

Research Paper

## 산정방법에 따른 논 원단위 비교

최동호\* · 정재운\*\* · 윤광식\* · 최우정\* · 조소현\*\*\* · 범진아\*\*\* · 유승화\*\*\*

전남대학교 지역바이오시스템공학과\*, 전라남도 환경산업진흥원\*\*, 국립환경과학원 영산강물환경연구소\*\*\*

### Comparison of Unit Load from Paddy Field by Various Estimation Methods

Dongho Choi\* · Jaewoon Jung\*\* · Kwangsik Yoon\* · Woojung Choi\* ·  
Sohyun Cho\*\*\* · Jina Beom\*\*\* · Seungwha Yoo\*\*\*

Department of Rural & Bio-Systems Engineering, Chonnam National University\*

Jeollanamdo Environmental Industries Promotion Institute\*\*

Yeongsan River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research\*\*\*

**요약** : 본 연구는 영산강 수계 1지점과 섬진강 수계 1지점의 논 유출수 4년간 유량과 수질 모니터링 자료를 이용하여 원단위 산정방법에 따른 원단위 차이를 비교하였다. 원단위 산정방법은 실측부하량을 이용한 방법, 국립환경과학원의 새로운 원단위 산정 방법(NIER 방법), EMC 확률분포모형 중앙값을 이용한 방법, 산술평균 EMC와 산술평균 유출율을 이용한 방법을 활용하였다. 원단위 산정방법별 차이를 살펴본 결과 실측부하량을 이용한 방법과 NIER 방법의 원단위는 서로 비슷한 값을 보였지만, 확률분포모형(Log-normal, Gamma)을 이용한 원단위는 상대적으로 작게 나타났다. 한편 산술평균 EMC와 유출율을 이용하여 산정된 원단위는 NIER 방법보다 원단위가 크게 산정되는 것으로 나타났다. 또한 NIER 방법의 원단위는 1995에 조사된 환경부 원단위에 비해 BOD, COD, SS는 큰 값을 T-N은 작은값을, T-P는 비슷한 값을 산정되는 것으로 나타났다.

**주요어** : 논, 원단위, EMC, 확률분포, 유출율

**Abstract** : The unit load of paddy field was estimated by several methods and compared in this study. Four year field study was conducted at the paddy fields located in Yeongsan river and Sumjin river basins. The unit load was estimated by four methods; ① averaging field monitored load; ② NIER (National Institute of Environmental Research) method which use EMC(Event Mean Concentration) and runoff ratio of rainfall groups with rainfall weighting factors; ③ method using EMC determined by best fit probability distribution; ④ method using arithmetic mean EMC and runoff ratio. The result of this study showed that the unit loads of water quality constituents by field monitoring was similar to those of NIER method whereas those by probability distribution(log-normal, gamma) method were less than unit loads of NIER method. The unit loads by arithmetic mean EMC and runoff ratio were larger than those by NIER method. The unit load by NIER method showed higher BOD, COD, SS,

lesser T-N, and similar T-P values when compared to unit loads determined by MOE in 1995.

Keywords : paddy field, unit load, EMC, probability distribution, runoff ratio

## I. 서론

비점오염은 수계의 수질에 기여하는 정도가 높으므로 근본적인 수질개선을 위해서는 비점오염원의 관리가 중요하다. 우리나라는 1980년대부터 비점오염에 관한 연구를 시작하여 1980년대 후반기부터 비점오염 부하량에 관한 과학적인 접근을 시도하기 시작했다. 환경부에서는 1995년 비점오염원 조사연구 사업을 통해 다양한 원단위 산정방법을 소개하였으며, 강우시 비점오염을 실측하여 유효우량비방법으로 도시용지, 논, 밭, 목장용지, 산지의 유출부하 원단위를 제시하였다. 하지만 단기적인 자료를 이용하여 원단위를 산정하였기 때문에 다양한 강우사상의 비점오염원의 유출 특성을 충분히 반영하지 못한 약점이 있는 것으로 지적받았다(신동석, 2007; 신은성 등, 2001; 정재운 등, 2008, 2009).

논은 전체 토지면적의 10.9%(108,4만 ha)로 산림을 제외하고 인간의 활동이 이루어지는 토지이용 중 가장 넓은 면적을 차지하고 있다(정재운 등, 2009). 정재운 등(2009)은 논 유역을 대상으로 유효우량방법을 이용하여 원단위를 산정했을 때, 실측 자료와 오차정도를 평가한 결과 유효우량방법은 실측원단위에 비해 과소하게 산정된다고 하였으며, 특히 미세측 유역에서 수 개의 강우사상에 대해서 샘플링을 실시하여 비우량법이 적용될 경우 실측값 추정에 대한 불확실성은 가중될 것으로 보고하였다. 또한 최우정 등(2007)은 환경부에서 제안한 토지이용별 비점오염부하산정 범용식을 이용하여 실제 논 지역에 적용하여 평가한 결과 T-P를 제외하고 T-N과 SS, COD는 실측값을 정확히 모의하지 못했다고 보고하였다. 이는 매개변수가 수문인자만을 고려하기 때문에 영농활동(비료의 종류, 시비시기, 살포량, 이앙일자)을 반영하지 못하는 것으로 판단하였으며, 이를 고려할 수 있는 범용식의 수정을 제안하였다.

토지이용별 원단위 산정을 위한 선행 연구를 살펴보면, 손현근 등(2008)은 고속도로 영업소 지역을 대

상으로 2006년부터 2007년까지 모니터링을 실시하여 TSS, COD, T-N, T-P의 원단위를 산정한 후 환경부 원단위와 비교한 결과 T-N, T-P 값이 상이함을 보고하였다. 김미리 등(2007)은 10년 평균 일 강우량과 유량가중평균농도, 토지이용 형태별 유출율을 이용하여 공업용지, 상업용지, 주거용지, 주차장, 도로에서 BOD, SS, T-N, T-P의 원단위를 제시하였으며, 토지이용별로 EMC값이 차이가 보이므로 15~30개 정도 연간 고르게 축적된 경우 해당 배출원단위로 세분화할 필요가 있다고 하였다. 김태원과 길경익(2011)은 교량지역에서 EMC 방법을 이용하여 산정된 발생원단위와 회귀식을 이용하여 산정하는 방법, 강우계급을 이용한 방법 등 3가지 방법으로 원단위를 산정하고 비교하였으며, 교량지역의 산술평균 발생부하 원단위가 회귀식과 강우계급을 이용한 발생부하 원단위 보다 높은 값을 나타내었다.

하지만, 앞선 선행연구자들에 의한 원단위 산정방법은 조사대상 수질항목, 조사빈도, 자료해석 방법이 표준화되지 못했다. 이에 국립환경과학원(2009, 2012)에서는 “강우유출수 조사방법(이하, NIER 방법)”의 제정을 통해서 조사방법과 원단위 산정방법을 통일 하였으며, 토지이용별로 계급별 강수량과 EMC, 유출율을 이용하는 원단위 산정방법을 제안하였다. 따라서 본 연구에서는 새로운 원단위 산정방법의 신뢰성을 검토하기 위해 ① 실측 부하량 년 평균치를 이용하는 방법, ② NIER 방법, ③ 확률분포모형(Log-normal, Gamma) EMC 중앙값을 이용하는 방법, ④ 산술평균 EMC와 산술평균 유출율을 이용하는 방법 등 4가지 방법에 따라 논 원단위를 산정하고 비교하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 시험지구

비점오염의 효과적인 관리를 위해 기상 및 수문특

성에 따른 토지이용별 현장모니터링이 중요하며(윤준경 등, 2002; 송인홍 등, 2012), 합리적인 오염부하 산정을 위해서는 토지이용형태 및 강우조건별 장기적인 유출 및 수질자료의 축적이 필요하다(신동석, 2007). 따라서, 본 연구의 시험지역은 기상조건과 수문특성이 다른 전라남도 함평군 엄다면 화양리의 논지구(이하 ‘학야지구’)와 전라북도 순창군 적성면 고원리(이하 적성지구)를 선정하였으며, 2009년부터 2012년까지 수문·수질 모니터링을 실시하였다. 학야지구의 관개용수는 한국농어촌공사 함평지사서 관리하는 대동저수지(관개면적 992.3 ha, 저수용량 5,309천 m<sup>3</sup>)이며, 토성은 미사질양토(모래 11.7%, 실트 61.4%, 점토 26.9%)이다. 적성지구는 내월양수장과 점촌 양수장으로부터 공급받으며, 토성은 사질양토(모래 56.6%, 실트 42.3%, 점토 1.1%)이다. 두 지역 모두 용·배수로가 구분되어 있고, 구조물화 되어 있어, 관측이 용이하다. 학야지구의 유역면적은 13.7 ha이며, 적성지구는 8.06 ha이다(Figure 1).

## 2. 수문 및 수질조사

강우량을 조사하기 위해서 각각의 시험지구 인근에 위치하고 있는 마을 회관에 강우량계(CASELLA, UK)

를 설치하여 획득하였으며, 수위자료는 배수로 말단에 공기방울 압력식 수위계(Orphimedes, Germany)를 설치하여 15분간격으로 획득하였다. 수위를 유량으로 환산하기 위해 수위변화에 따라 유속 측정을 수행하였으며, 중간단면법을 통해 유량으로 환산하였다. 이후 수위-유량관계식을 도출하였으며, 이를 이용하여 일정하게 관측된 수위자료를 유량으로 환산하였다. 또한 강우시 유출수의 시료 샘플을 위해 배수로 말단에 자동채수기(ISCO 6712)를 설치하여 1시간 간격을 유지하면서 시료를 채취하였으며, 채취된 시료는 수질공정시험법에 의거해 분석 하였다.

## 3. 원단위 산정

### 1) 관측치 년 평균 부하량을 이용한 원단위 산정

조사지역의 유출량과 농도자료로부터 부하량을 산정하고, 부하량의 연평균 값을 원단위로 산정한다(식 1).

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

여기서 Load 는 수질항목별 관측 부하량(kg/ha)이며, Qn(m<sup>3</sup>/sec), Cn는 특정 오염물질에 대한 농도(mg/L), n 는 유출지속시간 간격, An은 시험유역의 면적(ha)이다.

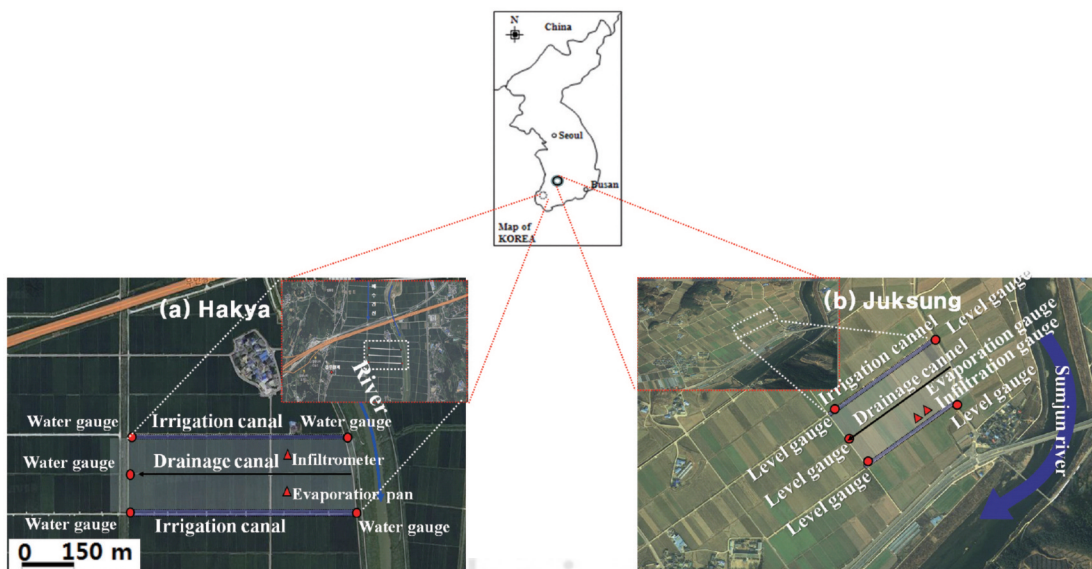


Figure 1. Location and monitoring system of the study site. (a) Hakya, (b) Juksung

2) NIER 방법(국립환경과학원, 2012)

강우의 특성을 반영하기 위해 강우계급별로 적정 모니터링을 통해 대표 유출율과 대표 EMC를 산정하고, 인근 기상청의 10년 강우 자료를 이용하여 대표 강수량을 산정한 후 원단위를 산정한다. 원단위를 산정하기 위한 세부적인 방법은 다음과 같다. 첫째, 대표 유출율은 먼저 강우에 의해 유출되는 시점부터 종료되는 시점까지 관측을 수행하며, 측정된 유출량은 해당 강우사상 강우량으로 나눔으로써 개별강우사상 유출율을 측정한다. 그 후 각 강우계급(0~10mm, 10~30mm, 30~50mm, 50mm <)으로 구분하며, 해당 강우사상 수로 나누어 준다. 이렇게 구분된 강우계급별 유출율에 계급별 강우비를 곱하고 더함으로써 대표 유출율을 산정한다. 둘째, EMC는 강우시작부터 종료시까지 수질 샘플링을 수행하며, 샘플 시점의 수질 농도와 유출량을 곱한 후 해당 강우사상 총 유출량으로 나눔으로써 개별강우사상 EMC를 산정한다. 산정된 EMC는 강우계급별로 구분하며, 각 강우계급별 EMC 수로 나누어 준다. 추후 각 강우계급별 EMC에 계급별 강우량비를 곱하고 더해줌으로써 대표 EMC를 산정한다. 셋째, 원단위는 대표 유출율과 대표 EMC, 대표 강수량의 곱으로 산정하고, 이를 365일로 나누어 준다. 여기서, 강우계급별 강우량비는 인근 기상청의 10년 일 자료를 이용하여 산정하며, 강우량을 해당 강우계급(0~10mm, 10~30mm, 30~50mm, 50mm <)으로 구분하고, 총 강수량으로

나누어 산정한다. 전국 평균 원단위 산정을 위해 유출율과 수질자료는 관측지역 자료를 이용하고, 강수량은 각 수계별 자료를 이용하여 수계별 원단위 산정 후 이를 평균 한다(Figure 2). 따라서, NIER 방법은 강우시 발생하는 유출 특성(수질, 유량)만을 고려한다.

3) 확률분포 EMC 이용 방법

정재운 등(2014)은 논유출수 EMC에 Log-normal 모형과 Gamma 분포 모형이 적합함을 규명하였다. 본 연구에서도 Log-normal 분포모형과 Gamma분포모형을 이용하여 EMC 중앙값을 산정한다. Log-normal 분포 모형의 평균 및 표준편차를  $\mu$  및  $\sigma$ , 대수를 취한 확률변수에 대한 평균 및 표준편차를  $\lambda$  및  $\zeta$ 라 하면 각 확률변수간의관계는 식 (2), (3)과 같고, Log-normal 분포 모형의 확률밀도함수는 식 (4)와 같다.

$$\mu = \exp\left(\lambda + \frac{1}{2} \zeta^2\right) \tag{2}$$

$$\sigma^2 = \mu^2 [\exp(\zeta^2) - 1] \tag{3}$$

$$f(x) = \frac{1}{x \sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \tag{4}$$

Gamma 분포의 확률밀도함수는 식(5)와 같다.

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\Gamma(\alpha)} \tag{5}$$

여기서  $x$ 는 확률변수,  $\Gamma$ 는 Gamma 함수,  $\alpha$  및  $\beta$ 는

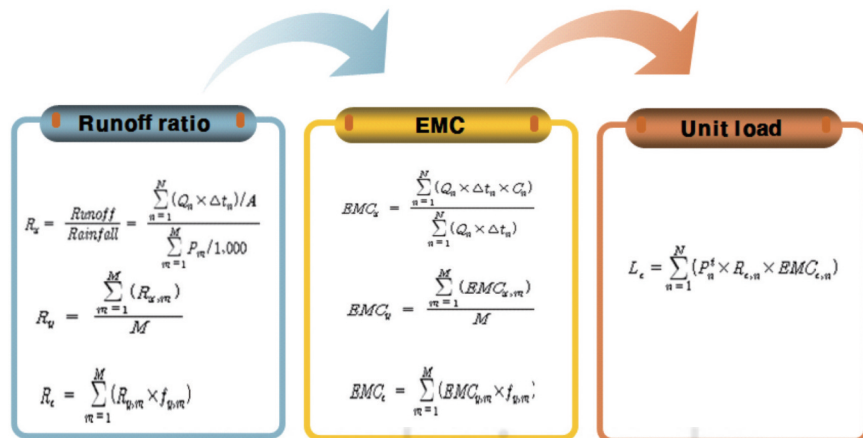


Figure 2. Estimation method of unit load by NIER(2012)

매개변수이다.

확률분포모형에 의한 원단위는 NIER 방법으로 산정된 대표 강수량과 대표 유출율, 확률분포모형의 EMC 중앙값의 곱으로 산정한다.

4) 산술평균 EMC와 유출율을 이용한 원단위 산정

먼저, 산술평균 EMC와 유출율은 관측된 개별 강우사상별 EMC와 유출율을 합하고, 해당하는 강우사상 수로 나눠서 산정한다. 그 후, 원단위는 NIER 대표 강수량과 산술평균 EMC, 산술평균 유출율의 곱으로 산정한다(식 6).

$$Load = \sum (P \times R \times EMC) \quad (6)$$

Load는 최근 10년간 발생한 강우사상에 의해 유출된 논유역의 총 오염부하량(kg/ha), P는 최근 10년간 발생한 강우사상별 총강우량(mm), EMC는 논유역의 유량가중평균농도, R는 논유역의 유출율이다.

III. 결과 및 고찰

1. 논유역의 실측 물수지와 부하량

2009년부터 2012년 조사기간동안 학야지구와 적성지구의 강수량은 각각 846.0~1,160(평균: 945.0) mm, 991.9~1,119.5(평균: 1,048.7)mm였으며, 관개량은 각각 599.9~974.6(평균: 735.4)mm, 521.4~1,002.8(평균: 721.6)mm, 유출량은 각각 601.4~837.0(평균: 754.3)mm, 802.5~1,252.5(평균: 1,002.6)mm로 조사되었다(Figure 3). 강우시 학야지구의 BOD, COD, TOC, SS, T-N, T-P의 평균 농도는 각각 3.65, 11.19, 10.01, 110.92, 2.85, 0.47 mg/L였으며, 적성지구의 평균농도는 각각 3.69, 9.92, 9.60, 58.83, 2.56, 0.46 mg/L로 나타났다(Figure 4). 두 시험지구의 영농활동, 토양의 이화학적 특성, 비료살포시기가 상이함에도 불구하고 SS를 제외하고 두 조사 지점간 EMC가 큰 차이를 보이지 않았다.

조사기간동안 학야지구의 BOD는 13.1~22.0(평

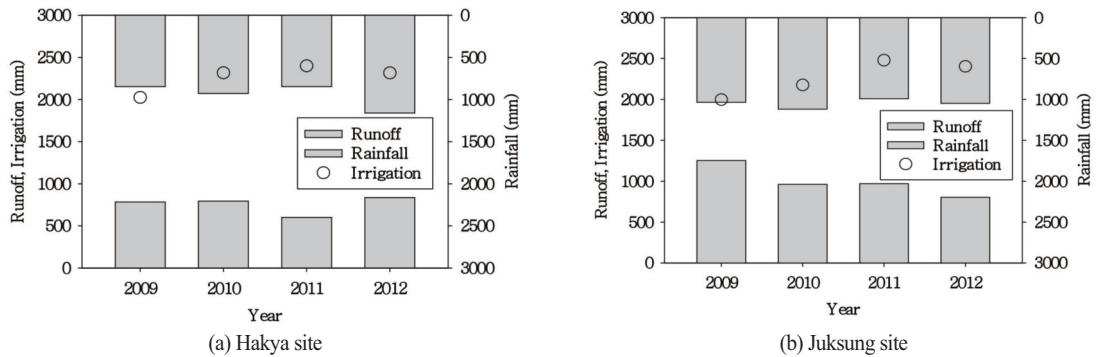


Figure 3. Water balance for monitoring sites

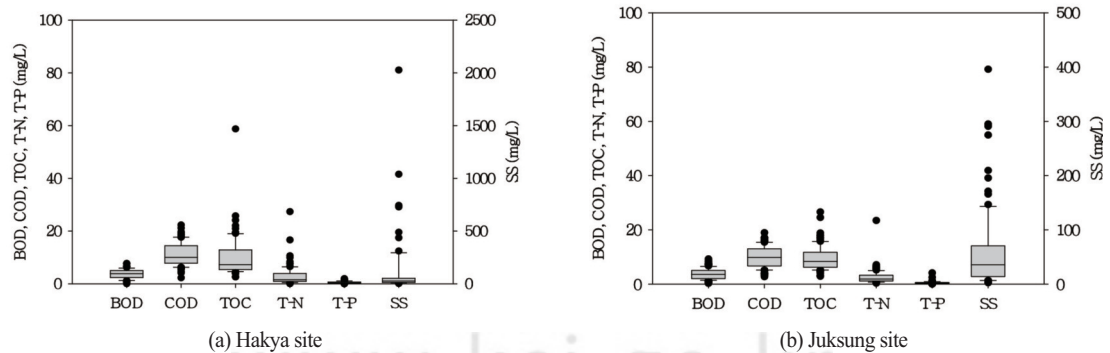


Figure 4. Observed concentration of water quality constituents

Table 1. Observed pollutant load from HY and JS

		unit: kg/ha/yr					
		BOD	COD	TOC	SS	T-N	T-P
2009	HY	19.5	46.4	30.4	381.4	11.3	1.93
	JS	35.5	65.9	76.4	287.8	21.2	2.20
2010	HY	13.1	43.7	35.6	150.9	6.2	1.28
	JS	22.2	74.6	45.2	509.9	16.8	2.70
2011	HY	22.0	43.6	44.9	403.7	10.0	2.50
	JS	24.3	60.7	46.3	258.8	11.7	1.97
2012	HY	16.8	38.6	41.3	181.7	11.2	0.51
	JS	18.8	58.2	38.9	340.3	8.9	3.23
Average		21.5	54.0	44.9	314.3	12.1	2.04

Table 2. Total rainfall and weighting factor of four river basins

	Total Rainfall(mm)					Weighting factors of rainfall class				
	0~10	10~30	30~50	50 <	sum	0~10	10~30	30~50	50 <	sum
Han river	196.2	373.8	260.8	830.2	1,661.0	0.12	0.23	0.16	0.50	1.00
Nakdong river	187.3	342.5	209.2	394.1	1,133.1	0.17	0.30	0.18	0.35	1.00
Geum river	182.9	431.1	324.0	536.9	1,474.8	0.12	0.29	0.22	0.36	1.00
Yeongsan river	225.9	383.3	260.9	646.3	1,516.2	0.15	0.25	0.17	0.43	1.00
Average	198.1	382.7	263.7	601.9	1,446.3	0.14	0.26	0.18	0.42	1.00

균: 17.9) kg/ha, COD의 경우 38.6~46.4(평균: 43.1) kg/ha, TOC의 경우 30.4~44.9(평균: 38.1) kg/ha, SS의 경우 150.9~403.7(평균: 279.4) kg/ha, T-N의 경우 6.2~11.3(평균: 9.6) kg/ha, T-P의 경우 0.5~2.5(평균: 1.6) kg/ha였으며, 적성지구의 경우 BOD는 18.8~35.5(평균: 25.2) kg/ha, COD의 경우 58.2~74.6(평균: 64.8) kg/ha, TOC의 경우 38.9~76.4(평균: 51.7) kg/ha, SS의 경우 258.8~509.9(평균: 349.2) kg/ha, T-N의 경우 8.9~21.2(평균: 14.6) kg/ha, T-P의 경우 2.0~3.2(평균: 2.5) kg/ha로 나타났다(Table 1). 두 시험지구의 BOD, COD, TOC, SS, T-N, T-P의 평균 부하량은 21.5, 54.0, 44.9, 314.3, 12.1, 2.04 kg/ha였으며, 단위면적당 일 부하량으로 환산하면 5.92, 14.50, 12.49, 83.39, 3.31, 0.56 kg/km<sup>2</sup>/day로 나타났다.

## 2. NIER 방법에 따른 논 원단위 산정

강우유출수 조사방법에 따라 원단위 산정을 위해 한강수계(양평기상대), 낙동강수계(대구지방기상청), 금강수계(대전지방기상청), 영산강수계(광주지

방기상청)의 계급별 강우량(0~10mm, 10~30mm, 30~50mm, 50mm <)을 분석하였다. 총 강우량은 한강수계 1,661mm, 낙동강수계 1,133mm, 금강수계 1,475mm, 영산강수계 1,516mm로 한강수계 강우량이 가장 크게 나타났고, 낙동강 수계에서 가장 적게 나타났다. 4대강수계의 강우자료를 이용하여 전국 대표 강우량을 산정한 결과 1,446mm로 조사되었다. 강우량비는 모든 수계에서 0~10mm 강우에서 가장 작게 나타났으며, 그 다음으로 30~50mm, 10~30mm, 50 초과 순으로 나타났다(Table 2).

각 수계별 강우계급 강우량비와 학야지구와 적성지구에서 관측된 강우사상별 유출율을 이용하여 수계별 논지역의 대표 유출율을 산정하였다. 산정결과 한강수계 0.38, 낙동강수계 0.36, 금강수계 0.36, 영산강수계 0.37으로 수계별 대표 유출율 차이는 거의 없었다. 전국 강우량비를 이용하여 산정된 대표 유출율은 0.37 이었다. 또한, 수계별 계급별 강우량비를 이용하여 수계별 BOD, COD, TOC, SS, T-N, T-P의 대표 유량가중평균농도(EMCz)를 산정한 결과 한강수계의 경우 3.68, 9.79, 7.97, 55.94, 2.63, 0.37 mg/L, 낙

Table 3. Unit load of water quality constituents by NIER method

	BOD	COD	TOC	SS	T-N	T-P
Han river	6.36	16.91	13.76	96.60	4.53	0.64
Nakdong river	4.24	11.46	9.35	56.26	3.20	0.42
Geum river	5.49	14.63	11.93	75.79	4.01	0.55
Yeongsan river	5.74	15.47	12.60	81.73	4.23	0.58
Average	5.46	14.62	11.91	77.53	3.99	0.55

unit: kg/km<sup>2</sup>/day

Table 4. Unit load of water quality constituents when EMCs determined by probability distributions

		Unit load (kg/km <sup>2</sup> /year)					
		BOD	COD	TOC	SS	T-N	T-P
Log-normal	Han river	5.01	14.63	11.98	59.74	3.00	0.48
	Nakdong river	3.25	9.49	7.78	38.78	1.95	0.31
	Geum river	4.25	12.41	10.17	50.69	2.55	0.41
	Yeongsan river	4.48	13.08	10.72	53.44	2.69	0.43
	Average	4.25	12.40	10.16	50.66	2.55	0.41
Gamma	Han river	5.35	15.11	12.35	70.71	3.33	0.54
	Nakdong river	3.47	9.81	8.01	45.90	2.16	0.35
	Geum river	4.54	12.82	1.048	60.00	2.83	0.45
	Yeongsan river	4.79	13.51	11.04	63.24	2.98	0.48
	Average	4.54	12.81	10.47	59.96	2.83	0.45

동강수계의 경우 3.78, 10.22, 8.34, 50.19, 2.85, 0.37 mg/L였다. 금강수계의 경우 3.75, 9.99, 8.14, 51.73, 2.74, 0.37 mg/L, 영산강수계의 경우 3.72, 10.02, 8.16, 52.92, 2.74, 0.37 mg/L였으며, BOD, COD, TOC, SS, T-N, T-P의 전국 대표 유량가중 평균농도는 각각 3.73, 9.98, 8.14, 52.95, 2.73, 0.37 mg/L로 나타났다. 수계별 대표 유출율과 수질 항목별 대표 유량가중평균농도는 큰 차이를 보이지 않았다.

앞서 산정된 수계별 대표 강우량과 강우량비, 대표 유출율, 대표 EMC를 이용하여 BOD, COD, TOC, SS, T-N, T-P의 원단위를 산정하였다. 강수량이 가장 크게 나타났던 한강수계의 BOD, COD, TOC, SS, T-N, T-P의 원단위는 6.36, 16.91, 13.76, 96.60, 4.53, 0.64 kg/km<sup>2</sup>/day로 타 지역에 비해 크게 나타난 반면에, 강수량이 가장 작았던 낙동강수계 경우 4.24, 11.46, 9.35, 56.26, 3.20, 0.42 kg/km<sup>2</sup>/day로 가장 작게 나타났다. 국립환경과학원의 새로운 원단위 산정 방법(NIER 방법)에 의한 논 지역 BOD,

COD, TOC, SS, T-N, T-P 전국 대표 원단위는 5.46, 14.62, 11.91, 77.53, 3.99, 0.55 kg/km<sup>2</sup>/day로 산정되었고(Table 3), 금강수계와 영산강수계의 수질항목별 원단위는 전국 원단위와 비슷한 수치를 보였다.

### 3. 확률분포 모형에 따른 원단위

확률분포 모형의 적합성을 확인하기 위해서 Kolmogorov-Smirnov 검증 방법을 사용하였으며, 유의수준 5% 범위 내에서 BOD, COD, TOC, SS, T-N, T-P는 Log-Normal 분포모형과 Gamma 분포 모형에서 적합성이 있는 것으로 나타났다(Figure 5). BOD, COD, TOC, SS, T-N, T-P의 초과확률 50% EMC(이하 EMC 중앙값)를 산정한 결과 Log-Normal 분포 모형은 2.90, 8.47, 6.94, 34.60, 1.74, 0.28 mg/L였으며, Gamma 분포 모형의 경우 3.10, 8.75, 7.15, 40.95, 1.93, 0.31 mg/L로 나타나 Log-Normal 분포보다 Gamma 분포모형에서 다소 크게 나타났다.

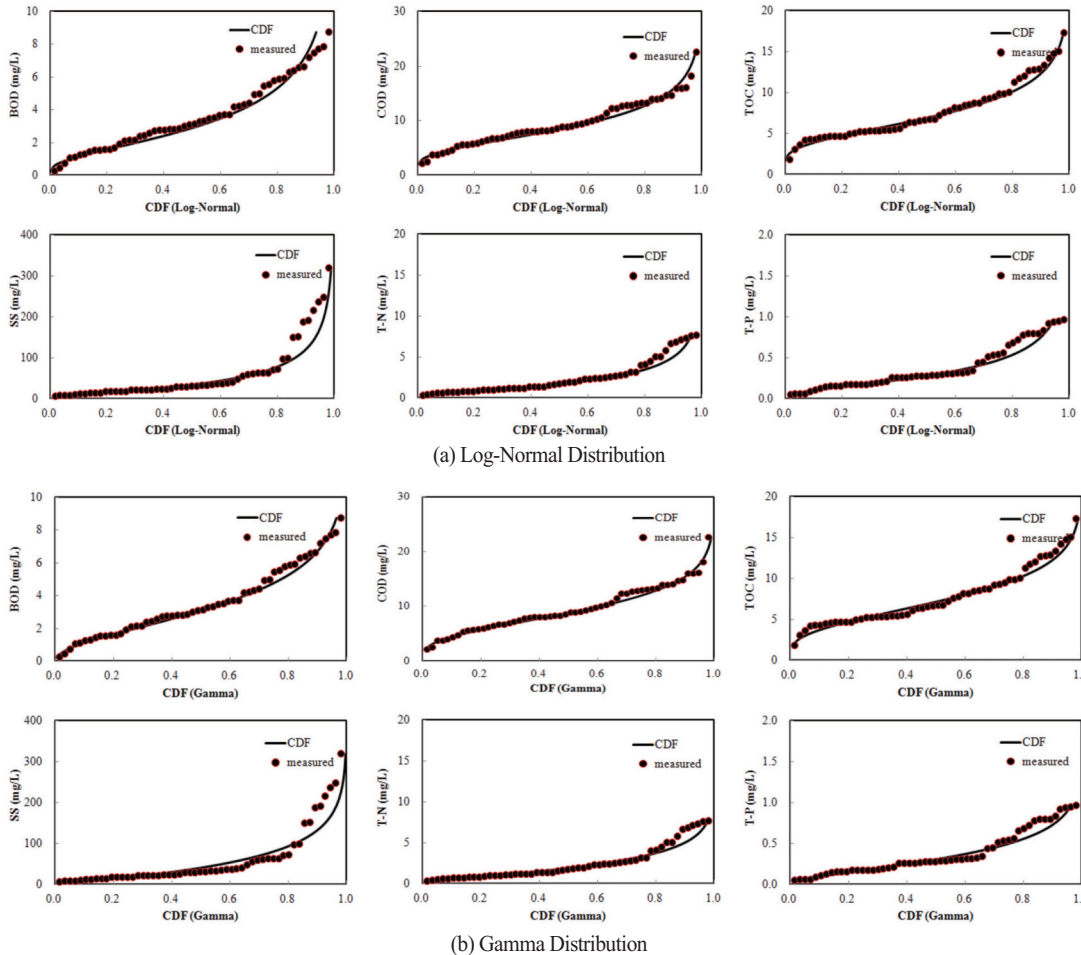


Figure 5. Cumulative density function of EMC of water quality constituents

Log-normal 확률분포모형과 Gamma 확률분포 모형의 EMC 중앙값과 “강우유출수 조사방법”에 따라 조사된 대표 강우량과 대표 유출율을 이용하여 수계별 BOD, COD, TOC, SS, T-N, T-P의 원단위를 산정하였다. Log-normal 확률분포모형과 NIER방법의 대표 강우량과 유출율을 이용하여 산정된 BOD, COD, TOC, SS, T-N, T-P의 원단위는 4.25, 12.40, 10.16, 50.66, 2.55, 0.41 kg/km<sup>2</sup>/day로 나타났다. 한편, Gamma 분포모형 EMC와 NIER 방법의 대표 강우량과 대표 유출율을 이용하여 산정된 전국 BOD, COD, TOC, SS, T-N, T-P의 원단위는 4.54, 12.81, 10.47, 59.96, 2.83, 0.45 kg/km<sup>2</sup>/day로 나타났다 (Table 4).

#### 4. 산술평균 EMC와 유출율을 이용한 원단위

학야지구와 적성지구의 산술평균 유출율은 0.39로 나타났으며, BOD, COD, TOC, SS, T-N, T-P의 산술평균 EMC는 각각 3.67, 10.54, 9.80, 81.42, 2.70, 0.47 mg/L였다. 또한, 각 수계의 대표 강수량과 산술평균 유출율, 수질항목별 산술평균 EMC를 곱하여 산정된 원단위는 Table 5와 같다. 각 수계의 수질항목별 원단위를 평균한 결과 BOD, COD, TOC, SS, T-N, T-P는 각각 5.64, 16.22, 15.08, 125.29, 4.16, 0.72 kg/km<sup>2</sup>/day는 나타났다(Table 5).

#### 5. 산정 방법에 따른 논 원단위 비교

논의 수질항목별 원단위 산정을 위한 4가지 방법



Table 5. Unit load of water quality constituents when EMCs determined by arithmetic mean

	Unit load (kg/km <sup>2</sup> /year)					
	BOD	COD	TOC	SS	T-N	T-P
Han river	6.48	18.63	17.32	143.89	4.78	0.83
Nakdong river	4.42	12.71	11.81	98.16	3.26	0.56
Geum river	5.76	16.54	15.38	127.77	4.24	0.73
Yeongsan river	5.92	17.01	15.81	131.35	4.36	0.75
Average	5.64	16.22	15.08	125.29	4.16	0.72

Table 6. Unit load of water quality constituents determined by several methods

		Unit load (kg/km <sup>2</sup> /year)					
		BOD	COD	TOC	SS	T-N	T-P
NIER method		5.46	14.62	11.91	77.53	3.99	0.55
Field monitoring		5.92	14.50	12.49	83.39	3.31	0.56
Arithmetic mean method		5.64	16.22	15.08	125.29	4.16	0.72
Probability distribution	Log-normal	4.25	12.40	10.16	50.66	2.55	0.41
	Gamma	4.54	12.81	10.47	59.96	2.83	0.45

의 결과를 비교하였다. 각 방법으로 산정된 원단위를 NIER 방법을 기준으로 원단위를 비교하면 포장실험년평균치는 수질항목별로(BOD, COD, TOC, SS, T-N, T-P) 각각 1.08, 0.99, 1.05, 1.08, 0.83, 1.03 배로 비슷한 수치를 보였으며, 산술평균(EMC, 유출율)을 이용한 방법은 BOD, COD, T-N는 1.03, 1.11, 1.04 배로 비슷하였지만, TOC, SS, T-P는 1.27, 1.62, 1.32 배로 상대적으로 크게 나타났다. Log-normal 분포모형의 경우 BOD, COD, TOC, SS, T-N, T-P는 각각 0.78, 0.85, 0.85, 0.65, 0.64, 0.75배, Gamma 분포모형은 0.83, 0.88, 0.88, 0.77, 0.71, 0.83배로 전체적으로 NIER 방법보다 작았다(Table 6). 이러한 논 원단위의 차이는 논은 배출부하의 초기세척영향이 적고 유출량에 크게 좌우되기 때문에, 큰 강우사상에 가중치를 주는 NIER 방법이 여타 방법에 비해 원단위를 합리적으로 산정하는 것으로 판단된다.

국내에서 수행된 논 연구결과(김민경 등, 2005; 김현수 등, 2004; 송정현 등, 2012; 신동석 등, 1990; 윤광식 등, 2002; 윤춘경 등, 2003; 장정렬, 2014; 전지홍 등, 2005; 정재운 등 2009; 한국헌, 2008; 황하선 등, 2004) 와 본 연구에서 산정된 오염부하량을 비교한 결과를 비교하였다. 선행연구는 대부분 영

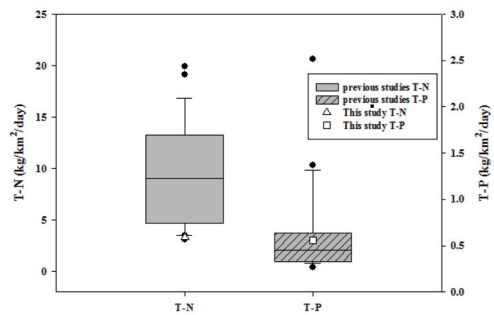


Figure 6. Comparison of T-N and T-P load of previous studies and this study

양물질인 T-N과 T-P에 대한 연구가 수행되었으며, 부하량의 범위는 각각 3.1~19.9 kg/km<sup>2</sup>/day, 0.3~2.5 kg/km<sup>2</sup>/day였다(Figure 6). T-N의 경우, 선행 연구결과와 본 연구결과는 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 기존 연구결과에는 강우시와 비강우시 부하량을 내포하고 있으며, 본 연구결과는 강우유출수에 대한 오염부하량만을 고려하였기 때문에 차이가 있는 것으로 판단된다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 논지역의 원단위를 산정하기 위해 실측 모니터링 자료를 이용한 방법, NIER 방법에 의한 원단위 산정방법(강우 계급과 강우가중치 이용),

확률분포모형의 EMC와 NIER 대표 강우량과 유출율을 이용한 방법, 수질항목별 산술평균 EMC와 유출율, NIER의 대표 강우량을 이용한 방법을 비교 분석 하였다.

- 1) 산술평균 유출율은 0.39였으며, NIER 방법으로 산정된 대표 유출율은 0.37로 나타났다.
- 2) BOD, COD, TOC, SS, T-N, T-P의 산술평균 EMC는 각각 3.67, 10.54, 9.80, 81.42, 2.70, 0.47 mg/L였으며, NIER 방법의 EMC는 각각 3.73, 9.98, 8.14, 52.95, 2.73, 0.37 mg/L로 조사되었다. Log-normal 분포 모형의 BOD, COD, TOC, SS, T-N, T-P의 EMC는 각각 2.90, 8.47, 6.94, 34.6, 1.74, 0.28 mg/L였으며, Gamma 분포모형의 수질항목별 EMC는 각각 3.10, 8.75, 7.15, 4.095, 1.93, 0.31 mg/L로 나타나 산술평균 EMC는 NIER 방법 대표 EMC와 비슷한 수치를 보였지만, 확률분포 모형의 EMC는 NIER 대표 EMC 보다 작게 산정되었다.
- 3) 조사지구 실측 년평균 부하로부터 BOD, COD, TOC, SS, T-N, T-P의 원단위를 산정한 결과 5.92, 14.50, 12.49, 83.39, 3.31, 0.56 kg/km<sup>2</sup>/day였으며, NIER 방법의 원단위는 각각 5.46, 14.62, 11.91, 77.53, 3.99, 0.55 kg/km<sup>2</sup>/day였다. 산술평균을 이용한 BOD, COD, TOC, SS, T-N, T-P의 원단위는 각각 5.64, 16.22, 15.08, 125.29, 4.16, 0.72 kg/km<sup>2</sup>/day였으며 Log-normal 분포모형을 이용한 원단위는 4.25, 12.40, 10.16, 50.66, 2.55, 0.41 kg/km<sup>2</sup>/day, Gamma 분포모형을 이용한 경우 4.54, 12.81, 10.47, 59.96, 2.83, 0.45 kg/km<sup>2</sup>/day였다.
- 4) 원단위 산정방법별 차이를 살펴본 결과 실측부하량을 이용한 방법과 NIER 방법의 원단위는 서로 비슷한 수치를 보였지만, 확률분포모형(Log-normal, Gamma)을 이용한 원단위는 NIER 방법에 비해 상대적으로 작게 나타났다. 한편, 산술평균 EMC와 유출율을 이용하여 산정된 원단위는 NIER 방법의 원단위에 비해 크게 산정되는 것으로 나타났다.
- 5) 따라서, 논 의 원단위 산정방법 중 NIER 방법이 관

측 부하량을 가장 잘 반영하는 것으로 나타났으며, 이는 큰 강우사상에 가중치를 주는 NIER 방법이 여타 방법에 비해 원단위를 합리적으로 산정하는 것으로 판단된다.

- 6) 또한, NIER 방법의 원단위는 1995에 조사된 환경부 원단위에 비해 BOD, COD, SS는 큰 값을 T-N은 작은 값을, T-P는 비슷한 값을 산정되는 것으로 나타났다.

## 사 사

본 연구는 영산강·섬진강 수계 환경기초조사사업 지원에 의해 수행되었습니다.

## 인용문헌

- 국립환경과학원. 2009. 강우유출수 조사방법.  
 국립환경과학원. 2012. 강우유출수 조사방법.  
 김미리, 신동석, 강형석, 류덕희. 2007. 불투수성 토지이용에 대한 배출원단위 분석, 서울도시연구, 8(2), 187-196.  
 김민경, 노기안, 이남종, 서명철, 고문환. 2005. 경지 정리된 광역 논에서 영양물질 수지와 배출 특성, 한국토양비료학회지, 38(3), 164-171.  
 김태원, 길경익. 2011. 경안천 유역의 강우시, 비강우시 난분해성 유기물질 유출 특성 수질보전 환경물환경학회지, 27(4), 397-404.  
 김현수, 김진수, 김영일, 정병호. 2004. 논 의 영양물질 배출부하 특성과 수질정화 기능 분석, 한국관개배수, 11(1), 36-44.  
 손현근, 이은주, 이소영, 김이형. 2008. 고속도로 영업소 토지이용에서의 비점오염원 원단위 산정, 한국습지학회지, 10(1), 69-75.  
 송인홍, 강문성, 황순호, 송정현. 2012. 산림논복합 소유역에서의 강우유출 특성 및 EMC 산정, 한국농공학회 논문집, 54(4), 9-17.  
 송정현, 강문성, 송인홍, 장정렬. 2012. 영농방법에 따른 논에서의 배출부하량 모의, 한국환경농학회지, 31(4), 318-327.

- 신동석, 권순국. 1990. 논에서의 질소 및 인의 농도와 유출입, 한국환경농학회지, 9(2), 133-141.
- 신동석. 2007. 비점오염원 원단위 개정을 위한 조사연구 방향, 수질보전 한국물환경학회지, 23(4), 429-433.
- 신은성, 최지용, 이동훈. 2001. 토지용도와 유역특성을 고려한 비점오염물질 원단위 산정에 관한 연구, 수질보전 한국물환경학회지, 17(2), 137-146.
- 윤춘경, 김병희, 전지홍, 황하선. 2002. 지하수관개 지역 논에서의 배출부하 특성, 한국농공학회 논문집, 44(5), 116-126.
- 이상은, 최이송, 이인호, 홍대벽, 오종민. 2011. 화성호 유입하천의 강우시 비점오염물질 유출 특성, 환경영향평가, 20(5), 654-661.
- 이소영, 이은주, Maniquiz, Marla C, 김이형. 2008. 교통관련 포장지역 비점오염원에서 오염물질 유출원단위 산정, 수질보전 한국물환경학회지, 24(5), 543-549.
- 윤광식, 한국현, 조재영, 최창현, 손재권, 최진규. 2002. 양수장 지구 광역논으로부터 영농기간 영양물질의 유출 및 물질수지, 농촌계획, 8(1), 3-14.
- 윤춘경, 황하선, 전지홍, 함종화. 2003. 수도재배시 논에서의 영양물질 수지 분석, 한국하천호수학회, 36(1), 66-73.
- 장정렬. 2014. 새만금유역 농업비점오염 저감기법 개발, 지반환경, 15(4), 2-6.
- 전지홍, 윤춘경, 최진규, 윤광식. 2005. 관개방법에 따른 논에서의 수문 및 수질특성에 미치는 영향, 한국하천호수학회, 38(1), 118-127.
- 정재운, 윤광식, 최우정, 최우영, 주석훈, 임상선, 광진협, 이수형, 김동호, 장남익. 2008. 논으로부터 배출되는 영양물질 오염부하량 원단위 산정 방법 개선 방안 검토, 수질보전 환경물환경학회지, 24(3), 291-296.
- 정재운, 윤광식, 윤석근, 최우정, 최우영, 허유정, 조경민, 홍정진. 2009. 비우량 방법에 의한 논 오염부하 원단위 산정시 적용성 평가, 수질보전 환경물환경학회지, 25(6), 849-854.
- 정재운, 최동호, 윤광식. 2014. 논으로부터 배출되는 유량기중평균 수질농도의 적정확률분포 선정, 한국환경영향평가지, 23(4), 285-295.
- 최우정, 광진협, 정재운, 윤광식, 장남익, 허유정. 2007. 영산강 · 섬진강 유역을 대상으로 한 논 오염부하 산정 단순회귀모형 적용, 한국농공학회지, 49(1), 89-97.
- 한국현. 2008. 비점원오염모델을 이용한 논영농방법별 오염부하량 예측, 한국환경농학회지, 27(1), 10-17.
- 환경부. 1995. 비점오염원 조사연구사업 보고서.
- 황하선, 공동수, 신동석, 전지홍. 2004. 관개수원에 따른 논에서의 영양물질 배출 특성, 한국물환경학회지, 20(6), 597-602.

## References

- Choi WJ, Kwak JH, Jung JW, Yoon KS, Chang NI, Huh YJ. 2007. Application of Simple Regression Models for Pollutants Load Estimation of Paddy to Yeongsan and Seomjin River Watersheds, Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, 49(1), 89-97.
- Han KH. 2008. Estimation of the Pollutant loads from Paddy Fields by Cultivation Practices Using a Non-point-source Model, Korean Journal of Environmental Agriculture, 27(1), 10-17.
- Han HS, Kong DS, Shin DS, Jeon JH. 2004. Characteristics of Nutrient Export from Paddy Rice Fields with Irrigation Practices, Journal of Korean Society on Water Quality, 20(6), 597-602.
- Jang JR. 2014. The Development of Agricultural Non Point Source Pollution Reduction Measures on The Saemangeum Watershed, Korean Geo-Environmental Society, 15(4), 2-6.

- Jeon JH, Yoon CG, Choi JK, Yoon KS. 2005. The Comparison of Water Budget and Nutrient Loading from Paddy Field According to the Irrigation Methods, *Korean Journal of Limnology*, 38(1), 118-127.
- Jung JW, Yoon KS, Choi WJ, Choi WY, Joo SH, Lim SS, Kwak JH, Lee SH, Kim DH, Chang NI. 2008. Improvement Measures of Pollutants Unit-Loads Estimation for Paddy Fields, *Journal of Korean Society on Water Quality*, 24(3), 291-296.
- Jung JW, Yoon KS, Yoon SG, Choi WJ, Huh YJ, Cho KM, Hong JJ. 2009. Evaluation of Effective Rainfall Ratio Method for Estimating Unit Load from Paddy Fields, *Journal of Korean Society on Water Quality*, 25(6), 849-854.
- Jung JW, Choi DH, Yoon KS. 2014. Selecting probability distribution of event mean concentrations from paddy fields, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 23(4), 285-295.
- Kim HS, Kim JS, Kim YI, Cheong BH. 2004. Analysis of the Characteristics of Nutrients Loading and the Water Purification Function in the Paddy-fields, *Korean National Committee on Irrigation and Drainage*, 11(1), 36-44.
- Kim MK, Roh KA, Lee NJ, Seo MC, Koh MH. 2005. Nutrient Load Balance in Large-Scale Paddy Fields during Rice Cultivation, *Korean Society of Soil Science and Fertilizer*, 38(3), 164-171.
- Kim MR, Shin DS, Kang HS, Rhew DH. 2007. An Analysis of discharge Unit-load Impervious Land Uses, *Seoul Studies*, 8(2), 187-196.
- Kim TW, Gill KI. 2011. Runoff Characteristics of Refractory Organic Matters from Kyongan River Watershed during Rainfall Event and Dry Season, *Journal of Korean Society on Water Quality*, 27(4), 397-404.
- Lee SE, Choi IS, Lee IH, Hong DB, Oh JM. 2011. The characteristics of discharged non-point pollutants on Hwa-sung lake inflow streams on precipitation, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 20(5), 654-661.
- Lee SY, Lee EJ, Maniquiz MC, Kim LH. 2008. Determination of Pollutants Unit Loads from Various Transportation Landuses, *Journal of Korean Society on Water Quality*, 24(5), 543-549.
- Ministry Of Environment(MOE). 1995. Research on survey monitoring for non-point source discharge.
- National Institute of Environmental Research (NIER). 2009. Rainfall-runoff survey method.
- National Institute of Environmental Research (NIER). 2012. Rainfall-runoff survey method.
- Shin DS, Kwun SK. 1990. The Concentration and Input/Output of Nitrogen and Phosphorus in Paddy Fields, *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 9(2), 133-141.
- Shin DS. 2007. Basic Monitoring Concept for Revised Unit-Load on NPS, *Journal of Korean Society on Water Quality*, 23(4), 429-433.
- Shin ES, Choi JY, Lee DH. 2001. Estimation of Non-Point Source Pollutant Unit-loads in Surface Runoff Considering Land-use and Basin Characteristics, *Journal of Korean Society on Water Quality*, 17(2), 137-146.
- Son HG, Lee EJ, Lee SY, Kim LH. 2008. Determination of Nonpoint pollution Unit Loads in Toll-gate of Highway, *Korean Wetlands Society*, 10(1), 69-75.

- Song IK, Kang MS, Hwang SH, Song JH. 2012. Characteristic and EMCs of NPS Pollutants Runoff from a Forest-Paddy Composite Watershed, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 54(4), 9-17
- Song JH, Kang MS, Song IH, Jang JR. 2012. Comparing Farming Methods in Pollutant runoff loads from Paddy Fields using the CREAMS-PADDY model, *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 31(4), 318-327.
- Yoon CG, Km BH, Jeon JH, Hwang HS. 2002. Characteristics of Pollutant Loading from Paddy Field Area with Groundwater Irrigation, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 44(5), 116-126.
- Yoon CG, Hwang HS, Jeon JH, Ham JH. 2003. Analysis of Nutrients Balance during Paddy Rice Cultivation, *Korean Journal of Limnology*, 36(1), 66-73.
- Yoon KS, Han KH, Cho JY, Choi CH, Son JG, Choi JK. 2002. Water and Nutrient Balance of Paddy Field Irrigated from a Pumping Station during Cropping Period, *Korean Society of Rural Planing*, 8(1), 3-14.