

## 수질오염총량관리계획 수립을 위한 유달부하량 추정방법 연구

황하선 · 이한필\* · 안기홍 · 박지형 · 김용석 · 이성준<sup>†</sup>

국립환경과학원 유역총량연구과  
\*(주)이티워터

### A Study on Estimated Pollutant Delivery Load for the Basic Plan of TPLC

Ha Sun Hwang · Han Pil Rhee\* · Ki Hong Ahn · Ji Hyung Park · Yong Seok Kim · Sung Jun Lee<sup>†</sup>

Watershed and Total Load Management Research Division, National Institute of Environmental Research  
\*ETWATERS Inc.

(Received 23 June 2016, Revised 25 July 2016, Accepted 27 July 2016)

#### Abstract

Total Pollution Load Control (TPLC) calculates and manages the allowable pollutant load that is discharged from the watershed, which can meet the water quality target. Delivery Ratio (DR) is generally used for predicting the variation of pollutant mass balance between the pollutants discharged from the watershed and a certain point in the stream, and it is very important for estimation of accurate allowable pollutant load. The concept of DR in TPLC is different from prevalent DR, because DR in TPLC includes both the discharge of pollutants from the watershed and the delivery mechanism. Therefore, DR in TPLC should be estimated by using a proper and unified methodology. The appropriate method and equation for estimation of DR in TPLC was developed through the review of various methodologies, and the applicability of the equation was evaluated in a study area (Geumho A). Determination coefficients ( $R^2$ ) of regression were shown to be relatively high (BOD 0.71~0.87, T-N 0.86~0.90, T-P 0.62~0.69). Applicability of the developed methodology and equations was evaluated as appropriate for TPLC, and it is suggested.

**Key words** : Delivery Load, Delivery Ratio, Discharge Coefficient, Total Pollution Load Control (TPLC)

#### 1. Introduction

현재 우리나라에서 시행되고 있는 수질오염총량관리제도(이하 '총량제')는 수계구간별 목표수질을 설정하고, 목표수질을 달성 및 유지할 수 있도록 유역에서 배출할 수 있는 오염물질의 총량을 할당하여 관리하는 제도이다. 따라서 총량제에서는 유역에서 발생된 오염물질이 목표수질 설정지점까지 도달하는 과정에 대한 평가가 무엇보다 중요시 된다.

일반적으로 오염물질이 생성되어 공공수체로 이동하는 과정은 오염물질의 발생, 배출, 유달 과정으로 표현하는데, 발생은 어원 그대로 오염물질의 생성을 의미하고 이렇게 발생된 오염물질이 자연현상 또는 인위적 처리 등을 통해 유역 또는 공공수역으로 유입되는 것을 배출이라하며 배출된 오염물질이 수체의 특정지점에 도달하는 것을 유달이라 한다(Hwang et al, 2015).

수질오염총량관리(이하 '총량관리')에서 목표수질 설정 및

오염부하량의 할당을 위해서는 배출된 오염물질이 수계구간(단위유역)의 특정지점까지 도달하는 과정에서의 물질수지의 변화규명 및 재현이 필요한데 지류구간(소유역)은 유달율을 이용하여 배출부하량과 유달부하량 간의 물질수지를 규명·재현하고 있으며, 본류구간은 수질모형을 이용하여 규명·재현하고 있다.

여기서 유달율은 유역으로 유입되는 배출부하량 대비 수계구간 특정지점에 도달된 유달부하량의 비율로 표현할 수 있다. 총량제에서는 특정지점에서 실측된 유달부하량과 수질오염총량관리기술지침(이하 '기술지침')(NIER, 2014)에 따라 산정된 배출부하량과의 비로부터 유달율을 산정하며 실측자료가 없는 미계측 유역의 유달율은 계측자료가 있는 유역의 유달율과 면적 및 유량으로부터 회귀식을 도출하여 총량관리 계획수립 시 적용하고 있다.

유달율과 관련된 선행연구는 총량제가 도입된 이후부터 현재까지 많은 연구자들에 의해 진행되어왔다. Park et al. (2012)은 실측에 기반한 유달율 산정의 취약성을 보완하기 위해 유역모형을 이용한 유달율 산정방법의 적용성을 평가하고 기존 유달율 산정방법의 문제점 및 보완방안에 대해 고찰하였으며, Choi et al. (2012)는 유향곡선을 작성하고 유량-부하량 관계식을 활용하여 유달부하량을 산정하였으며 산정된 유달부하량과 배출부하량 자료를 이용하여 유향

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
sungjun82@korea.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

별 유달을 산정방안에 대해 고찰하였다. 그 외 국내 많은 연구자(Choi et al., 2012; Jung et al., 2012; Kang et al., 2010; Park et al., 2012; Park et al., 2013)들에 의해 유달을 관련 연구가 이루어져오고 있다.

기존 선행연구들을 살펴보면 유달을 경험공식과 유역모형을 활용한 유달을 산정방법 등은 많은 부분 연구가 이루어졌으나, 총량관리 계획수립과 연계한 유달을 적용방안에 대한 연구는 다소 부족한 실정이므로 총량관리 계획수립 시 활용할 수 있는 유달을 산정 및 적용방안에 대한 연구가 필요한 상황이다.

본 연구에서는 유달과정의 물질수지 재현을 위한 유달을 도출방법을 검토하고 총량관리 계획수립에 적합한 유달을 산정방법을 마련하여 낙동강수계 금호A 단위유역에 적용·검증 해봄으로써 총량관리 계획수립 시 유달부하량 산정에 도움이 되고자한다.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. 연구대상지역

연구대상유역은 낙동강수계 금호강 상류에 위치하고 있는 금호A 단위유역으로 유역면적은 934.83 km<sup>2</sup>이며 10개의 소유역으로 구성되어 있다(Fig. 1). 대상유역의 토지이용은 전체 토지 중 임야가 72.2%, 논 8.9%, 밭 7.6%, 대지 4.5%, 기타 6.8%로 논, 밭의 비율이 대지의 비율보다 높은 농촌지역의 특성을 가지고 있다(Table 1). 이러한 특성을 가지고 있는 금호A 단위유역은 대규모 하수처리장 등 수계

에 직접적인 영향을 주는 주요 오염원이 배제되어 일반적인 오염물질의 유달과정 규명에 적합한 대상유역이므로 본 연구 대상지역으로 선정하였다.

금호A 단위유역 내 유달을 산정을 위한 대표 실측지점은 금호강 지류인 고촌천, 북안천, 신령천 3개 소유역 말단 지점을 선택하였다. 각 지점의 특징을 보면 고촌천 유역(금호A07)은 유역면적이 약 97.7 km<sup>2</sup>이고 유로연장 20.5 km인 지방2급 하천이며, 경상북도 영천시 고경면을 관류하여 금호강으로 합류된다. 북안천 유역(금호A09)은 유역면적이 약 94.1 km<sup>2</sup>이고 유로연장 15.9 km인 지방2급 하천이며, 경상북도 영천시 북안면을 관류하여 금호강으로 합류된다. 신령천 유역(금호A08)은 유역면적이 약 180.59 km<sup>2</sup>이고 유로연장 27.5 km인 지방2급 하천이며, 경상북도 영천시 신녕면을 관류하여 금호강으로 합류된다.

### 2.2. 유달부하량 추정 방법

#### 2.2.1. 오염물질 배출부하량 산정 및 배출계수

환경기초시설과 같이 배출지점이 명확하고 측정이 용이하여 배출지점에서 실측한 수질과 유량의 곱으로 배출부하량을 산정하는 경우는 그 결과를 그대로 이용하지만, 실측이 어려운 점오염원 또는 비점오염원의 경우는 연평균 일일 발생부하원단위를 이용하여 발생부하량을 산정한 후 다양한 개별처리과정의 삭감비(reduction rate)를 적용하여 연평균 일일 배출부하량을 산정하고 있다. 이렇게 산정된 연평균 일일 배출부하량 중 점오염원의 경우는 발생된 오염물질이 처리시설 등을 통해 저감된 후 배출되는 과정에서

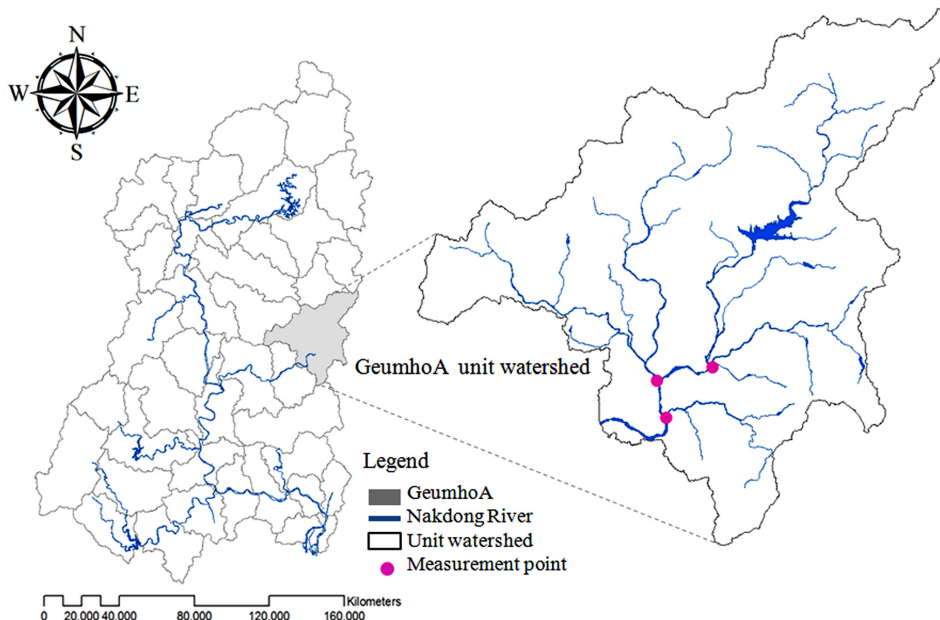


Fig. 1. Location of the Geumho A unit watershed in Nakdong river basin.

Table 1. Characteristics of landuse in the Geumho A unit watershed

(Unit : km<sup>2</sup>)

Watershed	Upland	Paddy	Forest	Ground	Etc.	Total
Geumho A	71.3 (7.6%)	83.0 (8.9%)	674.4 (72.2%)	42.4 (4.5%)	63.8 (6.8%)	934.8 (100.0%)

외부조건에 큰 영향을 받지 않고 연중 일정하게 배출되지만, 토지계로 대표되는 비점오염원이나 합류식 관거의 월류(CSOs), 간이공공처리시설의 방류 등은 발생 후 개별사감된 오염물질이 배출되는 과정에서 강우 등 외부 환경에 따라 다르게 배출된다. 이렇듯 발생 후 개별사감된 오염물질(연평균 일일 부하량)이 배출되는 과정에서 강우 등 외부 환경의 영향으로 연평균 일일배출량과 다르게 배출되는 경우, 그 정도를 표현한 것을 배출계수(discharge coefficient)라 하며, 최종 배출부하량은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$DIS Load_t = (GEN Load_{avg} \times \alpha_i) \times \beta_i \quad (1)$$

여기서, *GEN Load* (Generated Pollution Load)는 연평균 일일 발생부하량(kg/day)이며, *DIS Load* (Discharged Pollution Load)는 *t* 조건의 배출부하량(kg/day)이며,  $\alpha_i$ 는 *t* 조건의 사감비(reduction rate)이고  $\beta_i$ 는 *t* 조건의 배출계수(discharge coefficient)이다.

배출계수는 연평균 일일 발생부하량이 개별처리 과정을 거친 후의 부하량과 원하는 유량조건 시기에 실제 배출되는 일일 부하량의 비로 정의할 수 있다. 기술지침에 따르면, 정상상태 수질모델링 등을 수행하기 위해 총량관리 기준유량 조건의 배출량 산정이 필요한 경우 강우에 영향을 받는 대상에 대하여 배출계수를 적용하도록 되어 있으며 대표적으로 총량관리 기준유량 중 저수량은 0.15, 평수량은 0.5로 규정하고 있다.

### 2.2.2. 유달부하량과 유달율

배출원에서 배출된 오염물질이 하천에 도달하여 수체에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 하천으로 유입되는 지점에서 그 양을 실측하는 것이 가장 좋다. 그러나, 무수히 많은 배출원에서 배출된 오염물질이 하천에 도달하는 양을 실측하기란 물리적·경제적으로 어려우며 실측을 하더라도 강우, 기후, 지형 등 다양한 외부환경을 충분히 반영할 수 있는 연속측정은 어렵다. 특히, 비점오염원 등 유입지점이 뚜렷하지 않은 배출원의 경우 측정방법에 대한 기술적 한계부터 직면하게 된다.

이와 같은 이유로 유달부하량은 유역모형을 이용하여 통합적 방법으로 유달부하량을 추정하거나, 배출부하량과 개별 배출원에서 배출된 오염물질이 수체의 특정지점에 도달하는 비율인 유달율을 이용하여 하천에 도달하는 유달부하량을 식 (2)에 따라 추정할 수 있다.

$$DEL Load_t = DIS Load_t \times DR_t \quad (2)$$

여기서, *DEL Load<sub>t</sub>* (Delivered Pollution Load)는 *t* 조건의 유달부하량(kg/day)이며 *DIS Load<sub>t</sub>* (Discharged Pollution Load)는 *t* 조건의 배출부하량(kg/day)이며, *DR<sub>t</sub>* (Delivery Ratio)은 *t* 조건의 유달율이다.

### 2.2.3. 유달율을 이용한 유달부하량 추정방법 및 한계

식 (2)를 이용하여 유달부하량을 추정하기 위해서는 배출

부하량과 유달율이 필요한데, 배출부하량은 2.2.1에서 언급한 바와 같이 실측이 어려운 경우 배출계수를 이용하여 산정할 수 있으나 시간, 강우 등 다양한 환경조건을 대변할 수 있는 배출계수 모두를 기술지침에 정하기 어렵다는 한계가 있다. 그리고 유달율 산정을 위한 유달부하량의 실측 또한 위에서 언급한 바와 같이 유역 내 수 많은 배출원에서 배출된 오염물질 각각의 유달 경로를 추적하여 정량화하기란 현실적으로 어려우며 배출된 오염물질이 유달되는 과정에 영향을 줄 수 있는 유역의 경사, 유량, 유속, 길이, 수온 등 다양한 영향을 충분히 고려하기 어렵다.

따라서, 식 (2)의 적용을 위해서는 현실적 제약조건에 대한 가정을 세운 후 이를 바탕으로 적용 가능하며 이렇게 산정된 유달율을 제시할 때는 반드시 수식과 가정을 함께 표기하여 유달율 적용 오류를 방지하여야 한다. 유달율 산정 시 적용되는 대표적 가정으로는 1) 소유역은 하나의 배출원이며 소유역내 모든 배출원은 동일한 유달특성을 가진다 2) 유달율 산정을 위한 유달부하량은 측정자료가 유달 과정을 충분히 대변한다 3) 소유역별 유달율 산정이 어려운 경우는 유사 소유역의 유달율을 사용할 수 있다 등의 가정이 있다.

### 2.2.4. 총량관리 기준유량 조건의 유달부하량 추정

현재 우리나라 총량관리는 기준유량조건에서 목표수질을 만족할 수 있는 허용배출부하량을 산정하고 이를 할당하여 관리하는 제도로 기술지침에서는 기준유량조건의 배출부하량 산정을 위한 배출계수를 하나의 값으로 정하고 있고 목표수질 만족여부도 기준유량 조건의 정상상태 수질모의를 통해 판단하도록 하고 있다.

이처럼 모든 조건이 기준유량에 맞추어져 있으므로 총량관리 계획수립 과정에서 수행되는 유달부하량 추정은 식 (2)의 조건을 기준유량에 맞추어 식 (3)과 같이 변형하여 적용할 수 있다. 이때 기본가정은 1) 소유역은 하나의 배출원이며 소유역내 모든 배출원은 동일한 유달특성을 가진다 2) 유달율 산정을 위한 유달부하량은 측정자료가 유달과정을 충분히 대변한다 이며 기준유량 조건의 배출부하량은 기술지침에서 정하고 있는 배출계수를 사용하고 기준유량 조건의 유달율은 실측자료를 이용하여 식 (4)에 따라 산정한다.

$$DEL Load_{sf} = DIS Load_{sf} \times DR_{sf} \quad (3)$$

$$DR_{sf} = \frac{DEL Load_{sf}}{DIS Load_{sf}} = \frac{Q_{sf} \times C_{sf} \times 10^{-3}}{(GEN Load_{avg} \times \alpha_{avg}) \times \beta_{sf} (= 1.0 \text{ or } 0.15 \text{ or } 0.5)} \quad (4)$$

여기서,  $\beta_{sf}$ 는 기준유량(Standard Flow)조건의 BOD와 T-P의 배출계수이며 점배출인 경우 저수, 평수 모두 1.0, 비점배출인 경우 저수는 0.15, 평수는 0.5이다.

그간 총량관리 계획수립 과정에서 유달을 산정을 위해 대표 소유역에서 8일 간격으로 연 30회 이상의 자료를 실측하고 있으나, 이 중 소수 셋째자리 숫자로 표현된 총량관리 기준유량조건의 측정자료와 동일한 수치의 자료를 선택하여 유달을 산정하기는 자료의 개수 등에 따른 한계가 존재한다. 이런 경우 현행 기술지침에서 수질모델 시 실측수질과 모의수질의 허용 오차범위 인 ±20% 조건 등을 인용하여 기준유량의 ±20% 조건으로 자료선택 범위를 확대한 후 기준유량 조건의 자료 개수를 늘릴 수 있다. 하지만, 이는 기준유량 조건이 아닌 다른 유량조건의 자료가 선택될 가능성이 있으며 범위확장에도 불구하고 선택된 자료의 개수가 너무 적어 기준유량 조건의 수질을 대표하기 어려운 경우가 발생하는 등의 문제점이 있어 유달을 산정이 어려운 실정이다. 또한 이렇게 산정된 계측 소유역의 유달은 특정 기준유량에서 만의 유달이므로 기준유량이 다른 미계측 소유역에 적용하기가 어려운 문제점이 있다.

따라서, 계측 소유역의 측정자료 한계를 보완하고 산정된 유달을 유달환경이 다른 미계측 소유역에 전파할 수 있는 범용적 유달을 산정 및 적용 방법이 필요하다.

### 2.3. 범용적 총량유달을 산정 방법 개발

미계측 값을 추정하는 방법 중 회귀식은 한쪽의 변수에서 다른쪽의 변수 값을 예측하기 위한 방정식으로 두 변수와의 관계가 성립되면 합리적으로 미측정 변수를 추정할 수 있다.

위에서 언급된 계측 소유역의 측정자료 한계를 해결하기 위해 측정된 모든 자료를 이용하는 방안과 미계측 소유역의 적용성 강화를 위해 범용적 회귀식을 도출하여 적용하는 방안을 마련하였다. 그러나, 현행 총량제에서 배출부하량은 연평균일일 원단위로부터 산정된 평균 개념의 배출부하량이기 때문에 계측된 모든 자료를 활용하는 경우 측정 자료에 대응하는 측정시기의 배출부하량을 산정할 수가 없으며, 회귀식 도출을 위해서는 유달에 영향을 주는 다양한 요인 중 일부를 변수로 지정해야 하는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 다음의 가정을 가지고 유달을 산정하고 적용하였다.

- 1) 소유역은 하나의 배출원이며 소유역내 모든 배출원은 동일한 유달특성을 가진다.
- 2) 소유역 배출부하량은 기술지침에 따라 산정된 연평균 일일배출부하량을 일괄 적용한다.
- 3) 유달부하량은 소유역 유출구에서 간헐적으로 측정된 유량과 수질 곱으로 한다.
- 4) 유달환경은 유역면적과 유량에 가장 많은 영향을 받으며 유달은 면적에 반비례하고 유량에 비례한다.

위 가정에 따라 유달부하량을 소유역 유출구의 측정자료로 이용할 경우는 배출부하량 외 유달과정에서 기저유출 및 불명오염원 등에 의한 오염부하량이 추가로 포함될 수 있다. 그리고 유달환경의 경우 일반적 유달은 발생된 오염물질이 흘러 내려오면서 일어나는 변화과정으로 이때 물질수지 변화는 대부분 침투, 증발 등에 따른 유량의 감소

와 오염물질의 자정작용, 흡착 등에 따른 농도감소가 원인이다. 그러나, 총량유달은 분모가 연평균일일배출부하량이므로 일반적 유달과정의 요인과 함께 배출계수에 영향을 주는 경우, 토지이용, 유역경사 등이 추가된다. 하지만, 현행 총량관리계획 수립 시 배출계수는 기술지침 상에 정하여 적용하고 있기 때문에 본 연구에서는 총량유달에 영향을 주는 인자로 유량과 면적을 선택하였다.

#### 2.3.1. 총량유달을 산정 및 회귀식 도출

소유역 내의 모든 배출원으로부터 배출된 부하량을 기술지침에 따라 연평균배출부하량으로 산정하고 소유역 유출구에 도달하는 유달부하량을 실측 유량과 수질을 곱하여 산정한 후 식 (5)에 따라 측정 횟수별 총량유달을 산정하였다. 총량유달은 식의 분모가 위 가정과 같이 기술지침에 따른 연평균배출부하량으로 일정하다는 것이 특징이다.

$$\begin{aligned}
 TPLC\_DR_i &= \frac{DEL\ Load_i}{DIS\ Load_{avg}} \\
 &= \frac{Q_i \times C_i \times 10^{-3}}{(GENLoad_{avg} \times \alpha_{avg}) \times \beta_{avg} (=1)}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

여기서,  $TPLC\_DR_i$ 은  $i$ 번째 총량유달이며,  $DEL\ Load_i$ 는  $i$ 번째 측정자료로부터 산정된 유달부하량(kg/day)이며,  $DIS\ Load_{avg}$ 는 기술지침 등에 따라 산정된 연평균 배출부하량(kg/day)이며,  $Q_i$  및  $C_i$ 는  $i$ 번째 측정 유량(m<sup>3</sup>/day) 및 수질(mg/L)이며,  $\alpha_{avg}$ 는 평균 삭감비(reduction rate)이고  $\beta_{avg}$ 는 평균 배출계수(=1.0)이다.

미측정 기간의 유달을 보간하고 유달환경이 다른 미계측 소유역에 적용하기 위해 개별 총량유달과 소유역 면적, 개별 유량을 이용하여 식 (6) 또는 식 (7)에 따라 범용적 총량유달회귀식을 도출하였다.

식 (6)은 단일 소유역에서 실측자료의 부족으로 인한 미계측기간의 유달을 보간하고자 할 때 주로 사용하는 회귀식으로 독립변수는 유량·면적비( $Q/A$ )이며 식 (7)은 미계측 기간의 보간 뿐 아니라 미계측 소유역에 확대 적용하기 위해 사용하는 다중회귀식으로 독립변수는 유량( $Q$ )과 면적( $1/A$ )이며 2개 이상의 소유역에서 측정된 자료를 이용하며 통계프로그램을 이용하여 상수와 지수를 도출할 수 있다.

$$TPLC\_DR_t = a \times \left(\frac{Q_t}{A_t}\right)^b
 \tag{6}$$

$$TPLC\_DR_t = a \times Q_t^b \times \frac{1}{A_t^c}
 \tag{7}$$

여기서,  $TPLC\_DR_t$ 은 유량과 면적이  $t$  조건일 때 총량유달( $\beta=1$ )이며  $Q_t$  및  $C_t$ 는  $t$  조건의 유량 및 수질이며  $a$ 는 상수이며,  $b$ ,  $c$ 는 지수이다.

이 방법의 특징을 보면 식 (5)의 분자인 유달부하량은 하천의 지하수 등 기저유출을 포함하는 부하량이며 분모인

배출부하량은 기저유출이 배제된 지표배출부하량이므로 식 (5)~(7)에 의해 산정된 총량유달율은 해당유역의 기저유출을 포함하고 있다.

또한, 일반적으로 점오염물질의 배출부하량(이하 점배출)은 강우에 의한 영향이 적어 시간에 따른 변화가 거의 없으나 비점오염물질의 배출부하량(이하 비점배출)은 강우에 의한 영향을 받아 시간에 따른 변화(유량조건 변화)에 대한 영향이 크기 때문에 점배출과 비점배출이 하천 수질에 미치는 영향이 다르지만 식 (5)의 분모인 배출부하량은 연평균 점배출과 연평균 비점배출의 단순 합을 사용하므로 환경기초시설과 같은 주요 점배출의 영향이 큰 유역에서의 적용은 적합하지 않다. 특히, 토지계를 대표로 하는 비점배출의 경우 연평균발생부하원단위를 사용하여 배출부하량을 산정하므로 분자인 유달부하량에는 실측 시의 점배출의 유달변화와 비점발생량에 배출계수를 곱한 비점배출의 유달변화를 각각 포함하고 있다.

2.3.2. 총량유달율의 적용

이렇게 산정된 총량유달회귀식에 소유역의 총량관리 기준유량과 면적을 입력하면 기준유량 조건의 총량유달율이 생성된다. 총량유달율은 연평균배출부하량을 분모로 하여 추정되었기 때문에 유달부하량은 식 (8)과 같이 연평균배출부하량에 총량유달율을 곱하여 산정하여야 한다.

$$DEL Load_t = DIS Load_{avg} \times TPLC\_DR_t \tag{8}$$

그러나 총량관리와 같이 배출부하량을 점, 비점으로 구분하고 배출계수를 정하여 배출부하량을 산정하는 특성상 이런 경우에는 총량유달율(식 (6) 또는 (7))을 식 (4)와 같은 일반유달율로 전환하여 적용하여야 한다. 전환식은 총량유달율을 사용하는 식 (9)와 일반유달율을 사용하는 식 (10)의 유달부하량은 같기 때문에 이 두식을 정리하면 식 (11)과 같이 된다.

$$DEL Load_{sf} = [(P.Load \times \beta_{avg}) + (NP.Load \times \beta_{avg})] \times TPLC\_DR_{sf} \tag{9}$$

$$DEL Load_{sf} = [(P.Load \times \beta_{avg}) + (NP.Load \times \beta_{sf})] \times DR_{sf} \tag{10}$$

$$DR_{sf} = \frac{(P.Load + NP.Load) \times TPLC\_DR_{sf}}{(P.Load \times \beta_{avg}) + (NP.Load \times \beta_{sf})} \tag{11}$$

여기서, *P.Load*는 발생된 오염부하량에 개별사감된 후 배출형태가 강우에 영향을 받지 않는 경우의 부하량이며 *NP.Load*는 강우에 영향을 받는 부하량이다.

3. Results and Discussion

3.1. 수질유량자료 및 배출부하량 조사결과

본 연구에서는 실측 유달부하량 산정을 위해 고촌천, 복안천, 신령천 말단 3개 지점에서 총량관리 계획수립 및 이행평가(Yeong Cheon City, 2011; 2012; 2013; 2014)를 위해 2011년부터 2014년까지 측정된 약 462개의 수질·유량 자료를 활용하였으며, 측정자료의 평균값 및 표준편차는 Table 2와 같다.

개별 유달을 산정을 위한 배출부하량은 2011년부터 2014년까지의 경상북도 영천시 총량관리 시행계획 이행평가자료를 활용하였으며 고촌천, 복안천, 신령천 3개 소유역의 해당 연도별 배출부하량을 적용하였다. 배출부하량 분석결과, 금호A 단위유역의 BOD의 총 배출부하량은 9,921 kg/day로 토지계의 기여율이 46.6%, 축산계 33.9%, 생활계 19.0%, 산업계 0.4%을 비율을 차지하고 있다. T-P의 총 배출부하량은 565 kg/day로 토지계의 기여율이 44.5%, 축산계 41.5%, 생활계 13.6%, 산업계 0.4%을 비율을 차지하고 있다. 배출부하량 분석결과 금호A 단위유역의 배출부하량은 점오염원에 비하여 상대적으로 비점오염원 형태로 배출되는 토지계 및 축산계의 기여율이 높은 비율을 차지하는 것으로 분석되었다.

3.2. 총량유달 회귀식 도출

3개 소유역에서 측정된 462개의 수질 및 유량과 기술지침에 따라 산정된 연평균일일배출부하량을 토대로 식 (5)에 따라 측정자료별 총량유달율을 산정한 결과는 Table 3과 같으며 실측유량 0.023~6.649 m<sup>3</sup>/sec 범위에서 산정된 총량유달율은 BOD 0.002~0.683, T-N 0.009~2.826, T-P 0.001~0.494 범위를 나타냈다.

T-N의 경우 BOD와 T-P에 비해 유달율의 변동 범위가 크게 나타났으며, 유달율이 1을 초과하는 결과값이 산정되기도 하였다. 유달율이 1을 초과한다는 것은 기술지침에 따라 산정된 연평균일일배출부하량 보다 실측된 유달부하량이 더 많을 경우를 의미하는데, Shon et al. (2009)의 연구에 의하면 T-N의 경우 다른 오염원에 비해 유달율이 큰 변동을 나타내는 이유로 지하수 등 기저유출에서 기인하는 질소의 배경농도가 높음에도 불구하고 현행 오염부하량 산정방식에는 오염물질의 배경농도를 고려할 수 없기 때문으

Table 2. Average and standard deviation of measurement data

Category	Gocheon			Bugancheon			Sillyeongcheon		
	No.	Average	Standard deviation	No.	Average	Standard deviation	No.	Average	Standard deviation
Flow (m <sup>3</sup> /s)	154	0.567	0.684	154	0.591	0.505	154	1.454	1.031
BOD (mg/L)		1.464	0.610		2.105	0.908		1.766	0.960
T-N (mg/L)		3.137	0.945		3.764	1.407		4.304	1.088
T-P (mg/L)		0.069	0.067		0.123	0.069		0.076	0.036

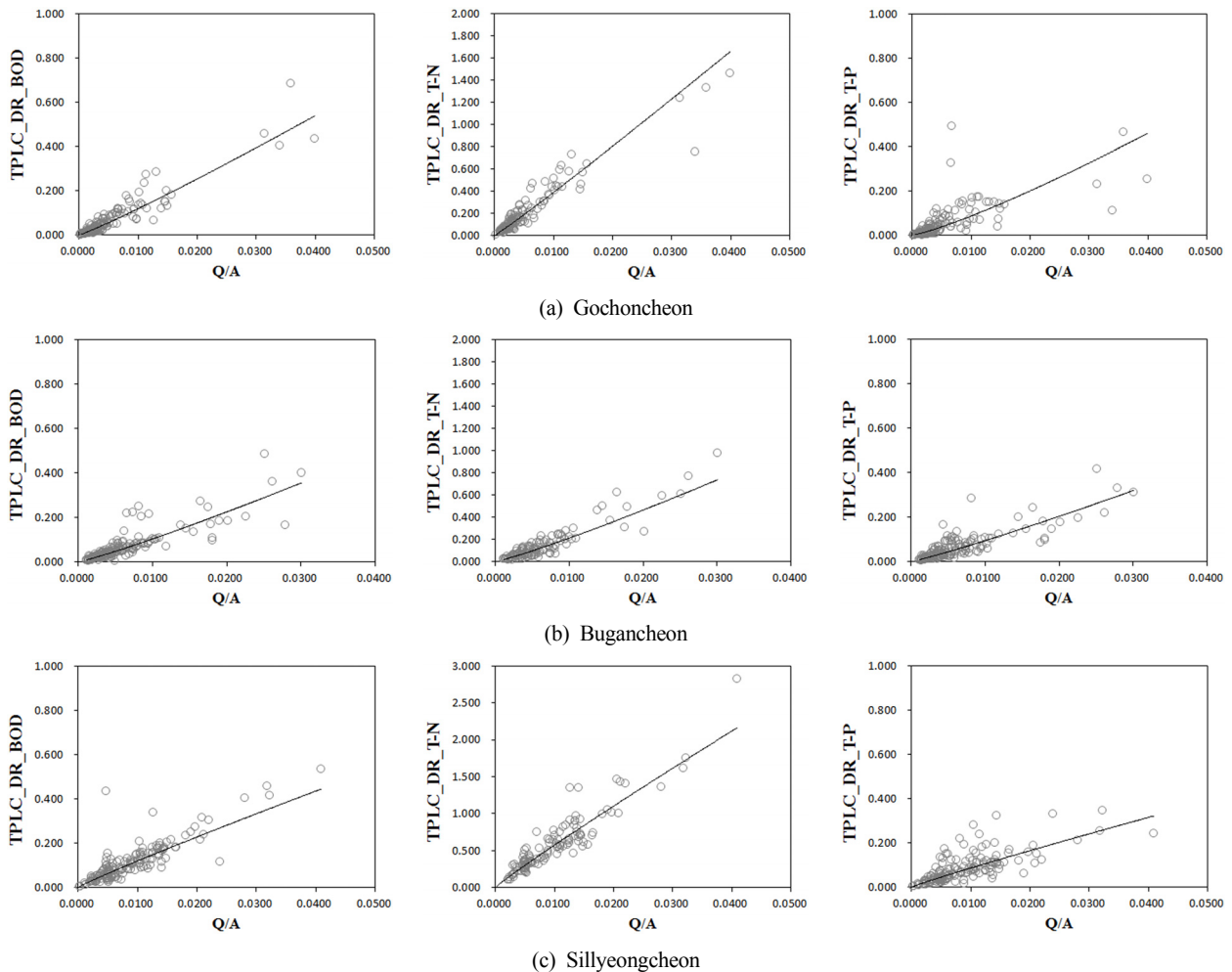
**Table 3.** Delivery ratios of measuring data

Watershed	Number of data	Category	Flow (m <sup>3</sup> /sec)	Delivery ratio		
				BOD	T-N	T-P
Gochoncheon	154	Min	0.023	0.002	0.009	0.001
		Ave	0.567	0.064	0.220	0.050
		Max	4.470	0.683	1.465	0.494
Bugancheon	154	Min	0.100	0.005	0.018	0.004
		Ave	0.591	0.068	0.142	0.063
		Max	2.820	0.486	0.980	0.414
Sillyeongcheon	154	Min	0.040	0.004	0.102	0.002
		Ave	1.454	0.113	0.578	0.084
		Max	6.649	0.534	2.826	0.347
Total	462	Min	0.023	0.002	0.009	0.001
		Ave	0.871	0.082	0.313	0.066
		Max	6.649	0.683	2.826	0.494

로 판단하고 있다.

실측자료로부터 산정된 총량유달율을 토대로 식 (6)에 따라 유량-면적비(Q/A)와 개별 총량유달율(TPLC\_DR<sub>i</sub>)의 관계를 3개의 소유역별로 도식화(Fig. 2)하여 거둬제공 형태의 회귀식을 도출한 결과는 Table 4와 같으며, 유량-면적비와 개별 총량유달율 간 상관성을 나타내는 결정계수(R<sup>2</sup>)는

T-N 0.80~0.89, BOD 0.78~0.88, T-P 0.70~0.76 순으로 나타났다. Choi et al, (2012)는 R<sup>2</sup>가 0.6 이상이면 회귀식의 추세값을 잘 반영한다고 제안하였는데 이와 같은 선행연구들의 제안을 바탕으로 볼 때 실측자료로부터 산정한 총량유달율과 유량-면적비의 회귀식은 동 소유역의 미세측 기간 총량유달율을 추정할 수 있을 것으로 판단된다.



**Fig. 2.** Relationship between (Q/A) and TPLC\_DR at Geumho A.

**Table 4.** Regression equations for delivery ratios

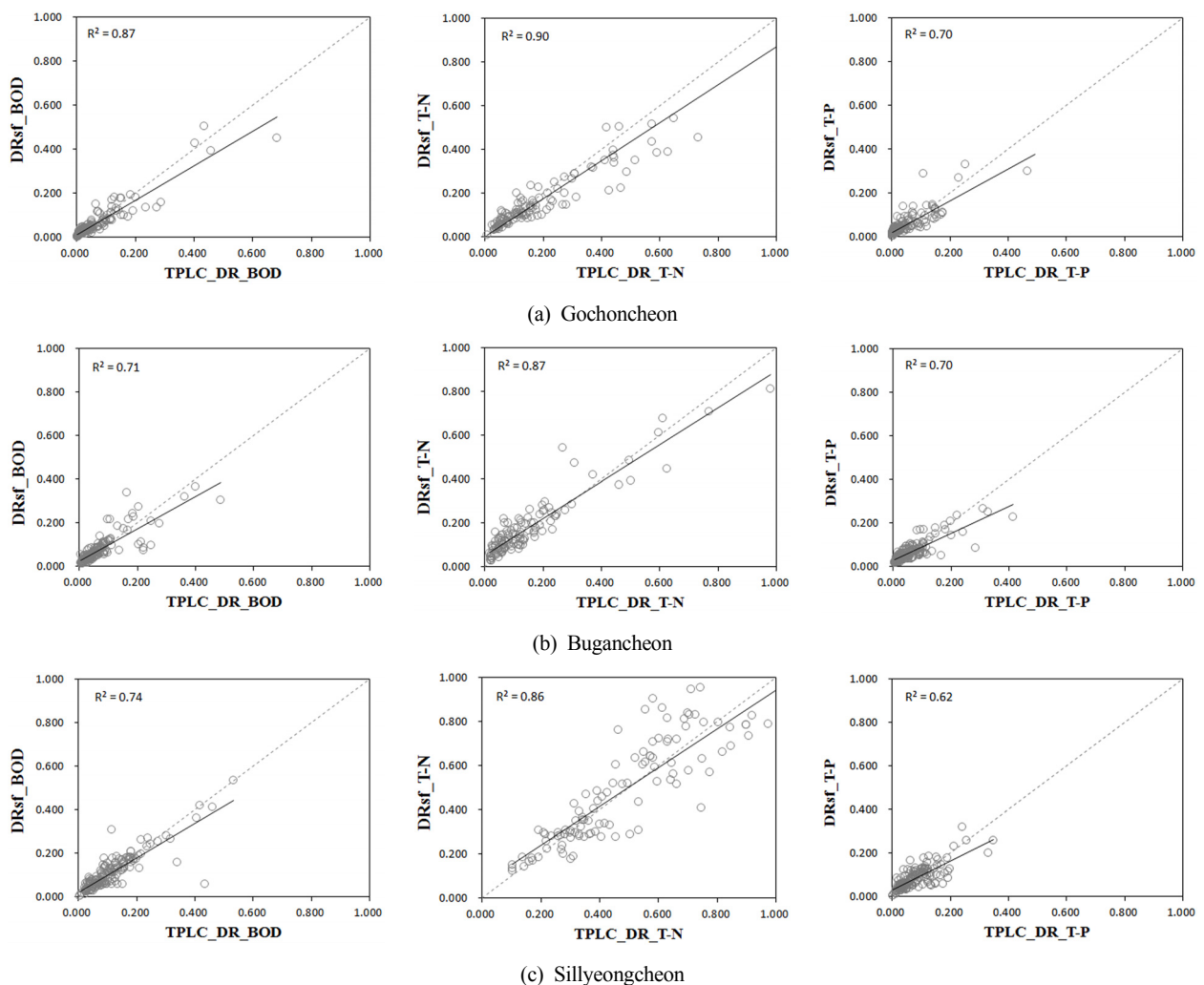
Watershed	Pollutant	Equation	R <sup>2</sup>
Gochoncheon	BOD	$TPLC\_DR\_BOD = 18.196 \left(\frac{Q}{A}\right)^{1.0929}$	0.88
	T-N	$TPLC\_DR\_TN = 48.22 \left(\frac{Q}{A}\right)^{1.0465}$	0.89
	T-P	$TPLC\_DR\_TP = 22.126 \left(\frac{Q}{A}\right)^{1.2027}$	0.76
Bugancheon	BOD	$TPLC\_DR\_BOD = 18.354 \left(\frac{Q}{A}\right)^{1.1252}$	0.78
	T-N	$TPLC\_DR\_TN = 39.224 \left(\frac{Q}{A}\right)^{1.1343}$	0.80
	T-P	$TPLC\_DR\_TP = 15.754 \left(\frac{Q}{A}\right)^{1.1118}$	0.73
Sillyeongcheon	BOD	$TPLC\_DR\_BOD = 8.8033 \left(\frac{Q}{A}\right)^{0.9342}$	0.79
	T-N	$TPLC\_DR\_TN = 44.134 \left(\frac{Q}{A}\right)^{0.9433}$	0.86
	T-P	$TPLC\_DR\_TP = 6.3915 \left(\frac{Q}{A}\right)^{0.9353}$	0.70

**Table 5.** Result of nonlinear regression analysis

Equation	Pollutant	a	b	c
$TPLC\_DR_t = a \times Q_t^b \times \frac{1}{A_t^c}$	BOD	8.571	1.040	0.931
	T-N	0.051	0.999	-0.381
	T-P	11.573	0.871	1.029

하지만, 실측자료가 확보되지 않은 미계측 소유역에 적용하기 위해서는 보다 많은 자료의 확보와 통계적인 접근이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 식 (7) 형태의 다중회귀식을 도출하기 위하여 고촌천, 북안천, 신령천 3개 지점에서 측정된 모든 자료를 취합하여 SPSS 통계프로그램을 활용하여 비선형 다중회귀분석을 통해 상수와 지수를 산정하고 회귀식을 도출하였다. 그 결과 BOD의 a, b, c는 각각 8.571, 1.040, 0.931로 나타났으며 T-N는 각각 0.051, 0.999, -0.381로 나타났으며 T-P는 11.573, 0.871, 1.029로 나타났다(Table 5).

도출된 회귀식(Table 5)의 적용성을 평가하기 위해 고촌천, 북안천, 신령천 3개 유역에 대해 동일한 실측유량 조건에서 산정한 개별 총량유달율(TPLC\_DR<sub>t</sub>)과 Table 5에서 도출된 총량유달 회귀식으로 산정한 총량유달율(TPLC\_DR<sub>t</sub>)과의 상관관계를 그래프로 도식화하였다(Fig. 3). 그 결과,



**Fig. 3.** Relationship between TPLC\_DR and DR<sub>sf</sub> at Geumho A.

결정계수( $R^2$ )는 T-N 0.86~0.90, BOD 0.71~0.87, T-P 0.62~0.70 순으로 본 연구에서 제시한 식 (7) 형태의 비선형 다중회귀분석을 통해 도출한 회귀식의 적용성은 높은 것으로 판단되어 총량유달율을 합리적으로 추정할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 보다 정확한 총량유달율 추정을 위해 유량 조건 등 측정 범위가 확대되어야 할 것으로 판단된다.

**3.3. 총량관리 기준유량에서의 유달율 산정**

금호A 단위유역 내 10개 소유역을 대상으로 기준유량조건 유달부하량 산정을 위해 비선형 다중회귀분석을 통해 도출한 회귀식에 소유역별 기준유량과 목표수질을 대입하여 총량유달율을 도출하고 이를 식 (11)에 따라 일반유달율로 전환하여 소유역별 유달율을 산정하였다(Table 6, 7). 이때 소유역별 기준유량과 점 및 비점 배출부하량은 경상북도 오염총량관리 3단계 기본계획(Gyeongsanbuk-do, 2015)의 값을 적용하였다.

금호A 단위유역의 유달율 산정결과 중 최상류에 위치하고 있는 금호A01 소유역의 결과값을 대표적으로 해석하면 총량관리 기준유량 중 저수량 조건에서 총량유달율은 BOD 0.040, T-N 0.168, T-P 0.037로 추정되었으며, 이를 일반유달율로 환산하며 BOD 0.157, T-N 0.915, T-P 0.180이 된다. 또한 평수량 조건에서 총량유달율은 BOD 0.141, T-N 0.569, T-P 0.107로 추정되었으며 이를 일반유달율로 환산하며 BOD 0.252, T-N 1.094, T-P 0.201이 된다.

이처럼 총량관리계획 수립을 위해 이용되는 총량유달율은 일반적으로 통용되는 유달율과 의미가 다른데 위에서 언급한 바와 같이 총량유달율은 배출계수를 포함한 유달율을 말하며 유달율 정의에 따른 일반적 유달율은 순수 유달율만을 포함하고 있어 수식적으로는 배출계수 등으로 인해 총량유달율은 일반유달율 보다 적은 수치로 표현된다.

따라서 총량관리계획 등에서 유달율을 이용하는 경우에는 명칭을 명확히 표기할 필요가 있다. 또한 총량관리 기준유량 인 저수량 및 평수량 외의 유달율을 추정하고자 하는 경우에는 적절한 배출계수를 고려하여야 할 것으로 판단된다.

**4. Conclusion**

본 연구에서는 유달과정의 물질수지 재현을 위한 유달율 도출방법을 검토하고 총량관리 계획수립에 적합한 유달율 산정방법을 마련하여 낙동강수계 금호A 단위유역에 적용·검증 해봄으로써 총량관리 계획수립 시 유달부하량 산정에 도움이 되고자하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 실측자료에 의한 유달부하량과 기술지침에 따라 산정된 배출부하량을 이용하여 금호A 단위유역 내 고촌천, 북안천, 신령천 소유역의 개별(실측자료별) 총량유달율을 산정하였으며, 그 결과는 실측유량 0.023~6.649 m<sup>3</sup>/sec 범위에서 총량유달율은 BOD 0.002~0.683, T-N 0.009~2.826, T-P 0.001~0.494 범위를 나타냈다.

**Table 6.** Delivery ratios of standard flow (Q<sub>275</sub>)

Watershed	Area (km <sup>2</sup> )	Flow (m <sup>3</sup> /s)	TPLC_DR			DR <sub>sf</sub>		
			BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P
GH_A 01	146.05	0.492	0.040	0.168	0.037	0.157	0.915	0.180
GH_A 02	8.26	0.028	0.029	0.003	0.058	0.104	0.017	0.275
GH_A 03	23.99	0.081	0.033	0.014	0.049	0.101	0.068	0.200
GH_A 04	56.92	0.192	0.036	0.046	0.043	0.133	0.256	0.204
GH_A 05	31.24	0.053	0.016	0.010	0.026	0.044	0.038	0.079
GH_A 06	57.77	0.098	0.018	0.024	0.024	0.066	0.109	0.097
GH_A 07	119.14	0.203	0.019	0.064	0.021	0.068	0.273	0.083
GH_A 08	357.48	0.609	0.021	0.292	0.018	0.066	1.232	0.067
GH_A 09	99.52	0.169	0.019	0.050	0.022	0.062	0.127	0.077
GH_A 10	32.15	0.055	0.017	0.011	0.026	0.047	0.041	0.094

**Table 7.** Delivery ratios of standard flow (Q<sub>185</sub>)

Watershed	Area (km <sup>2</sup> )	Flow (m <sup>3</sup> /s)	TPLC_DR			DR <sub>sf</sub>		
			BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P
GH_A 01	146.05	1.670	0.141	0.569	0.107	0.252	1.094	0.201
GH_A 02	8.26	0.095	0.103	0.011	0.169	0.179	0.021	0.315
GH_A 03	23.99	0.274	0.116	0.047	0.143	0.193	0.088	0.256
GH_A 04	56.92	0.651	0.127	0.155	0.124	0.224	0.300	0.232
GH_A 05	31.24	0.261	0.086	0.049	0.104	0.136	0.087	0.172
GH_A 06	57.77	0.482	0.092	0.115	0.094	0.162	0.214	0.170
GH_A 07	119.14	0.994	0.099	0.313	0.084	0.172	0.569	0.150
GH_A 08	357.48	2.981	0.112	1.427	0.071	0.186	2.588	0.125
GH_A 09	99.52	0.830	0.097	0.244	0.087	0.166	0.380	0.150
GH_A 10	32.15	0.268	0.086	0.051	0.103	0.140	0.091	0.180



- 2) 미계측 유역의 유달을 산정을 목적으로 본 연구에서 도출한 유달회귀식의 검증에 대해 고촌천, 북안천, 신령천 3개 유역에 대해 동일한 실측유량 조건에서 산정한 개별 총량유달율과 유달을 회귀식으로 산정한 추정 총량유달율과의 상관관계를 분석한 결과, 결정계수( $R^2$ )는 T-N 0.86~0.90, BOD 0.71~0.87, T-P 0.62~0.69 순으로 나타나 도출된 회귀식의 적합성은 높은 것으로 판단된다.
- 3) 유달회귀식을 통해 추정된 총량유달율을 일반유달율로 환산한 결과 금호A 01 소유역의 기준유량 중 저수량 조건 총량유달율은 BOD 0.040, T-N 0.168, T-P 0.037로 추정되었으며 이를 일반유달율로 환산하며 BOD 0.157, T-N 0.915, T-P 0.180으로 나타났다.
- 4) 총량유달율은 유달을 외 배출계수를 포함하고 있어 순수 유달을 만을 고려하는 일반유달율과는 의미가 다르므로 총량관리계획 수립 등에서 유달율을 이용하는 경우에는 명칭을 명확히 표기할 필요가 있으며 총량관리 기준유량 인 저수량 및 평수량 외의 유달율을 추정하고자 하는 경우에는 적절한 배출계수가 고려하여야 할 것으로 판단된다.
- 5) 본 연구에서 제시한 유달을 추정방법의 분석결과, 실측자료가 없는 미계측 유역 및 총량관리 기준유량 조건의 유달을 산정 시 합리적인 유달을 산정이 가능할 것으로 판단된다. 유달율은 유달부하량을 추정하여 총량관리 계획 수립 시 수질모델의 입력자료로 활용되므로 과소 또는 과대 산정되면 수질모델 적용 시 무리한 매개변수를 적용하게 되고, 오염부하량과 하천수질 간의 반응이 비현실적으로 나타나는 결과를 초래할 수 있다. 따라서 향후 다양한 유역을 대상으로 본 연구에서 제시한 유달을 추정방법에 대한 검증과 총량관리 계획 수립 시 적용하고 있는 수질 모델과 연계한 검증 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## References

- Choi, D. H., Jung, J. W., Lee, K. S., Choi, Y. J., Yoon, K. S., Cho, S. H., Park, H. N., Lim, B. J., and Chang, N. I. (2012). Estimation of Pollutant Load Delivery Ratio for Flow Duration Using L-Q Equation from the Oenam-cheon watershed on Junam Lake, *Journal of the Environmental Sciences*, 21(1), pp 31-39. [Korean Literature]
- Gyeongsanbuk-do. (2015). *The Third Stage Basic Plan of Gyeongsanbuk-do TMDL in Nakdong River*, Gyeongsanbuk-do, pp. 7-8. [Korean Literature]
- Hwang, H. S., Rhee, H. P., Park, J. H., Kim, Y. S., Lee, S. J., and Ahn, K. H. (2015). Study on Estimation and Application of Discharge Coefficient about Nonpoint Source Pollutants using Watershed Model, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 31(6), pp. 653-664. [Korean Literature]
- Jung, J. W., Lim, B. J., Choi, D. H., Choi, Y. J., Lee, K. S., Kim, Y. J., Kim, K. S., Chang, N. I., and Yoon, K. S. (2012). Evaluation of Flow-Pollutant Load Delivery Ratio Equation on Main Subwatersheds within Junam Lake, *Journal of the Environmental Sciences*, 21(10), pp. 1235-1244. [Korean Literature]
- Kang, J. H., Hong, J. J., Kim, S. G., Son, M. S., Lee, Y. J., and Lim, B. J. (2010) A Study Calculating of Delivery Ratio Daily WinHSPF/BASINS Model, *Journal of Korean Society of Water Science and Technology*, 18(5), pp. 19-28. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research. (2014). *The technical guideline for Total water Pollutant Load Management System*, National Institute of Environmental Research. [Korean Literature]
- Park, J. H., Hwang, H. S., Rhew, D. H., and Kwong, O. S. (2012). Estimation of Delivery Ratio Based on BASINS/HSPF Model for Total Maximum Daily Load, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 28(6), pp. 833-842. [Korean Literature]
- Park, J. W., Kim, K. S., Hwang, K. S., Lee, Y. W., and Lim, B. J. (2013). Application of Load Duration Using Discharge-Load Rating Curve at Jiseok Stream Watershed, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 29(4), pp. 523-530. [Korean Literature]
- Shon, T. S., Park, J. B., and Shin, H. S. (2009). A Study on Estimation of the Delivery Ratio by Flow Duration in a Small-Scale Test Bed for Managing TMDL in Nakdong River, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 25(5), pp. 792-802. [Korean Literature]
- Yeong Cheon City. (2011). *The Implementation Report for Total Water Pollutant Load Management System Action Plan*. Yeong Cheon City. [Korean Literature]
- Yeong Cheon City. (2012). *The Implementation Report for Total Water Pollutant Load Management System Action Plan*. Yeong Cheon City. [Korean Literature]
- Yeong Cheon City. (2013). *The Implementation Report for Total Water Pollutant Load Management System Action Plan*. Yeong Cheon City. [Korean Literature]
- Yeong Cheon City. (2014). *The Implementation Report for Total Water Pollutant Load Management System Action Plan*. Yeong Cheon City. [Korean Literature]