

# 비우량 방법에 의한 논 오염부하 원단위 산정시 적용성 평가

정재운 · 윤광식<sup>\*†</sup> · 윤석군 · 최우정<sup>\*</sup> · 최우영<sup>\*</sup> · 허유정<sup>\*\*</sup> · 조경민<sup>\*\*</sup> · 홍정진<sup>\*\*</sup>

한국농어촌공사 농어촌연구원  
\*전남대학교 생물산업공학대농업과학기술연구소  
\*\*국립환경과학원 영산강물환경연구소

## Evaluation of Effective Rainfall Ratio Method for Estimating Unit Load from Paddy Fields

Jae-Woon Jung · Kwang-Sik Yoon<sup>\*†</sup> · Suk-Gun Yoon · Woo-Jung Choi<sup>\*</sup> · Woo-Young Choi<sup>\*</sup> · Yu-Jeong Huh<sup>\*\*</sup> · Kyeong-Min Cho<sup>\*\*</sup> · Jung-Jin Hong<sup>\*\*</sup>

Rural Research Institute, Korea Rural Community & Agriculture Corporation  
<sup>\*</sup>Department of Biosystems & Agricultural Engineering, Chonnam National University  
<sup>\*\*</sup>Yeongsan River Environment Research Laboratory, National Institute of Environmental Research  
(Received 23 April 2009, Revised 4 September 2009, Accepted 4 September 2009)

### Abstract

Pollutant unit load (unit-load) reported by Ministry of Environment (MOE) in 1995 has been a useful method for watershed management and environmental policy decision. The unit-load has been estimated using effective rainfall ratio method. However, reliability of unit-load determined by the method has been criticized especially for paddy field and upland conditions. In this paper the unit-load of paddy field estimated by effective rainfall ratio method was compared with continuous monitoring data. Annual loads was simulated by the method choosing 5~6 storm events randomly from whole events collected. Probability distribution of difference between results by the method and measured data was investigated. The results showed that unit-load derived by the method was generally lesser than measured unit-load and showed wide variations. Therefore, unit-load estimation of paddy fields by effective rainfall ratio method need caution.

**keywords** : Effective rainfall ratio method, Nonpoint source pollution, Paddy fields, Unit load

## 1. 서론

우리나라의 토지이용현황은 전체 면적의 64.1%(639만 ha)가 임야로써 가장 많은 면적을 차지하고 있으며, 그 다음이 논으로써 전체면적의 10.9%(108.4만 ha)로 인간의 활동이 이루어지는 단일 토지이용으로써는 가장 많은 면적을 차지하고 있다(농림부, 2007). 현재 우리나라 비점오염부하의 많은 양이 논에서 유출되고 있으며(전지홍 등, 2003), 논에서 유출되는 오염부하량의 정량적인 평가를 위한 많은 방법들이 개발되고 있으나, 아직까지 환경부가 1995년도에 제안한 4대강 수계의 전국 평균값을 오염부하량 원단위(이하 '원단위')로 사용하고 있다(환경부, 1995).

환경부의 원단위는 년 중 수계의 강우사상에 대해 유량과 수질을 측정하여 시료채취기간에 대해 비우량법을 적용하여 계산한 값을 연간으로 환산하여(kg ha<sup>-1</sup> → kg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>) 계산되었기 때문에 논과 밭 등 개별 토지이용 원단위의 신뢰성에 대한 의문이 여러 연구자들에 의해 제기되고

있다(신동석, 2007; 신은성 등, 2001; 정재운 등, 2008). 특히, 논 오염부하 유출의 경우 도시비점오염과 같이 축적과 초기 강우에 의한 쓸림보다는 시비 및 물관리 관행에 의한 영향이 더 큰 것으로 보고된 바 있다(환경부, 2008). 따라서, 논 원단위 산정을 위해 비우량법을 적용할 경우 도시 유역과 적용성이 상이할 수도 있다.

본 연구는 환경부가 원단위 산정시 사용한 비우량 방법을 집중 모니터링을 통해 실측한 논자료에 적용하여, 논 원단위 산정시 비우량방법을 이용할 경우 오차의 정도를 파악하고 적용성을 평가하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 시험지구

전라남도 함평군 엄다면 화양리의 논지구(이하 '학야지구', Fig. 1)를 대상으로 2004년 수문 및 수질 자료를 실측하여 부하량을 산정하였다. 학야지구의 관개용수는 한국농촌공사 함평지사에서 관리하는 대동저수지(관개면적 992.3 ha, 저수용량 5309천 m<sup>3</sup>)이다. 학야지구는 동쪽에 함평천이

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
ksyoon@chonnam.ac.kr

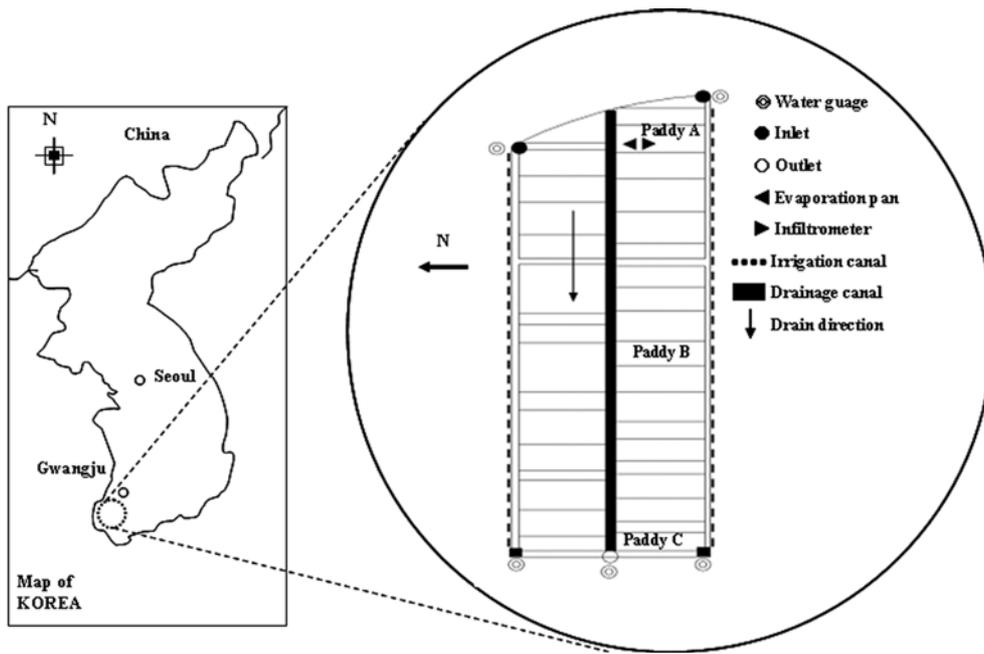


Fig. 1. Location and monitoring system of the study site.

흐르며 서쪽에는 주 배수로가 위치하며, 유역면적은 13.7 ha이다. 또한 용배수로가 분리되고 접근성이 좋아 관측이 용이한 시험지구이다. 학야지구의 토성은 미사질양토(모래 11.7%, 실트 61.4%, 점토 26.9%)로 조사되었으며, 각 지구의 배수로 말단에 수위계를 설치 수위-유량 관계식을 이용하여 유량을 구하였고, 강우시와 비강우시 수질 시료를 채취하여 T-N, T-P, COD, SS를 공정시험법에 준하여 분석하였다. 오염부하량은 유량과 농도의 곱으로 계산하였다.

2.2. 비우량법

환경부의 비점오염원 조사연구사업 보고서(1995)에 의하면 논 원단위를 산정하기 위해 한강, 낙동강, 금강, 영산강 유역 각각 3 지점의 논에서 6월부터 9월까지 발생한 강우 사상 중 5~6개에 대해서 부하량을 실측하여 논 원단위를 산정하였다. 원단위를 연간으로 환산하는 방법으로서 비우량법, 직접강우횟수 적용법, 유출량비법, 유출량-가중농도법 등이 있으며, 해당 보고서에서 적용한 방법은 비우량법이

며, 그 식은 다음과 같다.

$$\text{연간 부하량} = (\text{단위강우유출부하량}) \times (\text{10년 평균 10 mm 이상 연간 총강우량/실측단위 강우량}) \quad (1)$$

이 방법은 불투수층이 많은 도시 유역의 비점오염 원단위 산정에 적용되는 방법으로, 농촌유역 특히 논이 많은 지역에서는 사용시 주의를 요한다. 왜냐하면, 원단위 조사 시 강우량 크기가 논 저류능에 비해 과소하면 단위강우유출부하가 과소하게 추정될수 있으며, 빈도가 작은 큰 강수를 대상으로한 경우에는 단위유출부하 및 원단위가 과대해질 수 있기 때문이다(정재운 등, 2008).

본 연구에서는 환경부 원단위 산정의 경우처럼 연간 강우 사상중 5~6개의 강우사상을 무작위로 추출 비우량법을 이용하여 T-N, T-P, COD, SS를 대상으로 연간 부하량을 산정하였다. 모니터링 대상지역인 영산강 수계내 논지구의 경우 2004년 유출이 발생한 강우사상은 총 10개로 나타났다(Table 1).

Table 1. Rainfall larger than 10 mm and pollutant load per rainfall at Hakya site

	Date	Rainfall (mm)	T-N (g ha <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup> )	T-P (g ha <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup> )	COD (g ha <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup> )	SS (g ha <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup> )
1	2004-5-8/5-10	30.0	0.42	0.13	11.44	19.22
2	2004-5-28/5-29	34.0	24.22	0.27	26.24	17.65
3	2004-6-17/6-26	272.0	24.64	0.81	61.26	143.44
4	2004-7-3/7-9	173.5	10.58	0.93	29.50	22.05
5	2004-7-14/7-17	148.5	6.10	0.92	24.31	176.19
6	2004-8-4/8-6	34.5	9.26	0.98	45.81	85.52
7	2004/8/13	19.5	3.55	0.33	17.72	36.30
8	2004-8-18/8-28	261.5	8.49	1.08	36.82	194.61
9	2004-9-10/9-15	137.5	8.21	1.03	38.61	196.44
10	2004-9-18/9-22	81.5	11.42	1.35	79.46	55.77

2.3. 통계분석

비우량법에 따른 원단위 정확도 평가를 위한 통계분석 프로그램은 SPSS(ver 12.0)을 사용하였으며, 연간 실측원단위와 비우량법을 통해 산정된 원단위(이하 비우량법 원단위)의 오차를 계산한후, 오염부하 항목별 오차 히스토그램(Histogram)을 작성하였다. 작성된 히스토그램을 Shapiro-Wilk 방법을 통해 정규성을 검정한 후, 표준화 시켜 실측원단위와 비우량법 원단위의 오차구간별 확률을 산정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 논에서 실측 오염부하량

2004년 유출을 유발한 10 mm 이상 강우사상의 단위강우당 부하량은 Table 1과 같고, 비강우시를 고려한 전체 기간동안 오염부하량 산정결과 Table 2와 같다. 연간 총 강우량은 1,375.5 mm로 나타났으며, 이중 유출에 영향을 미치는 강우량은 1,192.5 mm로 나타났다. T-N, T-P, COD, SS 총 오염부하량은 각각 20.8, 1.55, 69.5, 192.4 kg ha<sup>-1</sup>로 나타났으며, 이중 강우시 부하량은 각각 16.1, 1.2, 53.1, 156.9 kg ha<sup>-1</sup>이고 비강우시 부하량은 각각 4.7, 0.34, 16.4, 35.5 kg ha<sup>-1</sup>로 나타났다.

단위 강수량별 부하량 크기를 보면 T-N과 T-P의 경우 각각 0.42~24.64 g ha<sup>-1</sup>mm<sup>-1</sup>와 0.13~1.35 g ha<sup>-1</sup>mm<sup>-1</sup>의 범위로 나타났으며, COD와 SS의 경우는 각각 11.44~79.46 g ha<sup>-1</sup>mm<sup>-1</sup>와 19.22~196.44 g ha<sup>-1</sup>mm<sup>-1</sup>의 범위로 나타났다(Table 1). T-N, T-P, COD, SS 모두 단위 강수량별 부하량의 범위가

Table 2. Unit loads of T-N, T-P, COD, and SS for storm and non-storm period in 2004

Period	Pollutant load (kg ha <sup>-1</sup> )			
	T-N	T-P	COD	SS
Storm	16.1(77) <sup>a</sup>	1.21(80)	53.1(76)	156.9(82)
Non-storm	4.7(23)	0.34(20)	16.4(24)	35.5(18)
Total	20.8(100)	1.55(100)	69.5(100)	192.4(100)

\* ( ) : %

크게 나타났다. 따라서 강우 사상 선택에 따라 원단위 추정시 차이가 많이 날 수 있는 것으로 판단된다.

2004년 조사기간 동안 비강우시 논에서 유출되는 오염부하량은 T-N, T-P, COD, SS의 경우 전체 T-N, T-P, COD, SS 부하량의 23%, 20%, 24%, 18%를 차지하는 것으로 조사되어 비강우시에도 오염부하량이 상당부분 유출되는 것으로 조사되었다(Table 2). 이는 논 특성상 비의 무효분일 방지를 위한 인위적 배수, 물꼬관리 소홀 등에 의해 논안에 담수된 물이 손실되기 때문인 것으로 판단된다.

3.2. 일부자료를 이용한 비우량법의 적용

2004년 10개의 강우사상(Table 1 이용)중 5개 추출시 나올 수 있는 부하량의 경우의 수는 252개이고, 6개 추출시 나올 수 있는 경우의 수는 210개로 산정되었다. 각각의 경우를 비우량법(식 (1))을 이용하여 연간 오염부하량으로 환산하였으며 그 결과는 Table 3, 4와 같다.

실측에 의한 연간 T-N 부하량이 20.8 kg ha<sup>-1</sup>인데 비해 비우량법을 사용했을 경우 추정된 원단위 범위는 5개 추출

Table 3. Unit load of T-N and T-P determined by effective rainfall ratio method choosing 5 and 6 random samples from the 10 measured events

T-N (kg ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> )			T-P (kg ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> )		
No.	Unit load determined using five events	Unit load determined using six events	No.	Unit load determined using five events	Unit load determined using six events
1	7.37	8.28	1	0.66	0.76
2	7.59	8.57	2	0.66	0.78
3	7.68	8.76	3	0.69	0.78
4	7.95	8.76	4	0.69	0.78
5	8.03	8.83	5	0.69	0.78
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·
208	18.35	20.06	208	1.21	1.40
209	18.35	20.24	209	1.21	1.40
210	18.35	20.31	210	1.21	1.42
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·
250	21.73	·	250	1.43	·
251	21.82	·	251	1.46	·
252	22.04	·	252	1.46	·

**Table 4.** Unit load of COD and SS determined by effective rainfall ratio method choosing 5 and 6 random samples from the 10 measured events

COD (kg ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> )			SS (kg ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> )		
No.	Unit load determined using five events	Unit load determined using six events	No.	Unit load determined using five events	Unit load determined using six events
1	30.01	33.45	1	41.54	54.22
2	32.02	33.86	2	49.71	67.49
3	32.52	35.51	3	55.08	74.30
4	32.93	35.53	4	58.98	75.01
5	33.42	36.29	5	59.78	78.77
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·
208	60.08	65.63	208	162.89	187.57
209	60.11	66.07	209	163.08	190.83
210	60.41	66.83	210	163.38	195.30
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·
250	69.57		250	205.47	
251	70.07		251	210.84	
252	72.08		252	219.01	

의 경우 7.37~22.04 kg ha<sup>-1</sup>, 6개 추출의 경우 8.28~20.31 kg ha<sup>-1</sup> 나타났다. 한편, T-P와 COD의 경우 실측 부하량이 각각 1.55 kg ha<sup>-1</sup>와 69.5 kg ha<sup>-1</sup>이지만 비우량법을 통해 추정된 T-P 원단위의 범위는 5개 추출시 0.66~1.46 kg ha<sup>-1</sup>, 6개 추출시 0.76~1.42 kg ha<sup>-1</sup>의 범위로 나타났고, COD는 5개와 6개 추출시 원단위의 범위가 각각 30.01~72.08 kg ha<sup>-1</sup>와 33.45~66.83 kg ha<sup>-1</sup>로 나타났다. 또한 SS의 실측 부하량은 192.4 kg ha<sup>-1</sup>로 나타났지만 5개와 6개 추출시 원단위는 각각 41.54~219.01 kg ha<sup>-1</sup>와 54.22~195.30 kg ha<sup>-1</sup>의 범위로 나타났다. 전체적으로 비우량법을 통해 산정된 오염부하 원단위의 추정값이 실측치에 비해 편차가 크음을 알 수 있다(Table 3).

**3.3. 비우량법 원단위와 실측 원단위의 오차 히스토그램 및 정규분포 곡선**

부하량 전체(강우시+비강우시)를 고려한 실측원단위와 5~6개 강우자료를 이용한 비우량법 원단위와의 오차는 식 (2)를 이용하였으며, 그 결과를 이용하여 오차 히스토그램을 작성하였다(Fig. 2).

$$\text{오차} = \frac{\text{비우량법원단위} - \text{실측원단위}}{\text{비우량법 원단위}} \times 100(\%) \quad (2)$$

오차 히스토그램 작성결과 오염항목별 오염부하량의 오차는 모두 음의 값으로 편향되어 있다(Fig. 2). 이는 비우량법의 경우 강우시 오염부하량만을 고려되도록 설계되어 있기

때문에 비강우시 유출되는 오염부하량을 고려할 수 없기 때문이다. 또한 강우사상 조합에 따라 오차의 빈도 범위가 넓게 분포하여 다양한 강우사상에 대한 샘플링이 실시되지 않고 특정강우사상(큰 강우사상 또는 작은 강우사상)에 대해서만 집중적으로 샘플링이 실시되어 비우량법이 적용될 경우 비우량법의 불확실성은 더욱 가중될 것으로 판단된다.

오염부하량 오차의 Shapiro-Wilk 검정결과, 정규분포함수에 대하여 5% 유의수준에서 모두 적합성이 인정되었다. 5개 및 6개 오염부하량을 무작위로 추출하여 산정한 비우량법 원단위와 실측원단위와의 오차구간별 확률을 구하기 위해 정규분포곡선을 표준단위를 이용하여 표준정규분포로 표준화하였다.

**3.4. 비우량법과 실측원단위 오차구간별 확률분포**

비우량법을 통해 산정한 원단위와 측정된 실측 원단위와의 오차를 산정하였고, 실측원단위와 비우량법 원단위의 오차분포를 파악하기 위해 오차구간 확률 분포표를 작성하였다(Table 5,6). 그 결과 5개 추출시 비우량법 원단위와 실측원단위 오차가 양(+)인 확률(과대하게 산정될 확률)은 T-N, T-P, COD, SS의 경우 각각 0.0051, 0.0001, 0.0010, 0.0034로 낮게 나타났지만, 오차가 음(-)인 확률(과소하게 산정할 확률)은 T-N, T-P, COD, SS의 경우 각각 0.9949, 0.9999, 0.9990, 0.9966으로 높게 나타나 비우량법을 통해 논 원단위를 산정할 경우 과소하게 산정될 가능성이 큰 것으로 나타났다.

6개 추출시 비우량법 원단위가 실측치보다 클 확률은 T-N, T-P, COD, SS의 경우 각각 0.0823, 0, 0.0002, 0.0005로 나

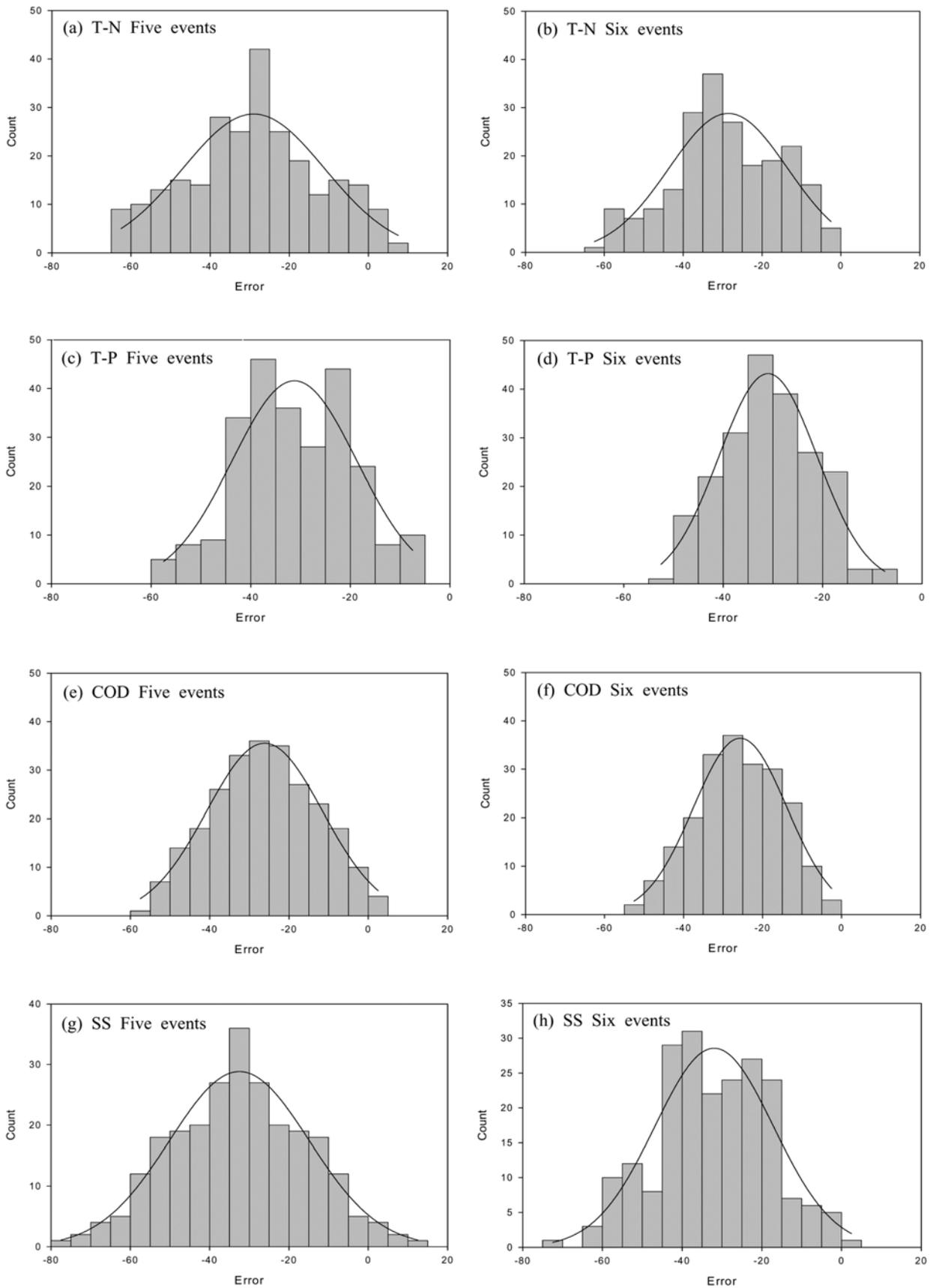


Fig. 2. Histogram and probability distribution of error between unit load by effective rainfall ratio method and observed unit-load during storm and non-storm period.

**Table 5.** Probability of error between unit load by effective rainfall ratio method and observed unit load (Using five events)

Error	T-N	T-P	COD	SS
$E \geq 30\%$	0	0	0	0
$20\% \leq E \leq 30\%$	0.0001	0	0	0
$10\% \leq E \leq 20\%$	0.0005	0	0	0.0004
$0\% \leq E \leq 10\%$	0.0045	0.0001	0.0010	0.0030
$-10\% \leq E \leq 0\%$	0.0243	0.0013	0.0126	0.0173
$-20\% \leq E \leq -10\%$	0.0837	0.0225	0.0798	0.0631
$-30\% \leq E \leq -20\%$	0.1850	0.1421	0.2330	0.1551
$E \leq -30\%$	0.7019	0.8340	0.6736	0.7611
Total	1.0000	1.0000	1.0000	0.2389.0000

**Table 6.** Probability of error between unit load by effective rainfall ratio method and observed unit load (Using six events)

Error	T-N	T-P	COD	SS
$E \geq 30\%$	0.0418	0	0	0
$20\% \leq E \leq 30\%$	0.0108	0	0	0
$10\% \leq E \leq 20\%$	0.0142	0	0	0
$0\% \leq E \leq 10\%$	0.0155	0	0.0002	0.0005
$-10\% \leq E \leq 0\%$	0.0180	0.0002	0.0034	0.0057
$-20\% \leq E \leq -10\%$	0.0227	0.0073	0.0490	0.0403
$-30\% \leq E \leq -20\%$	0.0239	0.1095	0.2386	0.1457
$E \leq -30\%$	0.8531	0.8830	0.7088	0.8078
Total	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

타났고, 0보다 작을 확률은 각각 0.9177, 1.000, 0.9998, 0.9995로 나타나 5개 추출 확률과 비슷한 경향을 나타냈다. 이상의 결과는 비우량법을 통해 산정한 논 유출수의 T-N, T-P, COD, SS 원단위는 실측원단위와의 차이가 크고, 과소하게 산정될 우려가 높다는 것을 의미한다. 또한, 비우량법을 통해 논 원단위를 산정시 적용성이 낮은 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

현재 수질오염총량관리계획수립 시 이용하는 수질오염총량관리기술지침 중 토지계 오염물질의 배출부하량 산정은 원단위를 이용하여 산정하고 있다. 정확한 비점오염물질 부하량 추정을 위해서는 장기연속모니터링이 필요하지만, 이를 위해서는 많은 시간, 노력, 비용이 필요하므로 현재까지 환경부에서는 년 중 수계의 강우 사상에 대해 유량과 수질을 측정하여 시료 채취한 기간에 대해 계산한 값을 연간으로 환산하는 비우량법을 이용하여 사용하고 있다. 오염총량제 실시를 위해 많은 수계의 지역적 부하량 산정을 위해 현재의 접근 방법은 계속 사용될 것으로 판단되기 때문에 이에 대한 검토가 필요하였다. 1995년 환경부 비점오염원 조사연구사업의 원단위 수립을 위해 사용되었던 비우량법을 영산강 수계에 논지구에 적용하여 실측원단위와 비교한 결과 논외의 경우 비강우시에도 연간 오염부하량의 약 20% 정도가 유출되기 때문에 강우시만 고려한 비우량법을 이용하여 논 원단위를 산정할 경우 실측원단위에 비해 매우 과소하게 산정되는 경향이 있는 것으로 나타났다. 또한 오차의 빈도 범위가 넓게 분포되고 있어 미계측 유역에 원단위 산정시 다양한 강우사상에 대한 샘플링이 실시되지 않고

특정강우사상에 대해서만 샘플링이 실시되어 비우량법이 적용될 경우 비우량법의 실측값 추정에 대한 불확실성은 더욱 가중될 것으로 판단되며, 향후 비우량법을 이용하여 미계측 유역의 논 원단위 산정시 이러한 문제점을 고려하여 적용해야 할 것으로 판단된다.

#### 사 사

본 연구는 2008년 영산강·섬진강수계 환경기초조사사업의 연구비 지원과 농업과학기술연구소의 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

농림부(2007). 농림부 통계연부.  
 신동석(2007). 비점오염원 원단위 개정을 위한 조사연구 방향. 수질보전 한국물환경학회지, 23(4), pp. 429-433.  
 신은성, 최지용, 이동훈(2001). 토지용도와 유역특성을 고려한 비점오염물질 원단위 산정에 관한 연구. 수질보전 한국물환경학회지, 17(2), pp. 137-146.  
 전지홍, 윤춘경, 황하선, 윤광식(2003). 논에서의 오염부하 예측을 위한 범용모형 개발. 한국육수학회지, 36(3), pp. 344-355.  
 정재운, 윤광식, 최우정, 최우영, 주석훈, 임상선, 박진협, 이수형, 김동호, 장남익(2008). 논으로부터 배출되는 영양물질 오염부하량 원단위 산정 방법 개선 방안 검토. 수질보전 한국물환경학회지, 24(3), pp. 291-296.  
 환경부(1995). 비점오염조사사업연구보고서. 환경부.  
 환경부(2008). 주요비점오염유출 장기모니터링 및 저감기법 연구. 환경부.