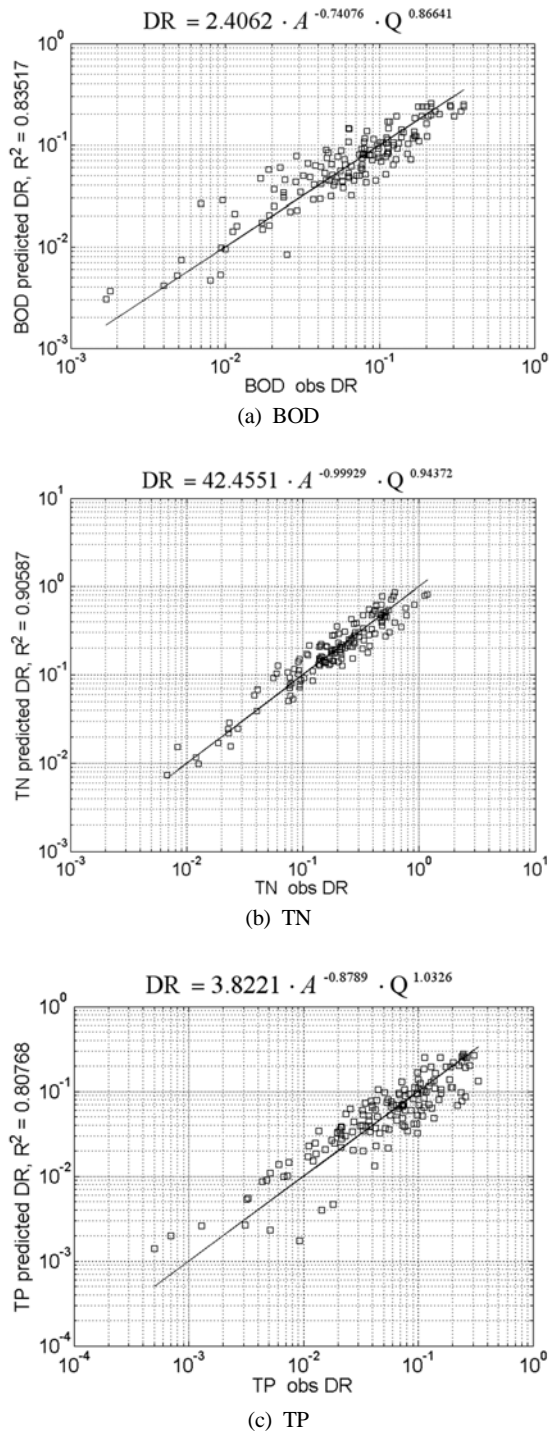


Fig. 10. Results of multiple regression considering watershed area and flow rate.

단, 본 연구에서 제안된 유달을 경험공식의 경우 유역 면적이 100 km² 이상인 경우를 대상으로 산정된 공식이므로 그 이하의 유역면적을 가진 지점에서의 유달을 산정에 적용 시에는 주의를 기울여야 할 것으로 판단되며 단위유역별 유하시간을 고려하지 않았기 때문에 유하시간이 하루 이상인 단위유역의 경우 전일의 유량 및 배출부하량의 영향을 고려하지 못한다는 한계가 추후 연구과제로 남겨진다고 할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 낙동강 유역의 제한된 실측 유량·수질을 바탕으로 일 단위의 유량 및 유달부하량 자료를 구축하여 전체 유량 조건에 대한 유달율의 변화를 알아보고 누가 단위 유역별 지형자료와 배출부하량, 유황별 유달율 사이의 관계를 분석하여 낙동강 유역내의 수질 미계측 지역에 적용할 수 있고 실용성 있는 유달을 경험공식을 개발하고자 하였다. 이를 위하여 배출부하량 자료, 낙동강물환경연구소에서 측정된 8일 간격 유량·수질 자료와 2000년부터 2008년 6월까지의 기상청 자료를 이용하여 티센공간평균 일 강수량 및 일 잠재 증발산량을 산정하여 입력 자료로 활용하였으며 그 결과 단위유역별 오염원별 유량 유황곡선, 부하량 유황곡선, 유달을 유황곡선을 구축하였다. GIS를 통해 단위유역별 지형특성정보를 추출하였으며 누가 단위유역별 지형특성정보와 배출부하량, 유황별 유량 및 유황별 오염원별 유달율의 관계를 분석하여 유달을 경험공식을 산정하였다. 그 결과 단일 매개변수를 이용하여 유달을 경험공식을 산정할 경우 그 정확도와 신뢰도가 매우 떨어짐을 알 수 있었으며, 유역 면적, 유역 경사, 하천 길이, CN값, 유황별 유량, 배출부하량의 총 6개 매개변수 모두를 포함하는 비선형 회귀공식을 이용할 경우 결정계수가 BOD, TN, TP 각각 0.88, 0.93, 0.86으로 비교적 관측자료를 잘 재현하는 것으로 나타났다. 하지만 보다 단순하고 효율적인 식을 산정하기 위해 유역 면적과 유황별 유량을 매개변수로 하는 2변수 유달을 경험공식을 산정하였으며, 그 결과 실측 유달율과 추정 유달율 사이의 결정계수가 BOD, TN, TP 각각 0.84, 0.91, 0.81로 비교적 우수한 결과를 나타내었다. 그러나 본 연구는 유량 및 부하량 모의의 정확성이 사전에 담보되어야 하기 때문에 충분한 사전검토가 필요할 것이며, 유역 면적 100 km² 이하인 지점에 적용할 경우 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다. 또, 유하시간이 하루 이상인 단위유역의 경우 전일의 유량 및 배출부하량의 영향을 고려하지 못한다는 한계가 추후 연구과제로 남겨진다고 할 수 있다.

사 사

본 연구는 2008년 국립환경과학원의 지원(낙동강수계 수질오염총량관리 유황별 유달을 산정방법 연구)을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

강원도(2005). 강원도 오염총량관리기본계획.
 경상남도(2005). 경상남도 오염총량관리기본계획.
 경상북도(2005). 경상북도 오염총량관리기본계획.
 국가수자원관리종합정보시스템(2008). <http://www.wamis.go.kr>.
 국립환경과학원(2008). 수계오염총량관리기술지침.
 김판식, 정승권(2007). SWAT 모형을 이용한 농촌 소하천 유역의 오염부하량 유달을 산정. 학술발표회논문집, 한국수자원학회, pp. 1517-1521.

- 김재철, 김상단(2007). 오염총량관리 유량측정자료를 이용한 낙동강 유역 유황분석. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**, pp. 332-338.
- 대구광역시(2004). *대구광역시 오염총량관리기본계획*.
- 류덕희, 박주현, 황하선, 신대윤, 강재홍, 김세름(2008). 유역 모델을 이용한 유달울 산정기법 연구(I). *공동춘계학술 발표회 논문집*, 한국물환경학회·대한상하수도학회, pp. 385-386.
- 박지형, 공동수, 민경석(2007). 유역형상과 수리특성을 고려한 경험론적 유달부하식 개발. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(6), pp. 913-919.
- 배명순(2003). 지형정보학을 이용한 오염부하 유달계수 산정. 박사학위논문, 충북대학교.
- 부산광역시(2004). *부산광역시 오염총량관리기본계획*.
- 손명기, 서수용, 서동일(1995). 금강 하류부의 오염물질 발생현황과 유달울을 고려한 유입오염부하량 산정. *춘계학술연구발표회논문집*, 대한환경공학회, pp. 401-404.
- 윤영삼, 김문수, 유재정, 이혜진, 이준배, 양상용(2007a). 낙동강 유역에 대한 일별 유달부하량 산정모델 개발 I. 모델식의 보정 및 검증. *한국환경과학회지*, **16**(2), pp. 203-210.
- 윤영삼, 김문수, 유재정, 이혜진, 이준배, 양상용(2007b). 낙동강 유역에 대한 일별 유달부하량 산정모델 개발 II. 모델식의 활용. *한국환경과학회지*, **16**(3), pp. 333-345.
- 윤영삼, 유재정, 김문수, 이혜진, 양상용(2003). 낙동강 유역 유달부하량 산정 및 특성 평가. *춘계학술연구발표회논문집*, 대한환경공학회, pp. 1269-1275.
- 임상준(2000). HSPF 모델을 이용한 비점오염부하량 산정에 관한 연구. 석사학위논문, 충남대학교.
- 하성룡, 배명순(2003). 수질모델링을 위한 수리·수문 인자 분석. *한강수계관리위원회*.
- 한수희, 강두기, 신현석, 유재정, 김상단(2007a). 비편향 회귀분석모형을 이용한 낙동강 본류 부유사량 산정방법의 신뢰도 향상. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(2), pp. 251-259.
- 한수희, 신현석, 김상단(2007b). 낙동강 유역관리를 위한 부하량 유황곡선의 적용 가능성. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**, pp. 620-627.
- Ferguson, R. I. (1986). River Loads Underestimated by Rating Curves. *Water Resour. Res.*, **22**(1), pp. 74-76.
- Ferguson, R. I. (1987). Accuracy and Precision of Methods for Estimating River Loads. *Earth Surf. Processes Landforms*, **12**, pp. 95-104.
- Ha, S. R., Jung, D. I., and Yoon, C. H. (1998). A renovated model for spatial analysis of pollutant runoff loads in agricultural watershed. *Water Science and Technology*, **38**(10), pp. 207-214.
- Koch, R. W. and Smillie, G. M. (1986). Biased in Hydrologic Prediction Using Log-transformed Regression Models. *Water Resour. Bull.*, **22**(5), pp. 717-723.
- Mostaghini, S., Park, S. W., Cook, R. A., and Wang, S. Y. (1997). Assessment of Management Alternative on a Small Agricultural Watershed. *Water Research*, **31**(8), pp. 1867-1878.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, **10**, pp. 282-290.