



비점오염 발생 원단위 산정방법에 대한 고찰 - 논 비점오염 원단위를 중심으로 -

A Study on the Estimation Methods of Nonpoint Pollutant Unit Load - Focus on Nonpoint Pollutant Unit Load in Paddy Field -

최동호^a · 최순군^b · 김민경^c · 허승오^d · 홍성창^e · 엽소진^f · 윤광식^{g, †}

Choi, DongHo · Choi, Soon-Kun · Kim, Min-Kyeong · Hur, Seung-Oh · Hong, Sung Chang · Yeob, So-Jin · Yoon, KwangSik

ABSTRACT

In order to preserve water environment, Total Maximum Daily Load(TMDL) is used to manage the total amount of pollutant from various sources, and the annual average load of source is calculated by the unit load method. Determination of the unit load requires reliable data accumulation and analysis based on a reasonable estimation method. In this study, we propose a revised unit load estimation method by analyzing the unit load calculation procedure of National Institute of Environment Research(NIER) method. Both methods were tested using observed runoff ratio and water quality data of rice paddy fields. The estimated values with the respective NIER and revised NIER methods were highly correlated each other. However, the Event Mean Concentration(EMC) and the runoff ratio considered in the NIER method appeared to be influenced by rainfall classes, and the difference in unit load increases as the runoff and EMC increase. The error can be further increased when the EMC and runoff ratio are changed according to changes in rainfall patterns by climate change and change of agricultural activities. Therefore, it is recommended to calculate unit load by applying the revised NIER method reflecting the non point pollution runoff characteristics for different rainfall classes

Keywords: Rice paddy; Unit load; rainfall class; NIER; revised NIER

1. 서 론

2004년 국내에 수질오염물질의 총량관리 제도 도입 이후

수계로 유입되는 점오염원과 비점오염원을 동시에 관리 하고 있으며 (MOE, 2006; NIER, 2005; Lee, 2012), 단위유역별로 관리대상물질로 생물학적산소요구량 (Biochemical Oxygen Demand, BOD)과 총인 (Total Phosphorus, T-P)을 설정하고 목표수질과 유량을 설정함으로써 수체가 허용가능한 부하량을 할당하여 관리하고 있다. 수계로 유입되는 총 오염물질 중 점오염원의 기여율은 감소하고 있지만, 비점오염원의 기여율은 증가하고 있다. 따라서, 수계의 건전성을 유지하기 위해서는 비점오염원의 관리가 필요하다 (Relevant Ministerial Consortium, 2012). 환경부에서는 토지계에서 발생하는 오염 부하량을 정량화하기 위해 1995년 비점오염조사연구사업에서는 비우량 방법에 따라 토지계의 발생원단위 (이하, 원단위)를 제시하였다 (MOE, 1995). 하지만, 단기간에 제한된 숫자의 조사 자료를 바탕으로 원단위가 산정되었기 때문에 원단위는 다양한 기후조건과 영농활동을 반영하지 못하였으며 (Shin et al., 2001; Choi et al., 2015), 비우량 방법은 논의 수문특성, 즉 저류능을 반영하지 못하기 때문에 논의 원단위가 과소 혹은 과대 산정될 우려가 있었다 (Jung et al., 2008). 원단위 제정 이후 시간이 경과함에 따라 변화된 사회적 여건과 기후조건을 반영하기 위한 새로운 원단위 제시가 요구되었다. 환경부에서는 2008년부터 2014년까지 강우-유출 모니터링을 수행하였으며, 강우유출수 조사방법을 통해 새로운 논 원단위를 제

^a Post-doctoral researcher, Division of Climate Change and Agroecology, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences (NAS), Rural Development Administration (RDA)

^b Agricultural Researcher, Division of Climate Change and Agroecology, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences (NAS), Rural Development Administration (RDA)

^c Agricultural Researcher, International Technology Cooperation Center (ITCC), Rural Development Administration (RDA)

^d Agricultural Researcher, Division of Climate Change and Agroecology, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences (NAS), Rural Development Administration (RDA)

^e Agricultural Researcher, Division of Climate Change and Agroecology, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences (NAS), Rural Development Administration (RDA)

^f Agricultural Researcher, Division of Climate Change and Agroecology, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences (NAS), Rural Development Administration (RDA)

^g Professor, Department of Rural and Bio-systems Engineering, Chonnam National University

† Corresponding author

Tel.: +82-62-530-2158 Fax: +82-62-530-2150

E-mail: ksyoon@jnu.ac.kr

Received: March 6, 2019

Revised: March 26, 2019

Accepted: April 3, 2019

시하였다 (Choi et al. 2015).

우리나라와 같은 몬순기후 지역은 여름철에 큰 강우가 집중되지만 (Lui et al., 2012; Moon et al., 2014), 대부분은 10 mm 이하의 작은 강우사상으로 구성되어 있다 (NIER, 2007). NIER (2007)은 4개의 대표 기상관측소 (양평기상대, 대구지방기상청, 대전지방기상청, 광주지방기상청)의 30년 강우빈도를 분석한 결과 0-10 mm 강우계급의 발생빈도가 가장 많았으며, 강우계급, 50mm에서 가장 적었다. Choi et al. (2015)은 위의 4개의 기상관측소의 10년 (2001-2010) 강우자료를 강우계급별로 분석한 결과 0-10 mm, 10-30 mm, 30-50 mm, 50 mm <의 강우량비는 0.14, 0.26, 0.18, 0.42 로 큰 강우사상에 비율이 큰 것으로 제시하였다. 따라서, 원단위 산정시 강우계급별 강우특성을 반영할 수 있는 강우량비를 고려가 필요하다 (NIER, 2007). 최근 NIER (2012)에서는 토지계의 원단위 산정을 위한 표준화된 수질 및 수문관측 방법을 제시하고 있다. NIER 방법은 측정된 수질 및 유량자료를 4개의 강우계급으로 구분하고 있으며, 계급별 유출율과 EMC를 산정하고 강우량비를 고려하여 대표 값을 산정하고 있다. 이후 발생원단위는 대표 유출율과 대표 EMC, 그리고 대표 강우량을 곱하여 산정하고 있다 (NIER, 2006, 2007).

토지피복별 발생원단위는 수질오염총량관리제의 발생부하량 및 배출부하량 산정시 고려되는 중요한 요소이다. 따라서 원단위는 신뢰성 있는 자료축적과 합리적인 산정방법에 의한 평가가 요구된다. 현재 원단위 산정방법인 NIER (2012) 방법은 50 mm 이상 강우 유출율과 농도에 큰 가중치를 각각 부여하게 된다. 하지만, 이러한 접근 방법이 논 원단위 산정에 적절하지 검토된 바 없다.

본 연구에서는 NIER (2012) 방법의 원단위를 산정 절차를 분석하고, 향후 기후변화와 영농형태 변화에 적용 가능한 산정식 개선 방안을 제안하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 시험지구 및 관측부하량 산정

논에서 유출되는 오염물질을 평가하기 위해 외부 유입수가 없는 논 구역에서 강우시 유출수 조사가 수행된 Choi et al. (2015)의 연구 자료를 이용하였다. 대상지역은 전라남도 함평군 엄다면 화양리의 논 구역이며, 모니터링은 2008년부터 2012년까지 수행되었다. 구역면적은 13.69 ha 이다. 논 필지의 평균적인 유출특성을 반영하기 위해 여러 개의 필지로 구성된 구역의 배수로 말단에서 초기 2시간동안 15분 간격, 이후 4시간동안 1시간 간격, 이후에는 임의의 간격으로 수질 시료를 채수하였으며, 15분 간격으로 수위를 관측하였다. 관측된 수위자료는 수위-유량관계식을 이용하여 유량으로 환산하였다. 관측된 수질자료와 유출량 자료는 식 1을 이용하여 부하량을 산정하였다.

$$Load = \sum(Q_n \times C_n \times \Delta t) / A \quad (1)$$

여기서, *Load*는 수질항목별 관측 부하량 (kg/ha)이며, Q_n 은 관측 유출량(m³/sec), C_n 은 특정 오염물질에 대한 농도 (mg/L), Δt 는 유출지속시간 간격 (sec), *A*은 시험구역의 면적 (ha)이다. *n*은 관측 일련번호이다.

2. 국립환경과학원의 원단위 산정 방법 (NIER, 2012)

국립환경과학원의 토지피복분류별 비점오염 원단위 산정 방법은 강우계급에 따른 유출량과 유출수 수질을 고려하고 있다. 강우계급별로 측정된 유출량과 유출수 수질을 이용하여 대표 유출율과 유량기중평균농도 (EMC, Event Mean Concentration)를 산정하고 인근 기상청의 최근 10년간 일 강

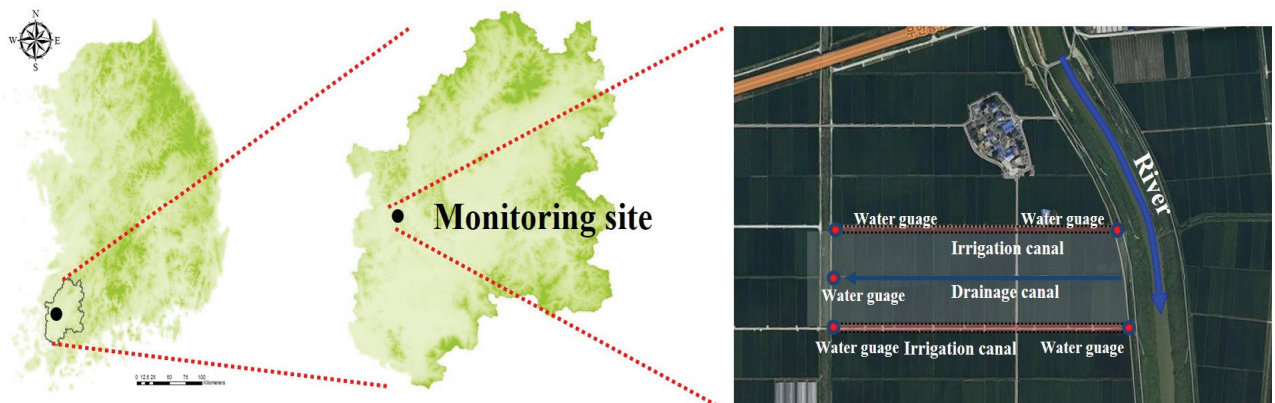


Fig. 1 Schematic diagram of the study area and the locations of instruments for measurement of water balance (Choi et al., 2015)

우 자료를 이용하여 대표 강우량을 산정한 후 오염부하량과 발생원단위를 산정한다.

토지계 발생원단위는 대표 강우량과 대표 유출율 (R_z), 대표 EMC (EMC_z)를 이용하여 다음과 같이 산정된다.

$$L_z = P^t \times R_z \times EMC_z$$

$$L_{zd} = \frac{L_z}{N_d} \quad (2)$$

L_z 는 최근 10년간 발생한 강우사상에 의해 유출된 토지피복 분류별 총 오염부하량(kg/km²), P^t 는 최근 10년간 발생한 강우사상별 총 강우량 (mm), EMC_z 는 토지피복분류별 유량가중평균농도, R_z 는 토지피복분류별 유출율이다. L_{zd} 는 토지피복분류별 발생원단위 (kg/km²/day), N_d 은 최근 10년의 총 일수 (day)이다.

토지피복분류 별 유량가중 평균농도 (EMC_z)는 강우사상별 강우계급을 고려하여 다음과 같이 산정된다.

$$EMC_z = \sum_{l=1}^L (EMC_{y,l} \times f_{y,l}) \quad (3)$$

여기서, EMC_z 는 토지피복분류 (z)별 유량가중평균농도 (mg/L), EMC_y 는 강우계급별 유량가중평균농도 (mg/L)이며, L 는 강우계급의 수, l 은 강우계급의 일련번호, f_y 는 원단위 산정기간의 강우자료로부터 산정한 강우계급별 총강우량의 비율이다.

국립환경과학원은 강우계급을 4단계 ($0 < y_1 \leq 10$, $10 < y_2 \leq 30$, $30 < y_3 \leq 50$, $y_4 > 50$ mm로 구분하고 있으며 (Choi et al., 2015) 강우계급별 유량가중평균농도 (EMC_y)는 해당 강우계급에 속하는 강우유출사상별 유량가중평균농도 (EMC_x)를 이용하여 다음과 같이 산정된다.

$$EMC_y = \frac{\sum_{m=1}^M (EMC_{x,m})}{M} \quad (4)$$

여기서, EMC_y 는 강우계급별 유량가중평균농도 (mg/L), EMC_x 는 해당 강우계급에 속하는 강우유출사상별 유량가중평균농도 (mg/L), M 은 강우계급의 총 측정횟수, m 은 측정 일련번호이다.

토지피복분류별 유출율은 개별 강우유출사상에 대한 유출

율과 강우계급을 고려하여 다음과 같이 산정된다.

$$R_z = \sum_{l=1}^L (R_{y,l} \times f_{y,l}) \quad (5)$$

R_z 는 토지피복분류별 유출율, R_y 는 강우계급별 유출율, f_y 는 최근 10년간 강우자료로부터 산정한 강우계급별 총강우량의 비율, L 은 강우계급의 수, l 은 강우계급의 일련번호이다. 강우계급별 유출율 (R_y)은 다음과 같다.

$$R_y = \frac{\sum_{m=1}^M (R_{x,m})}{M} \quad (6)$$

여기서, R_y 는 강우계급별 유출율, R_x 는 해당 강우계급에 속하는 강우유출사상별 유출율, M 은 강우계급별 강우유출사상의 조사횟수, m 은 강우유출사상의 일련번호이다.

3. NIER(2012) 방법의 토지피복별 원단위 산정방안 개선

개선된 원단위 산정방법(revised NIER, r_NIER)에서는 강우계급별 유량가중 평균농도(EMC_y)와 유출율(R_y), 강우량비(f_y)를 고려하여 다음과 같이 정의된다.

$$r_NIER_z = P^t \times \sum_{l=1}^L (EMC_{y,l} \times R_{y,l} \times f_{y,l}) \quad (7)$$

r_NIER_z 는 토지피복분류별 유량가중평균부하량 (kg/km²), P^t 는 최근 10년간 발생한 강우사상별 총강우량 (mm), EMC_y 는 강우계급별 유량가중평균농도 (mg/L), R_y 는 강우계급별 유출율, f_y 는 최근 10년간 강우자료로부터 산정한 강우계급별 총강우량의 비율, L 는 강우계급의 수, l 은 강우계급의 일련번호이다.

따라서, r_NIER_z 를 이용한 토지피복분류별 발생원단위 (r_NIER_{zd})는 다음과 같다.

$$r_NIER_{zd} = \frac{r_NIER_z}{N_d} \quad (8)$$

r_NIER_{zd} 는 토지피복분류별 발생원단위 (kg/km²/day), N_d 은 최근 10년의 총 일수이다.

4. NIER(2012)와 r_NIER 방법의 원단위 차이 규명

계급별 유출율 (R_y)과 계급별 강우량비 (f_y), 그리고 계급별 유량기중평균농도 (EMC_y)의 변화에 따른 NIER 방법과 r_NIER 방법의 원단위 차이 원인을 규명하기 위하여 Microsoft Excel의 random 함수를 이용하여 각 강우계급의 R_y , f_y , EMC_y (BOD 대상)를 $\pm 20\%$ 범위에서 임의로 생성하였고, NIER 방법과 r_NIER 방법을 적용하여 100개의 원단위 산정하고 비교분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 강우유출수 조사방법에 의한 원단위 산정방법 고찰

국립환경과학원의 NIER 방법의 토지피복분류별 비점오염 원단위 산정식인 식 2에 식 3과 식 5를 대입하면 다음과 같이 풀어 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 L_z &= P^t \times \sum_{l=1}^L (EMC_{y,l} \times f_{y,l}) \times \sum_{l=1}^L (R_{y,l} \times f_{y,l}) \\
 &= P^t \times (EMC_{y,1} f_{y,1} + EMC_{y,2} f_{y,2} + \dots + EMC_{y,4} f_{y,4}) \\
 &\quad \times (R_{y,1} f_{y,1} + R_{y,2} f_{y,2} + \dots + R_{y,4} f_{y,4}) \quad (9) \\
 &= P^t \times (EMC_{y,1} f_{y,1}^2 R_{y,1} + EMC_{y,1} f_{y,1} f_{y,2} R_{y,2} + \dots + \\
 &\quad EMC_{y,4} f_{y,4} f_{y,3} R_{y,3} + EMC_{y,4} f_{y,4}^2 R_{y,4})
 \end{aligned}$$

식 9를 살펴보면 계급 1의 강우량비 ($f_{y,1}$)가 두 번 곱해지거나 계급 1의 유량기중평균농도 ($EMC_{y,1}$) 및 강우량비 ($f_{y,1}$)가 다른 강우계급에 해당하는 유출율 ($R_{y,2}$, $R_{y,3}$, $R_{y,4}$) 및 강우량비 ($f_{y,2}$, $f_{y,3}$, $f_{y,4}$)와 곱하여지는 문제가 발생한다. 따라서 NIER 방법에 의한 원단위 산정방법은 산정과정에서 오류가 있다. 본 연구에서는 NIER 방법의 위와 같은 문제를 식 10과 같이 개선하였으며 r_NIER로 명명하였다. 각 강우계급에 해당하는 EMC_y , f_y , R_y 를 계급간의 곱으로 분리함으로써 다른 계급과의 상관성이 발생하는 것을 방지하였다.

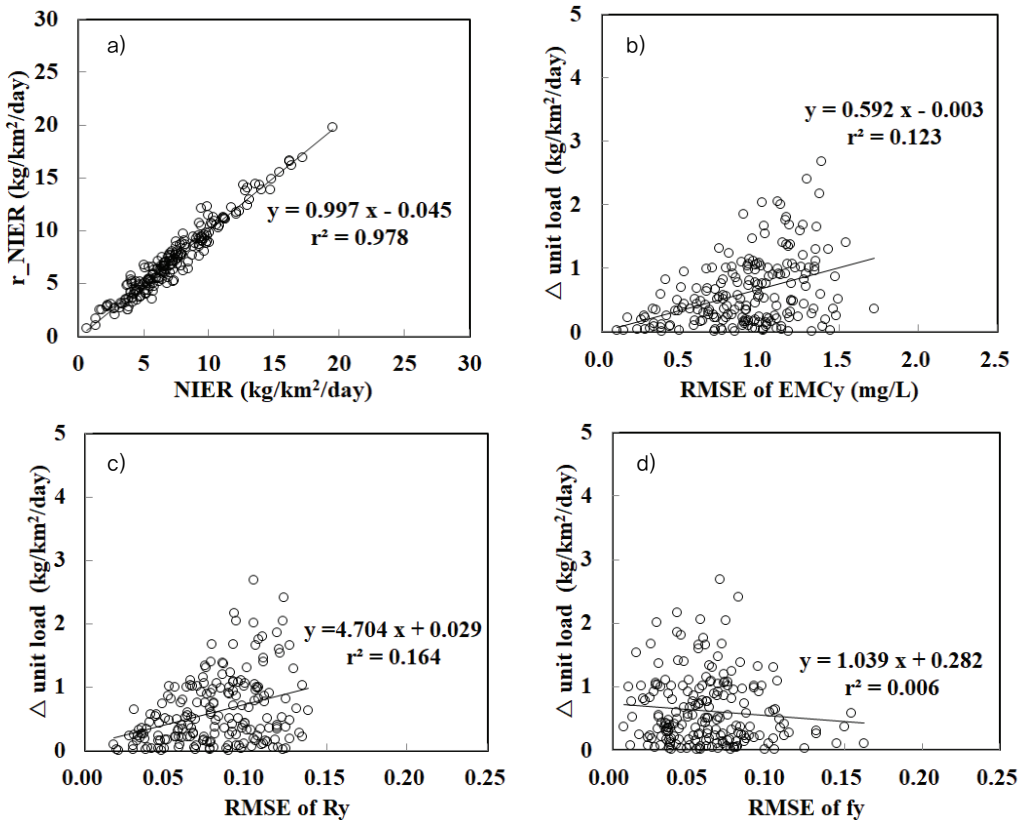


Fig. 2 (a) A comparison of NIER and r_NIER methods for BOD unit load. (b) Difference of BOD unit load (Δ unit load = |NIER unit load - r_NIER unit load|) was affected by RMSE (root mean square error) of event mean concentration by rainfall level (EMC_y) and (c) that of runoff ratio by rainfall level (R_y) but (d) was not affected by that of rainfall ratio by rainfall level

$$\begin{aligned}
 r_NIER &= P^t \times \sum_{l=1}^L (EMC_{y,l} \times R_{y,l} \times f_{y,l}) \\
 &= P^t \times (EMC_{y,1} R_{y,1} f_{y,1} + EMC_{y,2} R_{y,2} f_{y,2} \\
 &\quad + EMC_{y,3} R_{y,3} f_{y,3} + EMC_{y,4} R_{y,4} f_{y,4})
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Fig. 2는 random 함수를 이용하여 각 강우계급의 R_y , f_y , EMC_y (BOD 대상)를 $\pm 20\%$ 범위에서 임의로 생성하고, NIER 방법과 r_NIER 방법을 적용하여 비교한 결과이다. 두 방법으로 산정된 원단위를 비교한 결과 R^2 는 0.978로 매우 높은 상관관계를 보였다 (Fig. 2(a)). 그러나 두 방법이 어느 정도 편차가 있는 것을 확인하였다.

NIER 방법의 경우 계급 간 상관성이 발생하며 (식 9), r_NIER 방법의 경우 계급 간 상관성이 배제되었으므로 (식 10) 두 방법으로 산정된 원단위 결과의 차이는 계급 간 편차가 클수록 증가할 것이라 판단하였다. 따라서 임의 생성된 EMC_y , R_y , f_y 의 계급 간 표준편차와 두 방법에 의해 산정된 원단위의 차이 (Δ unit load)를 비교한 결과 EMC_y 와 R_y 의 경우 강우계급간 표준편차가 클수록 두 방법 간 원단위의 차이가 큰 것으로 나타났고 (Fig 2(b)와(c)) f_y 의 차이는 두 원단위 차이 발생에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다 (Fig. 2(d)). 이러한 결과는 다른 수질항목 (BOD, COD, TOC, SS, T-N)에서도 유사하였다.

한편, NIER 방법과 r_NIER 방법의 산식을 분석하여 두 방법 간 차이의 원인을 판단하였다. 강우계급별 강우량비의 총합은 항상 1 이므로 $f_{y,1}$ 을 $1 - f_{y,2} - f_{y,3} - f_{y,4}$ 로 표현할 수 있다. 이를 NIER 방법에 대입하면 식 9를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 L_z &= P^t \times (EMC_{y,1} f_{y,1} (1 - f_{y,2} - f_{y,3} - f_{y,4}) R_{y,1} \\
 &\quad + EMC_{y,1} f_{y,1} f_{y,2} R_{y,2} + \dots \\
 &\quad + EMC_{y,4} f_{y,4} f_{y,3} R_{y,3} \\
 &\quad + EMC_{y,4} f_{y,4} (1 - f_{y,1} - f_{y,2} - f_{y,3}) R_{y,4})
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

식 11을 정리하면 식 12와 같이 표현된다. 따라서 NIER 방법과 r_NIER 방법에 의해 산정된 원단위는 e 만큼의 차이를 보인다. e 값은 원단위에 비해 매우 작은 값을 보이는데 그 원인으로 식 (12)를 살펴보면, EMC_y 에 기댓값이 0.25인 f_y 가 두 번 곱해지고 또한 R_y 의 계급간 차이가 (경험적으로 0 이하의 매우 작은 값임) 곱해지기 때문이다. 결국 NIER 방법과 r_NIER 방법에 의해 산정된 원단위는 Fig. 2(a)와 같이 상당히 유사한 값을 보이며 Fig. 2(b), Fig. 2(c)와 같이 EMC_y , R_y 의 계급 간 차이에 따라 e 만큼의 차이가 발생한다.

$$\begin{aligned}
 L_z &= P^t \times \sum_{l=1}^L EMC_{y,l} f_{y,l} R_{y,l} + e \\
 e &= P^t \times \left[\begin{aligned}
 &+ EMC_{y,1} f_{y,1} \{ f_{y,2} (R_{y,2} - R_{y,1}) + f_{y,3} (R_{y,3} - R_{y,1}) + f_{y,4} (R_{y,4} - R_{y,1}) \} \\
 &+ EMC_{y,2} f_{y,2} \{ f_{y,1} (R_{y,1} - R_{y,2}) + f_{y,3} (R_{y,3} - R_{y,2}) + f_{y,4} (R_{y,4} - R_{y,2}) \} \\
 &+ EMC_{y,3} f_{y,3} \{ f_{y,1} (R_{y,1} - R_{y,3}) + f_{y,2} (R_{y,2} - R_{y,3}) + f_{y,4} (R_{y,4} - R_{y,3}) \} \\
 &+ EMC_{y,4} f_{y,4} \{ f_{y,1} (R_{y,1} - R_{y,4}) + f_{y,2} (R_{y,2} - R_{y,4}) + f_{y,3} (R_{y,3} - R_{y,4}) \}
 \end{aligned} \right]
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

2. 강우기간 설정에 따른 원단위 산정 결과

원단위 산정식은 고려되는 강우량의 기간에 따라 대표 강우량 (P^t) 및 강우량비 (f_y), 대표 유량기중평균농도 (EMC_z), 대표 유출율 (R_z)에 영향을 받으며, 각 수질항목의 원단위 값이 변화된다. 따라서, 본 연구에서는 강우설정기간에 따른 변화를 고찰하였다. 국내의 강우특성을 대표하기 위해 수계별 대표 기상대 (한강: 양평기상대, 낙동강: 대구지방기상청, 금강: 대전지방기상청, 영산강: 광주지방기상청)를 선정하고 1981년부터 2010년까지 총 30년의 강우량을 수집하였다. 수집된 4개 기상대의 평균 일 강우자료는 period 1 (1981-1990), period 2 (1991-2000), period 3 (200-2010) 총 10년 기간씩 구분하였다. period 1, 2, 3의 연평균 강우량은 1295.7 mm, 1273.9 mm, 1363.8 mm 로 period 3에서 가장 큰 강우량을 보였다 (Table 1). 강우계급별 변화를 살펴보면, 50 mm 이하의 강우계급에서는 기간변화에 따른 큰 차이를 보이지 않는 반면, 50 mm를 초과하는 강우계급에서는 강우량이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 계급별 강우량비는 기간별 강우량의 변화를

Table 1 The variation of rainfall and rainfall factor by rainfall application periods

rainfall classification	Total rainfall			rainfall factor		
	period 1	period 2	period 3	period 1	period 2	period 3
0 < R ≤ 10	201.5	200.9	207.1	0.16	0.16	0.15
10 < R ≤ 30	380.4	348.5	365.1	0.29	0.27	0.27
30 < R ≤ 50	246.8	232.7	238.5	0.19	0.18	0.17
50 < R	467.1	491.8	553.1	0.36	0.39	0.41
sum	1295.7	1273.9	1363.8	1.00	1.00	1.00

※ applied rainfall period - period 1 : (1981-1990); period 2 (1991-2000); period 3 (200-2010)

반영하여 변화하였다. 국내의 강우량은 1990년대 이후 증가하는 경향을 보이는 것으로 보고되고 있으며 (Choi et al., 2010; Moon et al., 2011), 특히 1954년부터 2010년까지 국내 14개 지점의 일 강우량의 변화를 분석한 결과 강우사상의 규모는 감소하는 경향을 보이지만, 호우의 크기는 증가되는 것으로 보고하였다 (Choi et al., 2011). 본 연구에서 설정된 대표 강우량은 period 1에서 period 3으로 갈수록 강우량은 증가하는 것으로 나타나 선행 연구결과와 강우량 변화와 유사한 결과를 보였다.

본 연구에서 적용된 학야지구 (2008-2012)의 계급별 유출율(R_y)은 각각 $0 < R \leq 10$ mm 0.39, $10 < R \leq 30$ mm 0.26, $30 < R \leq 50$ mm 0.37, 50 mm $< R$ 0.44 였다. $10 < R \leq 30$ mm의 강우계급을 제외하고 다른 강우계급에서는 큰 차이를 보이지 않았다. NIER (2012) 방법으로 각 유출율에 강우설정기간이 다른 period 1, period 2, period 3의 강우량비를 적용하여 산정된 대표 유출율은 큰 차이를 보이지 않았으며, period 1, 2, 3의 BOD, COD, TOC, SS, T-N, T-P의 강우계급별 EMC_y 역시 강우설정기간에 따른 대표 EMC_z 값의 차이가 미미하였다 (Fig 3). NIER 방법으로 산정된 원단위는 Fig 4(a)에 제시하였

으며, period 1, 2, 3의 차이는 10% 이내의 값을 보였다. 10%의 원단위 차이는 유출율과 EMC_z 의 차이보다는 적용되는 총 강우량의 차이의 영향으로 판단하였으며, period 2와 3의 강우량의 차이는 약 7%의 차이를 보였다. 특히, 강우적용기간에 따른 변화된 강우량과 강우량비의 변화에 따른 원단위의 변화를 분석하기 위해 period 1, 2, 3의 시나리오에 강우량 변화를 제외한 2008년부터 2012년까지 관측자료로 산정된 EMC_y 와 R_y 가 동일하게 적용되는데, 관측자료로 산정된 EMC_y 와 R_y 의 변화가 크지 않기 때문에 원단위 변화에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 판단된다 (식 12).

r_NIER 방법으로 산정된 period 1, 2, 3의 BOD, COD, TOC, SS, T-N, T-P 원단위는 Fig 4(b)와 같다. r_NIER 방법으로 산정된 원단위 역시 유사한 경향을 보였다. NIER 방법과 r_NIER 방법에 따른 BOD, COD, TOC, SS, T-N, T-P의 원단위 차이는 2%이내의 차이를 보여 두 방법간 원단위 차이는 크지는 않는 것으로 나타났다.

NIER 방법은 비점오염 부하량산정에 강우의 특성을 반영하여 토지계 원단위를 산정하고 있다. 기후변화는 강우 강도 및 빈도 변화에 큰 영향을 주는 것으로 보고되고 있으며 (Ryu

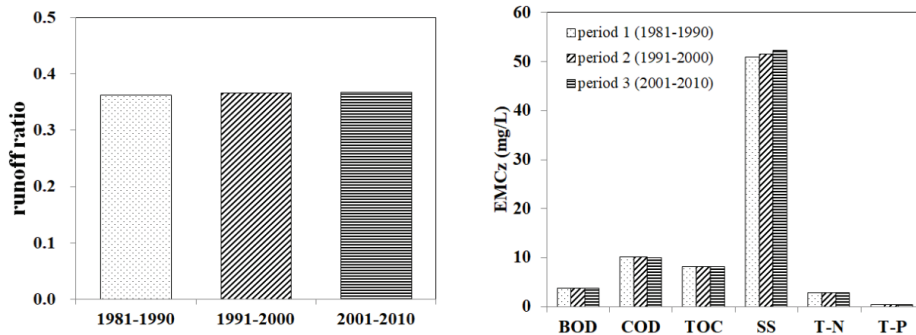


Fig. 3 The representative runoff ratio and EMCs by estimated NIER method

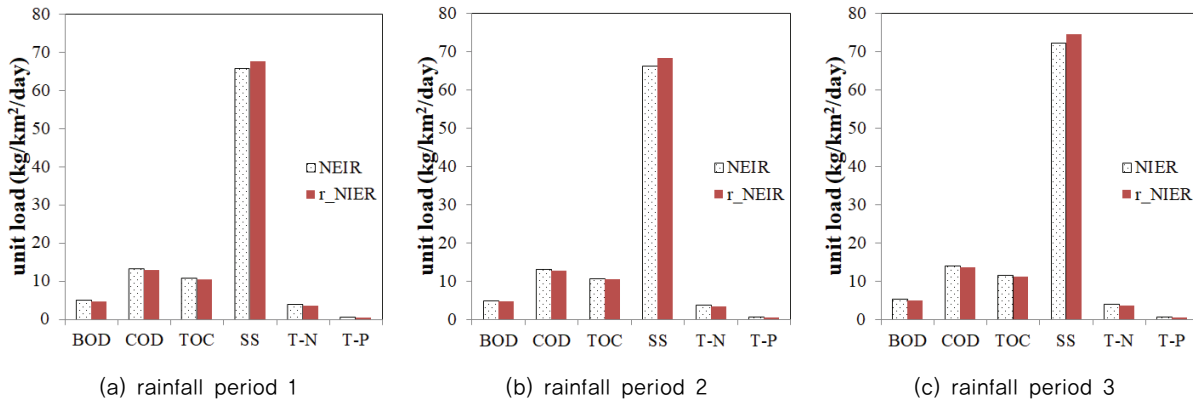


Fig. 4 Unit load of water quality constituents determined by NIER and r_NIER method and applied rainfall periods (rainfall period 1 : 1981-1990; rainfall period 2 : 1991-2000; rainfall period 3 : 2001-2010)

et al., 2014; Kim and Park, 2018; Jeung et al., 2018), 국내 역시 강우의 특성이 1990년 이후 변화된 특성을 보이는 것으로 보고되었다 (Choi et al., 2010). 이러한 강우특성의 변화는 비점오염원과 밀접한 관련되어 있다 (Ahn et al., 2009; Park et al., 2015; Choi, 2019). 따라서, 기후변화에 따른 강우 및 유출의 변화를 고려할 때, 원단위 산정시 인자사이의 교차영향을 방지하고 기상변화에 따라 수계로 유입되는 논의 오염부하량을 합리적으로 평가할 수 있는 수정된 NIER 산정방법의 적용이 필요하다.

IV. 결 론

본 연구에서는 성공적인 수질오염총량관리제 추진을 위해 토지계 발생부하량 산정을 위해 제시되고 있는 국립환경과학원 “강우유출수 조사방법”의 단일토지피복지역의 원단위를 합리적으로 산정하기 위한 방법을 검토하고 개선방안을 모색하였다.

NIER 방법과 r_NIER 방법의 예민도를 분석한 결과 두 방법의 원단위는 EMC, 유출율, 강우량 편차에 따라 차이가 나는 것으로 나타났다. 또한 두 방법 모두 강우기간 선정에 따른 강우량의 영향이 원단위 산정에 가장 큰 것으로 판단되었다. 본 연구에서 적용된 논 지역의 경우 강우계급별 유출율과 BOD, COD, TOC, SS, T-N, T-P의 EMC_y 는 큰 차이를 보이지 않았기 때문에 두 방법 간의 원단위 차이는 크지 않은 것으로 판단된다. 하지만, 기후변화에 따른 강우 패턴의 변화, 영농활동 변화에 따른 수질항목별 농도 변화가 발생할 경우 오차의 범위가 증가될 우려가 있다. 따라서, 강우량비(f_y)와 유출율(R_y), EMC_y 의 교차영향을 제거한 수정된 NIER 방법을 적용하는 원단위 산정 방법이 합리적인 원단위 산정에 타당하다고 추정되며 향후 추가적인 모니터링을 통해 이를 규명할 필요가 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술연구개발사업(과제번호: PJ013417)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- An, K. G., and W. M. Yang, 2007. Water quality characteristics in Keum river watershed. *Journal of the Limnology* 40(1): 110-120 (in Korean).
- Ahn, S. R., M. J. Park, G. A. Park, and S. J. Kim, 2009. Assessing future climate change impact on hydrologic components of Gyeongsancheon watershed. *Journal of Korean water Resources Association* 42(1): 33-50 (in Korean).
- Chin, Y. M., S. W. Park, S. M. Kim, M. S. Kang, and M. G. Kang, 2002. Nutrient loads estimation at paddy using CREAM-PADDY model. *Journal of Korean Society of Rural Planning* 8(1): 60-68 (in Korean).
- Choi, S. K., 2019. APEX-paddy model development and climate change impact assessment for paddy rice. Ph.D. diss., *Seoul National University* (in Korean).
- Choi, D. H., J. W. Jung, K. S. Yoon, W. J. Choi, S. H. Cho, J. A. Beom, and S. H. Yoo, 2015. Comparison of unit load from paddy field by various estimation methods. *Journal of Environmental Impact Assessment* 24(5): 407-419 (in Korean). doi/10.14249/eia.2015.24.5.407.
- Choi, K. S., J. Y. Moon, D. W. Kim, H. R. Byun, and R. H. Kripalani, 2010. The significant increase of summer rainfall occurring in Korea from 1998. *Theoretical and Applied Climatology* 102: 275-286 (in Korean).
- Choi Y. E., M. G. Kim, Y. J. Kim, and C. Y. Park, 2011. Characteristics and changes of extreme precipitation events in the Republic of Korea, 1954-2010: their magnitude, frequency, and percent to total precipitation. *Journal of climate Research* 6(1): 45-58 (in Korean).
- Jeon, J. H., C. C. Yoon, K. W. Jung, and J. H. Jang, 2005. HSPF-paddy development for simulating pollutant loadings from paddy fields. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 47(7): 57-66 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2005.47.7.057.
- Jeon, J. H., C. C. Yoon, H. S. Hwnag, and K. S. Yoon, 2003. Water quality model development for loading estimates from paddy field. *Journal of the Limnology* 36(3): 344-355 (in Korean).
- Jeung, S. J., B. S. Kim, and S. K. Chae, 2018. Impact assessment of climate change on disaster risk in North Korea based on RCP8.5 climate change scenario. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 38(6): 809-818 (in Korean). doi:10.12652/Ksce.2018.38.6.0809.
- Jin, S. H., J. W. Jung, K. S. Yoon, W. J. Choi, D. H. Choi, S. D. Kim, J. H. Kang, and Y. J. Choi, 2010. Probability distribution of BOD EMC from paddy fields. *Journal of the Environmental Sciences* 19(9): 1153-1159 (in Korean). doi:10.5322/JES.2010.19.9.1153.

12. Jung, J. P., 2014. Estimation method of pollution sources and loads for management of total maximum daily load. Ph.D. Diss., *Chonbuk National University* (in Korean).
13. Jung, J. W., K. S. Yoon, W. J. Choi, W. Y. Choi, S. H. Joo, S. S. Lim, J. H. Kwak, S. H. Lee, D. H. Kim, and N. I. Chang, 2008. Improvement measures of pollutants unit-loads estimation for paddy fields. *Journal of Korean Society on Water Quality* 24(3): 291-296 (in Korean).
14. Jung, J. W., D. H. Choi, and K. S. Yoon, 2014. Selecting probability distribution of event mean concentrations from paddy fields. *Journal of Environmental Impact Assessment* 23(4): 285-295 (in Korean). doi:10.14249/eia.2014.23.4.285.
15. Kang, S. A., and K. G. An, 2006. Spatio-temporal variation analysis of physico-chemical water quality in the Yeongsan River watershed. *Journal of the Limnology* 39(1): 73-84 (in Korean).
16. Kim, T. W., and D. H. Park, 2018. Guidelines for extreme drought planning adaptation to climate change. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 66(7): 43-48 (in Korean).
17. Kim, J. I., J. W. Choi, and K. G. An, 2014. Spatial and temporal variations of water quality in and urban Miho stream and some influences of the tributaries on the water quality. *Journal of Environmental Science International* 23(3): 433-445 (in Korean). doi:10.5322/JESL.2014.23.3.433.
18. Kwon, H. G., S. H. Shin, G. S. Kim, Y. G. Kim, D. S. Shin, and T. H. Im, 2017. The calculation of NPS load per unit area in paddy fields to the Nakdong River basin. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 17(3): 409-419 (in Korean). doi:10.9798/KOSHAM.2017.17.3.409.
19. Lee, J. B., J. Y. Lee, and J. S. Kim, 2017. SS and COD runoff from a rice field watershed during storm events in the growing and non-growing seasons. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 59(2): 91-99 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2017.59.2.091.
20. Lee, J. H., 2012. Estimation of pollutant sources in the unit watersheds of TMDLs, master's thesis, *Chungju National University* (in Korean).
21. Liu, H. W., T. J. Zhou, Y. X. Zhu, and Y. H. Lin, 2012. The strengthening ease asia summer moonsoon since the early 1990s. *Chinese Science Bulletin* 57: 1553-1558. doi:10.1007/s11434-012-4991-8.
22. Ministry of Environment (MOE), 1995. Research on survey monitoring for non-point source discharge (in Korean).
23. Ministry of Environment (MOE), 2006. Water environment foundation plan (in Korean).
24. Moon, J. Y., C. Y. Park, and Y. E. Choi, 2011. Changes in the characteristics of summer rainfall caused by the regime shift in the republic of Korea. *Journal of the Korean Geographical Society* 46(3): 277-290 (in Korean). doi:10.14383/cri.2014.9.4.269.
25. Moon, J. Y., Y. A. Kwon, Y. E. Choi, and I. H. Park, 2014. A study on the characteristics of summer rainfall over South Korea in recent 5 years. *Journal of Climate research* 9(4): 269-282 (in Korean). doi: 10.14383.cri.2014.9.4.269.
26. National Institute of Environmental Research (NIER), 2005. Foreign total maximum daily load system: focus on America (in Korean).
27. National Institute of Environmental Research (NIER), 2006. Evaluation of non-point sources loadings(1): impervious land. 1-78. 11-1480523-000134-01. Incheon, National Institute of Environmental Research (in Korean).
28. National Institute of Environmental Research (NIER), 2007. Evaluation of non-point sources loadings(2): stormwater monitoring. 1-56. 11-1480523-000219-01. Incheon, National Institute of Environmental Research (in Korean).
29. National Institute of Environmental Research (NIER), 2012. Rainfall-runoff survey methods (in Korean).
30. Park, M. H., H. R. Cho, and B. K. Koo, 2015. Nu evaluation of climate change effects on pollution loads of the Hwangryong River watershed in Korea. *Journal of Korean Water Resources Association* 48(3): 185-196 (in Korean).
31. Relevant Ministerial Consortium, (2012). The 2nd comprehensive plan on nonpoint source management, 11-1480000-001222-01. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (in Korean).
32. Ryu, J. C., Y. S. Park, M. D. Han, K. H. Ahn, D. H. Kum, K. J. Lim, and B. K. Park, 2014. Enhancement of land load estimation method in TMDLs for considering of climate change scenarios. *Journal of the Korean Society on Water Environment* 30(2): 212-219 (in Korean).
33. Shin, E. S., J. Y. Choi, and D. H. Lee, 2001. Estimation of non-point source pollutant unit-loads in surface runoff considering land-use and basin characteristics. *Journal of the Korean Society on Water Quality* 17(2): 137-146 (in Korean).