Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers
DOI : https://doi.org/10.5389/KSAE.2017.59.2.091

Vol. 59, No. 2, pp. 91~99, March 2017
ISSN 1738-3692 | eISSN 2093-7709

강우시 영농기와 비영농기의 광역논에서의 부유물질 (SS)과 COD의 유출특성

SS and COD Runoff from a Rice Field Watershed during Storm Events in the Growing and Non-growing Seasons

이정범* · 이재용** · 김진수**,†
Lee, Jeong Beom · Lee, Jae Yong · Kim, Jin Soo

Abstract

The objective of this research was to investigate runoff characteristics of suspended solid (SS) and chemical oxygen demand (COD) from a paddy field watershed during storm events in the growing and non-growing seasons. Average of event mean concentration (EMC) of pollutants were 56.9 mg/L for SS and 23.9 mg/L for COD in the non-growing season and 50.3 mg/L for SS and 11.9 mg/L for COD in the growing season. The average EMC of SS in the study area was much lower than that in the uplands irrespective of cultivation, suggesting that paddy fields control soil erosion. This may be because flooding and wet soil in the growing season, and rice straw residue and stubble on the topsoil in the non-growing season reduce soil erosion. The changing tillage practice from fall tillage to spring tillage avoids soil erosion due to shortening of the tilled fallow period. However, the average EMC of COD in the non-growing season was about twice as much that in the growing season likely due to the runoff of organics like rice straw residues. The relationship between SS and COD loads and stormwater runoff volume was expressed by power function. The exponent for SS was higher than that for COD, suggesting that SS load increased with stormflow runoff more than COD load did. The mean SS and COD loads per storm during the non-growing season were much lower than those in the growing season, and therefore non-point source pollution in the growing season should be managed well.

Keywords: Soil erosion; flooding; rice stubble; non-growing season

Ⅰ. 서 론

비점원 오염물질은 점원 오염물질과는 달리 강우에 의한 유출과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다 (Wolfe, 2001). 최근 논면적은 감소하고 있으나, 2015년 현재의 논 면적은 약 90만 ha (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2016)로 우리나라 농경지 면적의 54 %를 차지하여 논으로부터의 배출되는 비점원 오염부하는 상당히 클 것으로 생각된다. 논은 평평한 지형, 담수조건, 식생 등으로 습지와 유사하나, 작물 생산을 위한 시비 (施肥)가 이루어지고, 관개배수가 이루어지고 있는 점이 다르다. 논은 습지와 같은 역할을 하여 논의 수질보전 기능, 토양침식방지 기능 등과 같은 논의 다원적 기능이 평가되고 있다 (Kim et al., 2006a; Kim et al., 2006b; Takeda and Fukushima, 2006; Chen et al., 2012). 논은 영농기 (5월에서 9월까지)에는 대부분 담수되어 환원토층을 가지고 있으나, 비영농기 (10월에서 4월까지)에는 배수되어 밭과 같이 비담수 상태로 변하여 산화토층만을 가지게 된다.

지금까지 국내외에서 논에서의 오염물질의 물질수지에 관한 연구는 취입보 (Oh et al., 2002; Lee et al., 2014), 양수장 (Yoon et al., 2002d), 저수지 (Song et al., 2013), 지하수 관정 (Yoon et al., 2002a), 순환관개 (Takeda and Fukushima; 2006) 등의 다양한 수원공과 관개 방식을 갖는 논을 대상으로 실시되었다. 또한, 강우시 논에서의 오염물질의 유출 특성에 관한 연구가 필지논 (Yoon et al., 2002b; Yoon et al., 2002c; Zhang et al., 2016) 혹은 광역논 (Takeda et al., 1990; Feng et al., 2004; Park et al., 2005; Kim et al., 2006a; Lee et al., 2011)을 대상으로 보고되었다. 하지만, 이상의 연구는 주로 영농기를 대상으로 하여 수행되었고, 비영농기 논에서의 오염물질의 유출 특성 연구는 필지 논을 대상으로 실시된 몇 개의 연구 (Kunimatsu et al., 1994; Yoon et al., 2002c; Han et al., 2005)가 있을 뿐으로, 여러 필지로 이루어진 광역논에서의 오염물질 유출에 관한 연구는 거의 발견되지 않는다. 이는 비영농기에 강수량이 적고 영농기보다 작은 유출률로 논 유출수를 측정할 수 있는 강우사상이 적기 때문으로 생각된다. 따라서, 강우시 비영농기 논에서의 오염물질 유출 특성에 대해서는 잘 알려져 있지 않으며, 이에 대한 유출부하의 저감 기

* Department of Road Construction, Uiwang City Hall
** Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungbuk National University
† **Corresponding author**
Tel.: +82-43-261-2573 Fax: +82-43-271-5922
E-mail: jskim@cbnu.ac.kr
Received: February 10, 2017
Revised: March 7, 2017
Accepted: March 7, 2017

법도 제시되고 있지 않은 실정이다.

본 연구에서는 대구획 광역 논을 대상으로 영농기와 비영농기의 강우시 부유물질 (SS)과 화학적산소요구량 (COD)의 농도와 부하량을 비교함으로써 두 시기의 오염물질의 유출특성을 파악하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 조사지구

본 조사지구는 충청북도 청주시 옥산면 (E 127° 41′, N 36° 68′)에 위치하고 있는 대구획 광역논이다. 전체 면적은 23.4 ha이며, 논이 92 %, 밭 8 %를 차지하고 있다 (Fig. 1). 본 지구는 금강 수계 제 1 지류인 미호천에 있는 여천보를 용수원으로 하고 있는데, 보 상류에는 저수용량 14백만 m^3의 미호저수지가 있어 용수는 저수지의 영향을 크게 받고 있다. 본 지구는 표고 30~32 m의 저평지에 위치하고 있으며, 필지 논은 대구획 (100 m × 100 m)으로 용·배수가 분리되어 있다. 용수로는 콘크리트 수로로 되어 있고, 배수로는 흙수로로 되어 있다. 토양의 조성 비율은 모래 42.4 %, 실트 44.6 %, 점토 13.0 %로, 이를 미국 농무성 (USDA)의 삼각좌표법으로 분류하면 토성은 양토 (loam)에 속하는 것으로 나타났다.

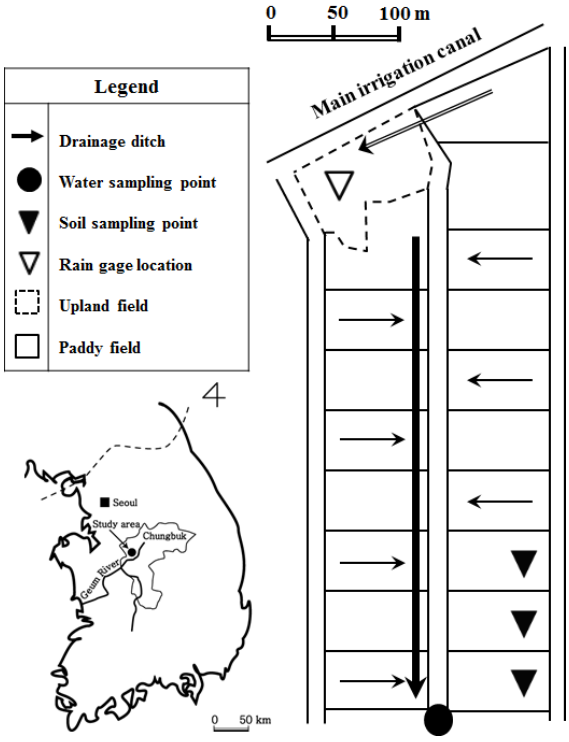


Fig. 1 Schematic representation of study area

2. 연구방법

수질과 유량 측정은 2011년 11월 하순~2012년 7월 중순까지의 6회의 강우사상에 대하여 실시되었고, 측정횟수는 비영농기 3회, 영농기 3회이다. 유량과 수질 측정은 배수로 말단에서 강우사상마다 1~6시간 간격으로 실시되었다. 조사지구 전체의 시비시기 및 시비량은 2011과 2012년에 각각 영농하고 있는 30 농가를 대상으로 설문조사를 실시하여 얻었다. 유속은 유속계 (Model 801, EM Flow Meter)를 이용하여 측정하였고, 실측한 수위에 따른 유수 단면적을 산출하여 측정시간별 유량을 산정하였다. 강우시 배수로 말단에서의 유출수는 비영농기에는 강우에 의한 직접유출수만으로 구성되고, 영농기에는 직접유출수와 평상시의 회귀수로 구성되는데, 회귀수량이 적어 간헐흐름 (ephemeral stream)에 유사하다. 여기서 영농기의 유출수는 간헐흐름에 적용할 수 있는 수평직선 분리법을 사용하여 직접유출수와 회귀수를 분리하였다 (Chow et al., 1998).

강우량은 조사지구 근처에서 tipping bucket 타입 데이터 로거형 강우량계 (103800D, CASELLA)를 이용하여 측정되었다. 수질분석을 위한 강우는 조사지구 근처에서 채수통을 이용하여 채수하였다. SS 농도는 유리섬유여지 (GF/C)법으로 분석하였으며 (Ministry of Environment, 1997), COD 농도는 Standard Methods (APHA, 1998)에 의한 중크롬산칼륨을 이용하여 분석하였다.

강우사상별 유량가중평균농도 (EMC)는 식 (1)을 이용하여 산정하였다 (Novotny, 2003).

$$EMC = \frac{\sum (Q_t \times C_t)}{\sum Q_t} \tag{1}$$

여기서 t는 유출시점으로부터의 경과시간, Q_t는 시간 t에서의 유출수 유량, C_t는 시간 t에서의 오염물질의 농도이다.

통계적 분석을 위해 Microsoft Excel 2007을 이용하였으며, 강우사상별 직접유출량과 오염부하량 간의 두 변수간의 관계성을 파악하기 위해서 회귀분석을 실시하였다. 회귀식으로는 식 (2)와 같은 거듭제곱함수 (power function)를 이용하였다.

$$L = a V^b \tag{2}$$

여기서 L은 오염부하량, V는 직접유출량, a, b는 상수이다. p (유의확률) < 0.05인 경우, 회귀식은 유의한 것으로 판단하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 영농현황과 시비량

벼는 5월 중순에 이앙되어, 10월 초순에 수확되었다. 관개는 4월 중순에 시작되어 8월 하순에 종료되었는데, 6월 하순부터 7월 하순까지는 중간낙수와 계속되는 강우로 관개가 중단되었다.

2011년과 2012년의 시비시기와 시비량은 Table 1과 같다. 시비는 2011년에는 기비와 수비 2회, 2012년에는 기비, 분얼비, 수비와 같이 3회 실시되었다. 시비량은 2011년, 2012년에 질소는 각각 91.2 N kg/ha, 95.6 N kg/ha로 나타났으며, 인은 각각 17.8 P kg/ha, 23.8 P kg/ha로 나타났다. 2011년과 2012년 시비량은 큰 차이를 보이지 않았고, 이는 거의 표준시비량(90.0 N kg/ha, 19.6 P kg/ha)에 해당되는 값이다. 2012년도의 시비량을 Oh et al. (2002)가 조사했던 1998년도의 시비량(164.3 N kg/ha, 21.4 P kg/ha)과 비교하면 질소는 약 42 % 감소된 반면 인은 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 친환경농업의 확산으로 인해 과거에 비해 질소 시비량이 감소하고 있기 때문으로 사료된다.

2. 강우사상 및 유출률

비영농기와 영농기 동안 강우사상 개요는 Table 2와 같다. 각 강우사상에서의 총 강우량은 35.6~127.8 mm를 나타냈으며, 강우사상 5에서 127.8 mm로 가장 높게 나타났다. 또한 강우 강도는 강우사상 6에서 16.0 mm/h로 가장 높게 나타났으며, 3일 선행강우는 강우사상 1~5에서는 0.0 mm, 강우사상 6에서 64.5 mm로 나타났다.

영농기의 강우사상 (강우사상 4~6)은 중간낙수와 계속된 강우로 용수 공급은 중단되어 있고, 논은 전반적으로 배수되어 있으나, 바닥의 요철(凹凸)에 의해 많은 곳에서 얕게 담수되어 있는 상태에서 발생하였다. 평균 유출률은 비영농기 (강우사상 1~3)에 21.3 %의 낮은 값을 보였고, 영농기 (강우사상 4~6)에 91.0 %를 보였다. 평균유출률은 영농기가 비영농기보다 높게 나타났는데. 이는 영농기에는 계속된 강우로 표층토가 포화상태에 가깝기 때문으로 사료된다. 일본에서는 경운 전 비영농기 필지 논에서 27~57 %의 유출률을 보였고 (Kunimatsu et al., 1994), 저평지에 있는 2개의 포도밭에서의 유출률은 비영농기의 유출률과 유사한 25 %와 26 %의 값을 보였다 (Yoon et al., 2011). 이와 같이 논에서는 담수 혹은 표층토의 높은 수분 상태가 강우시 유출률에 크게 영향을 미치는 것으로 생각된다.

3. 강우에서의 SS와 COD 농도

각 강우사상별 강우의 오염물질 농도는 Table 3과 같다. 전체 강우사상에 대한 SS의 산술평균 농도는 1.1 mg/L, COD의 산술평균농도는 4.5 mg/L를 나타냈고, 강우사상별 SS 농도

Table 1 Fertilizer application rates and timing in the study area

Year	Dressing	Date	Nitrogen (kg/ha)	Phosphorus (kg/ha)	Remark
2011	Basal dressing	Mid-April	65.9	17.8	Transplanting: Mid-May
	Panicle fertilization	Late July	25.3	-	-
	Total		91.2	17.8	-
2012	Basal dressing	Mid-April	63.1	17.0	Transplanting: Mid-May
	Tillering fertilization	Early June	7.7	2.1	
	Panicle fertilization	Late July	24.8	4.7	-
	Total		95.6	23.8	-

Table 2 Summary of storm events

Event	Date	Rainfall (mm)	Duration hours of rainfall (h)	Maximum rainfall intensity (mm/h)	Total 3-day antecedent rainfall (mm)	Runoff (mm)	Runoff rate (%)	Season
1	Nov. 30-Dec. 02, 2011	43.4	28.0	6.0	0.0	12.8	29.5	Non-growing
2	Apr. 03-04, 2012	56.0	15.0	12.2	0.0	13.3	23.8	
3	Apr. 21-22, 2012	35.6	23.0	3.6	0.0	3.8	10.6	
4	Jun. 29-Jul. 02, 2012	58.6	46.0	12.0	0.0	46.0	78.5	Growing
5	Jul. 05-09, 2012	127.8	43.0	14.6	0.0	122.3	95.7	
6	Jul. 18-20, 2012	39.4	14.0	16.0	64.5	39.0	98.9	

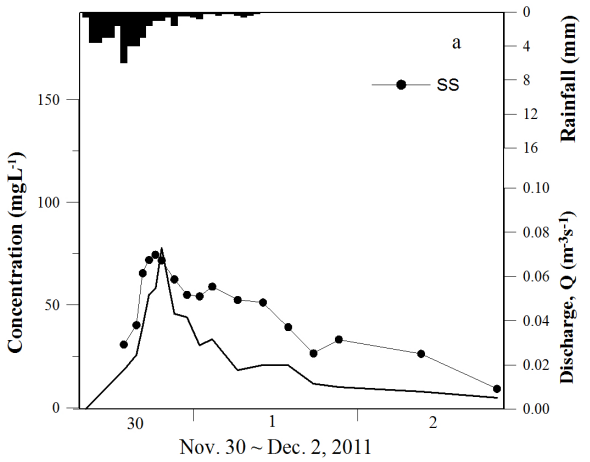
Table 3 SS and COD concentrations in rainwater during storms

Event	SS (mg/L)	COD (mg/L)	Season
1	0.5	5.3	Non-growing
2	0.5	4.7	
3	1.5	4.8	
4	1.0	4.0	Growing
5	1.5	4.8	
6	1.3	3.3	
Average	1.1	4.5	

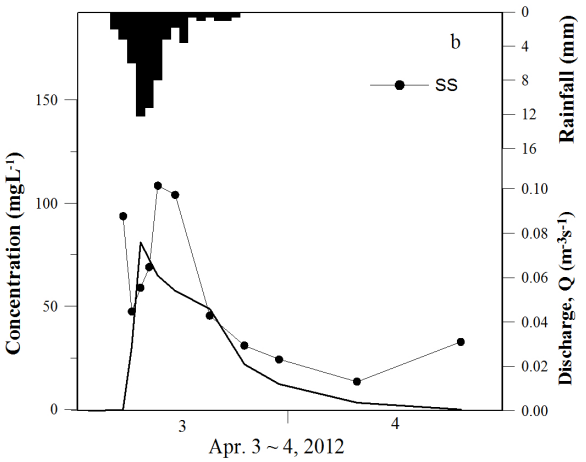
는 0.5~1.5 mg/L, COD 농도는 3.3~5.3 mg/L로 큰 차이를 보이지 않았다.

4. 유출수의 SS 농도변화 특성

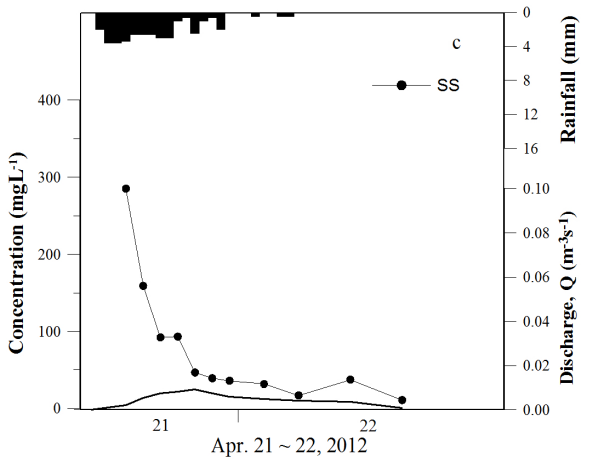
비영농기 유출수의 SS 농도는 Fig. 2에서와 같이 강우사상 1에서 9.3~74.5 mg/L, 강우사상 2에서 32.5~108.5 mg/L, 강우사상 3에서 11.0~285.3 mg/L로 나타났다. 영농기의 SS 농도는 강우사상 4에서 25.0~130.8 mg/L, 강우사상 5에서 7.3~237.8 mg/L, 강우사상 6에서 21.5~172.8 mg/L로 나타났다. SS 농도는 많은 강우사상(사상, 1, 4, 5, 6)에서 유출수의 유량이 증가함에 따라 증가하고, 유량이 감소하면서 감소하는 경향을 보였다. 강우사상 3에서는 유출 초기에 높은 농도를 보인 후 감소하는 경향을 보였다. SS의 최대 농도는 강우량이 많은 강우사상 5나, 최대강우강도가 높은 강우사상 6에서 높은 값을 보여 SS의 최대 농도는 강우량이나 최대 강우강도에 영향을 받는 것으로 나타났다. 타이완의 계단식 논에서는 250 mm 이하의 강우사상에서 SS의 최대농도는 150 mg/L 이하를 보였고, 일반적으로 강우량이 증가함에 따라 최대농도도 증가하는 것을 보였다(Chen et al., 2012). 한편, 일본의 영농기 광역논에서는 127 mm의 강우사상에서 7.0~40.0 mg/L가 보고되었다(Feng et al., 2004). 핀란드 서부의 농촌 유역에서



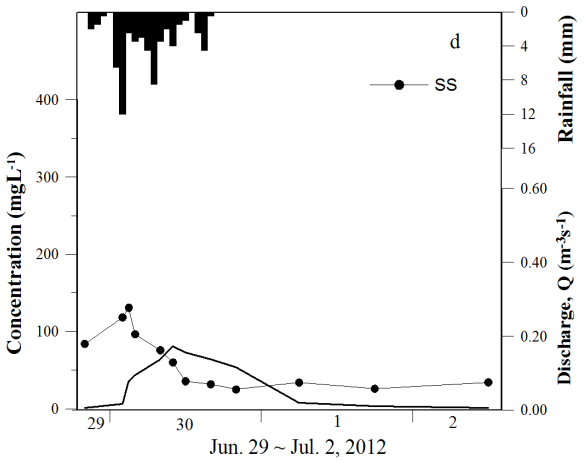
(a)



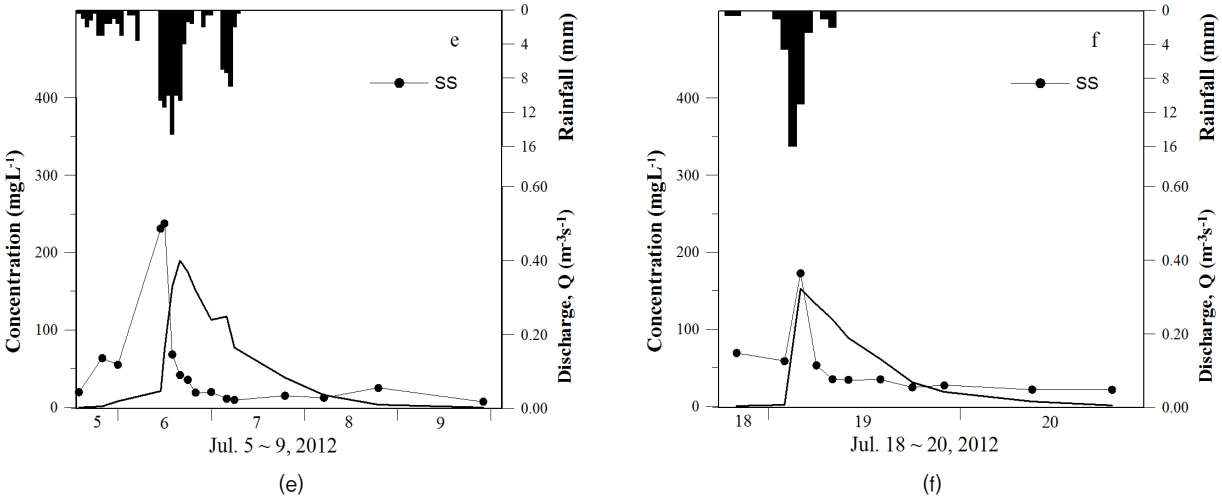
(b)



(c)



(d)



(e) (f)

Fig. 2 Temporal variation of SS concentrations and discharge during storms in the non-growing and growing seasons: (a) Event 1; (b) Event 2; (c) Event 3; (d) Event 4; (e) Event 5; (f) Event 6

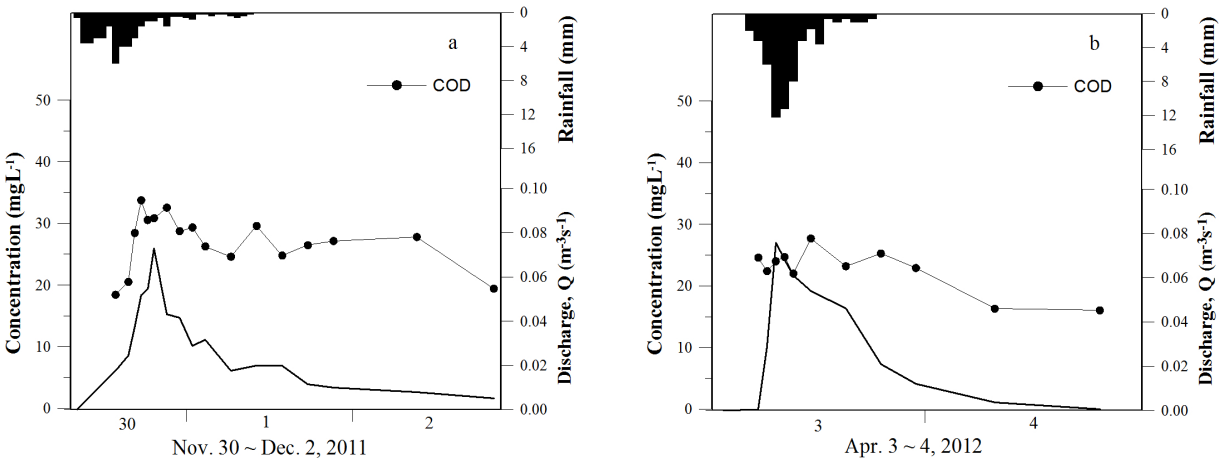
는 융설기 후반에 강우시 SS 농도가 최대 750 mg/L의 높은 값을 보였다 (Rekolainen, 1989).

초기세척현상 (first flush)은 유출수의 최대농도가 첨두유량 앞에서 나타나는 현상을 말하는 데, 여러 개의 강우사상 (1, 3, 4, 5)에서 초기세척현상을 보였으나, 큰 선행강우가 있었던 강우사상 6에서는 초기세척 현상을 보이지 않았다. 선행강우가 적은 경우에 SS의 초기세척현상이 발생하는 것은 바닥에 쌓여있던 토사가 초기 유출수에 의하여 일시에 유출되기 때문으로 생각된다.

5. 유출수의 COD 농도변화 특성

비영농기 유출수의 COD 농도는 강우사상 1에서 18.4~33.8 mg/L, 강우사상 2에서 16.0~27.7 mg/L, 강우사상 3에서 20.3~42.4 mg/L로 나타났다 (Fig. 3). 영농기 유출수의 COD 농도는 강우사상 4에서 8.5~18.6 mg/L, 강우사상 5에서 9.2~17.1 mg/L, 강우사상 6에서 10.9~16.5 mg/L로 비영농기에 비해 낮게 나타났다 (Fig. 3). 유출수의 COD 농도는 여러 개의 강우사상 (1, 4, 5)에서 강우와 함께 유량이 증가함에 따라 농도도 증가하고, 최고 농도를 보인 후 상당기간 동안 높은 농도를 유지하는 경향을 보였다. 하지만, 강우사상 3에서는 SS 농도와 같이 유출 초기에 최대 농도를 보인 후 감소하는 경향을 보였다. COD 농도의 이런 경향은 비영농기 일본의 미경운 필지 논에서도 보고되었다 (Kunimatsu et al., 1994).

COD 농도도 많은 강우사상 (1, 3, 4 및 5)에서 SS 농도와 같이 첨두유량 직전에 최대농도를 나타나는 초기세척 현상을 보였다. 이것은 바닥에 쌓였던 유기물이 초기 유출수에 의하



(a) (b)

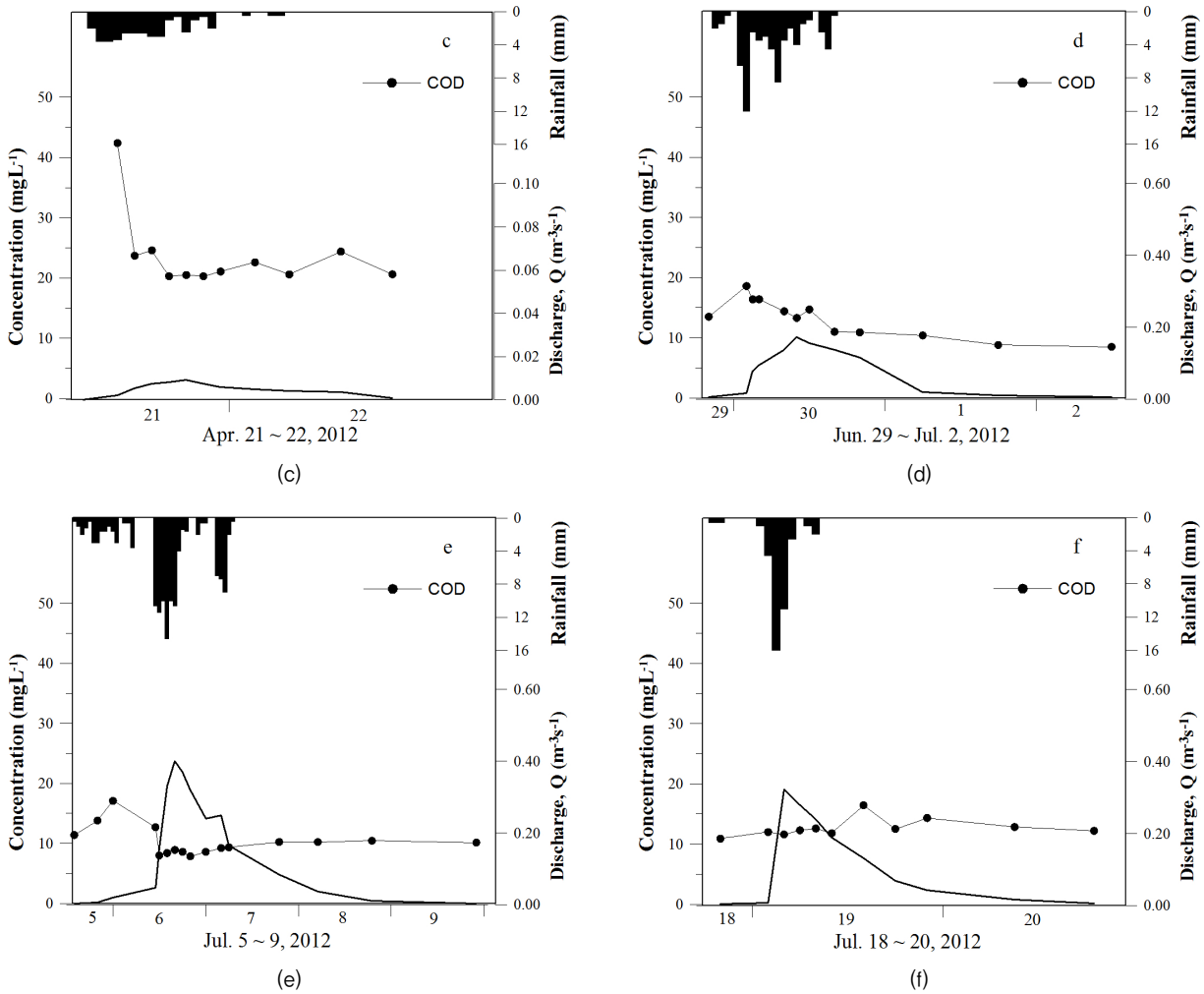


Fig. 3 Temporal variation of COD concentrations and discharge during storms in the non-growing and growing seasons: (a) Event 1; (b) Event 2; (c) Event 3; (d) Event 4; (e) Event 5; (f) Event 6

여 유출되기 때문으로 생각된다. COD의 초기세척현상은 영농기 강우시 일본 광역논에서의 유출수에서도 보고되었다 (Takeda et al., 1990).

6. 유출수의 SS와 COD 유량가중 평균농도 (EMC)

SS의 평균 EMC는 비영농기 56.9 mg/L 영농기 SS 50.3 mg/L로 영농기에 대한 비영농기의 평균 EMC의 비는 1.1를 보여 두 시기의 값이 비슷하게 나타났다 (Table 4).

영농기 SS의 평균 EMC는 낮은 값을 보여, 영농기 담수 상태의 논이 강우의 타격에너지를 크게 감소시켜 토양 침식을 억제하는 것으로 나타났다. 영농기 동안 광역논에서 담수 상태가 비담수 상태보다 총인 (TP) 농도를 1/2 이하로 줄이는 것으로 보고되었다 (Kim et al., 2006). 타이완에서 영농기의 담수된 계단식 논은 다른 용도 (나대지나 녹비 재배)로 사용되었을 때보다 강우시 토양침식량을 1/5 이하로 크게 감소시키는 것으로 나타났다 (Chen et al., 2012).

Table 4 Ratios of average EMCs of SS and COD in non-growing season to those in growing season

Season	No. of events	No. of samples	Average EMCs (mg/L)	
			SS	COD
Non-growing (a)	3	39	56.9	23.9
Growing (b)	3	39	50.3	11.9
Ratio (a/b)			1.1	2.0

본 연구에서의 영농기 값 (50.3 mg/L)은 전남 함평군 광역논에서 측정한 5년간의 강우시 평균 EMC 52.1 mg/L (Lee et al., 2011)나 수원의 필지 논에서 측정된 SS 평균농도 53.0 mg/L (Zhang et al., 2016)와 비슷하게 나타났다. 한편, 본 연

구에서의 영농기 값은 전북 진안군 필지논에서 측정된 영농기 SS의 EMC 124.5~164.4 mg/L (Han et al., 2005)보다는 낮고, 논의 토지특성을 갖는 섬진강 소유역에서의 SS의 EMC 12.6~35.7 mg/L (Park et al., 2005)보다는 높게 나타났다.

연구유역에서의 영농기 SS의 EMC는 밭에서의 값에 비하여 매우 낮게 나타났다. 낙동강 유역의 저평지 밭 2개 지점에서 측정된 강우 유출수에서의 SS의 EMC 평균값은 각각 183 mg/L와 241 mg/L로 나타났다 (Yoon et al., 2011). 또한, 한강 상류의 경사지 밭에서 측정된 강우시 유출수에서의 SS의 EMC는 모두 1,000 mg/L 이상의 높은 값을 보였다 (Lee, 2015).

또한, 비영농기 논 유출수의 SS 농도는 영농기와 비슷한 값을 보여, 비영농기의 논도 영농기의 논과 같이 토양침식을 제어하는 것으로 나타났다. 이는 비영농기에는 영농기보다 낮은 강우량과 최대강우강도, 지표 피복 (ground cover)과 같은 역할을 하는 Fig. 4와 같은 볏짚 잔재와 벼의 그루터기 (stubble) 등이 지표유출을 줄이고 토양 침식을 억제하고 있기 때문으로 사료된다. 잔재를 지표에 남겨 지표피복을 유지하는 것은 토양침식을 제어하는 것으로 알려져 있다 (Toy et al., 2002). Shin et al. (2015)은 3 % 경사도의 시험구 밭에 볏짚을 멀칭한 결과, 여러 강우사상에 대한 SS 부하의 삭감률은 39 %로 나타났다. 전북 진안군 필지논에서 비영농기 SS의 EMC는 76.6~114.8 mg/L로 영농기보다 낮게 나타났다 (Han et al., 2005).

비영농기의 경운 방식이 바뀌어, 과거에는 볏짚의 무기물화를 위하여 수확 후의 추경 (秋耕)이 장려되었으나, 최근에는 볏짚이 가축사료용으로 외부로 반출되어 써레질 전의 춘경 (春耕)이 실시되고 있다. 이와 같은 경운 방식의 변경이 경운 상태의 기간을 줄여 논에서의 토양침식을 방지하는데 긍정적으로 작용하는 것으로 생각된다.

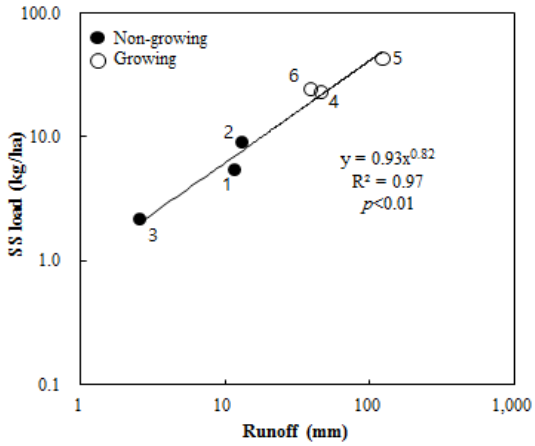
한편, 기존 연구에 의하면 논의 경운 여부가 SS 농도에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 비영농기 진안군 필지논으로부터의 유출수에서의 SS의 EMC는 경운전 114.8 mg/L 이하에서 531.4 mg/L로 4배 이상 증가하였다 (Han et al., 2005). 일본 필지논에서도 경운 전에는 13 mg/L이었으나, 경운 후에는 547 mg/L로 40배 이상 증가하여 (Kunimatsu et al., 1994), 향후, 경운 조건하에서의 SS의 유출에 대한 모니터링이 필요할 것으로 생각된다.

Fig. 4 Rice straw residues and stubble during non-growing season

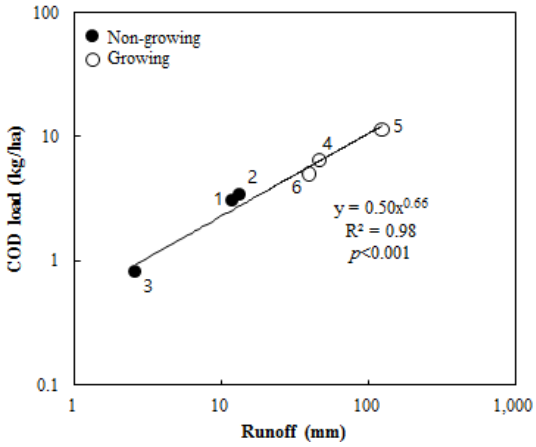
COD의 평균 EMC는 비영농기 23.9 mg/L, 영농기 11.9 mg/L로, 영농기에 대한 비영농기의 평균 EMC의 비는 2.0로 나타났다 (Table 4). COD의 EMC가 영농기보다 비영농기에 높게 나타난 것은 수확 후 논 표면에 남아있던 볏짚 잔재 (Fig. 4) 등의 유기물이 강우에 의하여 유출되었기 때문으로 사료된다. 영농기 연구유역에서의 값은 논의 토지특성을 갖는 섬진강 소유역에서의 COD EMC 15.6~33.4 mg/L (Park et al., 2005) 보다 약간 낮게 나타났다.

7. 직접유출량과 오염부하량의 관계

각 강우사상에 따른 직접유출량과 오염부하량의 관계는



(a) SS



(b) COD

Fig. 5 Relationships between stormflow runoff and pollutant load. Number next to symbols refer to the respective storm events

Fig. 5와 같다. 직접유출량은 비영농기의 강우사상 1~3에서 각각 7.2~27.6 mm로 나타났고, 영농기의 강우사상 4~6에서 39.0~122.3 mm를 나타났다.

SS 부하량은 비영농기에 2.1~8.8 kg/ha, 영농기에 22.7~42.3 kg/ha로 나타났고, COD 부하량은 비영농기에 0.8~3.3 kg/ha, 영농기에 5.0~11.4 kg/ha로 나타났다. 비영농기에는 작은 유출량과 작은 부하량을 보였으며, 영농기에는 큰 유출량과 큰 부하량을 보였다. 영농기와 무경운 비영농기 조건하에 강우유출량과 SS 및 COD의 부하량의 관계는 각각 유의적인 회귀식을 보였다. 거듭제곱함수로 표현된 SS 회귀식의 지수 (b=0.82)는 COD 회귀식의 지수 (b=0.66)보다 높은 값을 보여, 직접유출량 증가와 함께 SS 부하량이 COD 부하량보다 크게 증가하는 것으로 나타났다.

또한, 강우사상의 영농기 평균 부하량에 대한 비영농기의 평균 부하량의 비는 SS가 18 %, COD가 31 %로 나타나, 비영농기보다는 영농기 비점오염 관리가 보다 중요할 것으로 생각된다.

Ⅳ. 결 론

본 연구에서는 2011~2012년의 대구획 광역 논을 대상으로 영농기, 무경운 비영농기의 강우사상을 대상으로 SS와 COD의 농도와 부하량을 비교함으로써 영농기와 비영농기의 오염물질의 유출특성을 파악하고자 하였다.

비영농기 논 유출수에서의 SS의 평균 EMC는 영농기와 비슷한 값을 보였고 밭에 비하여 낮은 값을 보였다. 이는 영농기에는 담수와 높은 토양수분 상태가 강우충격을 완화시키고, 비영농기에는 낮은 최대강우강도와 강우량, 지표 피복과 같은 역할을 하는 볏짚 잔재와 벼의 그루터기 등이 지표유출과 이에 따른 토양 침식을 억제하고 있기 때문으로 사료된다. 한편, COD의 평균 EMC는 비영농기가 영농기보다 2배로 나타났는데, 이는 비영농기 논 표면에 남아있던 볏짚 잔재 등의 유기물이 유출되었기 때문으로 사료된다.

영농기와 무경운 비영농기의 직접유출량과 SS 및 COD의 부하량은 각각 거듭제곱함수의 회귀식으로 표현되었으며. SS 회귀식의 지수는 COD 회귀식의 지수보다 높은 값을 보여, 직접유출량 증가와 함께 SS 부하량이 COD 부하량보다 크게 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 강우사상의 비영농기 SS와 COD의 평균 부하량은 각각 영농기 평균부하량의 18 %, 31 %로 나타나, 논에서의 SS와 COD의 관리는 비영농기보다는 영농기가 보다 중요할 것으로 생각된다.

추경에서 춘경으로 경운방식의 변경에 따른 경운된 기간의 단축에 의해 논은 대부분의 비영농기에도 영농기와 같이 토양침식을 제어하는 것으로 판단된다. 본 연구에서의 자료에는 제한된 강우사상, 비영농기 무경운 조건하에서 얻어진 한계를 가지고 있다. 향후, 경운 조건을 포함한 다양한 영농상태와 많은 강우사상에 대한 자료 축적과 해석을 통하여 강우시 논에서의 SS와 COD의 유출 특성이 규명되리라고 생각된다.

사 사

이 논문은 2014년 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

1. APHA (American Public Health Association), 1998. 20th ed. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, Washington, D.C., USA.
2. Chen, S. -K., C. -W. Liu, and Y. -R Chen, 2002. Assessing soil erosion in a terraced paddy field using measurements and universal soil loss equation, *Catena*. 95: 131-141.
3. Chow, V. T., D. R. Maidment, and L. W. Mays, 1998. *Applied Hydrology,* McGraw-Hill, NY, NY, USA.
4. Feng, Y. W., I. Yoshinaga, E. Shiratani, T. Hitomi, and H. Hasebe, 2004. Characteristics and behavior of nutrients in a paddy field area equipped with a recycling irrigation system. *Agricultural Water Management* 68(1): 47-60.
5. Han, K.-H., J.-H. Kim, J.-S. Lee, J.-T. Lee, J.-Y. Cho, and K. S. Yoon, 2005. Effect of sampling frequency during storm period on estimation of pollutant load from paddy field. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 24(1): 17-23 (in Korean).
6. Kim, J. S., S. Y. Oh, and K. Y. Oh, 2006a. Nutrient runoff from a Korean rice paddy watershed during multiple storm events in the growing season. *Journal of Hydrology* 327: 128-139.
7. Kim, T. C., U.-S. Gim, J. S. Kim, and D.-S. Kim, 2006b. The multi-functionality of paddy farming in Korea. *Paddy and Water Environment* 4(4): 169-179.
8. Kunimatsu, T., L. Luong, M. Sudo, and I. Takeda, 1994. Runoff loading of materials causing water pollution from a paddy field during a non-planting period. *Trans. of the Japanese Society of Irrigation, Drainage, and Land Reclamation* 170: 45-54 (in Japanese).
9. Lee, K., J. Jung, D. Choi, K. Yoon, W. Choi, S. Choi, S. Lim, H. Park, B. Lim, and G. Choi, 2011. Characteristics of suspended solids from paddy fields. *J. of Korean Society on Water Quality,* 27(6): 868-876.
10. Lee, J. B., J. Y. Lee, S. H. Li, J. J. Jang, I G. Jang, and J. S. Kim,

2014. Nutrient balance in the paddy fields watershed with a source of river water. *J. of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(5): 11-19 (in Korean).

11. Lee, J. Y., 2015. Characteristics of pollutant runoff from a sloping upland field during multiple storms. M. S. diss., Cheongju: Chungbuk National University (in Korean).
12. Ministry of Agriculture, Food, and Rural Affairs, 2016. *Agriculture, Food, and Rural Affairs Statistic Yearbook*, Sejong, Korea (in Korean).
13. Ministry of Environment, 1997. *Standard Methods for Water Quality* 199-209 (in Korean).
14. Novotny, V., 2003. *Water Quality: Diffuse Pollution and Watershed Management,* John Wiley & Sons, Inc., NY, USA.
15. Oh, S. Y., J. S. Kim, S. J. Kim, and C. G. Yoon, 2002. Unit loads of pollutants in a paddy fields area with large-scaled plots during irrigation seasons, *J. of the Korean Society of Agricultural Engineers* 44(2): 136-147 (in Korean).
16. Park, S. C., C. R. Oh, Y. H. Jin, and D. S. Kim, 2005. Study on runoff characteristics of non-point source in rural area of Seomjin watershed. *J. of the Environment Sciences* 14(11): 1057-1062 (in Korean).
17. Rekolainen, S., 1989. Effect of snow and soil frost melting on the concentrations of suspended solids and phosphorous in two rural watersheds in Western Finland. *Aquatic Science* 51(3): 211-223.
18. Shin, M. H., J. J. Jang, Y. Jung, Y. S. Park, K. J. Lim, and J. D. Choi, 2015. Effect of straw mulch on runoff and NPS pollution reduction from experimental plots under climate change scenario in Korea. *J. of Irrigation and Drainage Engineering* 141(8), doi: http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)IR. 1943-4774.0000862.
19. Song, J.-H., M.-S. Kang, I. Song, S.-H. Hwang, J. Park, S.-M. Jun, K.-U. Kim, and J.-R. Jang, 2013. Analysis of nutrient load balance in reservoir irrigated paddy block. *J. of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(6): 165-175 (in Korean).
20. Takeda, I. and I. Fukushima, 2006. Long-term changes in pollutant load outflow and purification function in a paddy field watershed using a circular irrigation system. *Water Research* 40: 569-578.
21. Takeda, I., T. Kunimatsu, S. Kobayashi, and T. Maruyama, 1990. Storm runoff loadings from paddy field areas. *Trans. of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Land Reclamation* 147: 79-85 (in Japanese).
22. Takeda, I., T. Kunimatsu, S. Kobayashi, and T. Maruyama, 1991. Pollutants balance of a paddy field area and its loadings in the water system. *Trans. of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Land Reclamation* 153: 62-72 (in Japanese).
23. Toy, T. J., G. R. Foster, and K. G. Renard, 2002. *Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement, and Control,* 201-202, John Wiley & Sons, Inc., NY, USA.
24. Wolfe, M. L. 2001. Hydrology, Ch. 1. In *Agricultural Nonpoint Source Pollution: Watershed Management and Hydrology*, eds. W. F. Ritter, and A. Shirmohammadi, 1-27, CRC Press LLC, Boca Raton, FL, USA.
25. Yoon, C. G., B. H. Kim, J. J. Hong, and H. H. Sun, 2002a. Characteristics of pollutant loading from paddy field area with groundwater irrigation. *J. of the Korean Society of Agricultural Engineers* 44(5): 116-126 (in Korean).
26. Yoon, K.-S., J.-G. Cho, K.-K. Han, J.-K. Choi, J.-G. Son, and J.-Y. Cho, 2002b Sediment losses from a paddy plot during cropping period. *J. of Korean Society of Rural Planning* 8(1): 69-76 (in Korean).
27. Yoon, K. S., J.-Y., Choi, K. H. Han, and J. Y. Cho, 2002c Flow weighted mean concentration and runoff-mass load relationship of pollutant derived from intensively sampled water quality data of a paddy field. *J. of the Korean Society of Agricultural Engineers* 44(5): 127-135 (in Korean).
28. Yoon, K. S., K. H. Han, J. Y. Cho, C. H. Choi, J. G. Son, and J. K. Choi, 2002d. Water and nutrient balance of paddy field irrigated from a pumping station during cropping period, *J. of the Korean Society of Rural Planning* 8(1): 15-25 (in Korean).
29. Yoon, Y. S., S. H. Lee, J. J. Yu, and J. K. Lee, 2011. Analysis of nonpoint source runoff characteristics for the vineyard area. *J. of the Environment Sciences* 20(3): 361-372 (in Korean).
30. Zhang, Y., K. Jung, H.-R. Cho, K.-H. Han, M.-G. Kim, and Y.-K. Sonn, 2016. Suspended solids export by outflowing water from irrigation paddy field during rice growing season of Korea. *J. of Soil Sci. Fert.* 49(2): 218-225 (in Korean).