

Suspended Solids Export by the Outflowing Water from Irrigation Paddy Field during Rice Growing Season of Korea

Yongseon Zhang, Kangho Jung, Hye-Rae Cho, Kyeong-Hwa Han, Min-Kyeong Kim, and Yeon-Kyu Sonn*

National Academy of Agricultural Science, RDA, Wanju, 55365, Korea

(Received: February 11 2016, Revised: April 20 2016, Accepted: April 24 2016)

This experiment was conducted in Suwon and Iksan city from 2012 to 2014 to evaluate soil erosion and nutrient loss from irrigated paddy fields during cropping period. Rainfall amount and rainfall erosivity of EI_{30} were, on average, 1,026 mm and 3,922 mm $ha^{-1}yr^{-1}hr^{-1}$ for the cropping period, respectively, and the rainfall event with maximum EI_{30} occurred in July. Annual average of runoff was 2,508 MT $ha^{-1}yr^{-1}$ in Suwon and 3,375 MT $ha^{-1}yr^{-1}$ in Iksan, accounting for 36% of rainfall of the cropping period. Nutrient loss by runoff, on average, was 7.0 kg N $ha^{-1}yr^{-1}$, 1.3 kg P $ha^{-1}yr^{-1}$, and 16.6 kg K $ha^{-1}yr^{-1}$; N, P, and K loss were 5.0, 0.6, and 8.3 kg $ha^{-1}yr^{-1}$, respectively, in Suwon and 8.9, 1.9, and 16.7 kg $ha^{-1}yr^{-1}$ in Iksan. Soil loss in Korean paddy rice was evaluated as 0.33 MT $ha^{-1}yr^{-1}$ ranging from 0.05 MT $ha^{-1}yr^{-1}$ to 0.88 MT $ha^{-1}yr^{-1}$. Amount of soil loss, however, depended on areas and year influenced by variation of rainfall amount and intensity. Interestingly, soil erosion in Iksan in 2012 was remarkably greater than those in other periods due to heavy rainfall between late May and June with soil flake dispersion right after the rice-planting season.

Key words: Soil loss, Runoff, Irrigation Paddy Field, Rice

Runoff and soil loss from irrigation paddy field during rice growing season by regional.

Region	Runoff (MT $ha^{-1}yr^{-1}$)				Soil loss (MT $ha^{-1}yr^{-1}$)			
	2012	2013	2014	Ave.	2012	2013	2014	Ave.
Suwon City	5,301	3,030	1,895	2,508	0.383	0.161	0.046	0.197
Iksan City	4,583	3,811	1,732	3,375	0.880	0.404	0.115	0.466

*Corresponding author: Phone: +82632382425, Fax: +82632383822, E-mail: sonnyk@korea.kr

§Acknowledgement: This project was supported by Rural Development Administration (PJ010519).

Introduction

비점오염원은 주로 강우시 유역으로부터 유입되며 농촌 유역에서 강우시와 비강우시의 유출량 및 오염물질 부하량은 전체 유량 및 부하량의 80~90%가 강우시 수계로 유입된다. 환경부 (2006)의 물 환경 기본계획에 따르면, 전체 오염 부하 중 비점오염부하 비중은 2003년 기준 42~69%를 차지하고 있으며 해마다 그 비중이 지속적으로 증가하고 있다.

우리나라에서 관개 논은 전체 농경지 면적의 60% 이상을 차지하고 있으며, 농업용수의 공급을 받은 논 지대에서는 강우 및 기타 여건에 의해 유출과정에서 다량의 영양물질이 수계로 유입되어 하천이나 담수호의 부영양화 유발물질로 작용하게 된다. 영양물질의 손실은 비료의 경제적인 손실뿐만 아니라 환경적인 부담으로 작용하게 된다.

논 유역은 일반 수계유역과는 달리 논에서 많은 저류가 이루어지며, 논으로 용수 유입량은 관개수량이 없는 경우 강우량에 의하여 결정되며, 유출량은 논 배수방식에 크게 영향을 받게 된다 (Kim, 1982). 논둑의 배수 물꼬는 각각의 논둑을 경계로 하는 저수지 역할을 하는 것으로 생각할 수 있으며, 배수물꼬의 유출특성이 논에서의 유출특성을 결정하는 중요한 인자가 된다. 관개기간 중에 논 표층토에서는 전면수에 의해 대기로부터 산소공급이 억제되고 환원상태가 발달하여 Fe, P₂O₅, SiO₂의 흡수가 증가하지만 이들 성분이 수계로 유출되기도 용이하다. 그 동안 논 경우 강우 유출수의 농도는 낮더라도 유량이 많아서 부하량의 기여도가 매우 높기 때문에 다양한 연구자들에 의해 논 오염부하 정량적 산정에 대한 연구가 많이 진행되고 있지만 대부분의 조사가 총질소와 총인에 중점을 두고 있다. Merz et al. (2006)은 오스트리아의 337개의 유역에서 50,000개의 강우 사상을 대상으로 강우사상 유출물의 시공간적 변이에 대한 연구로 공간적 유출률 변화는 토양과 토지 이용보다는 연간 강수량 크기가 유출률에 더 영향을 미친다고 보고하였다. 그 밖에 논에서의 영양염류인 질소와 인에 대한 모니터링 연구는 여러 연구자에 의해 이루어졌다 (Shin and Kwon, 1990; Kim and Cho, 1995; Kim et al., 1999). 하지만 대부분의 연구가 일정 간격으로 수질 샘플링으로 농도를 살펴본 경우가 대부분이며, 강우시 유출되는 토양과 양분의 전체적인 함량에 대해 살펴본 연구는 매우 적은 실정이다.

따라서 논에서의 영양물질의 유출은 비의 양분 수급을

결정하고 주변 수계의 영향을 미치므로 하천의 수질관리 이전에 논에서의 영양물질의 정량적인 평가가 이루어져야 할 것이다. 본 연구에서는 논토양에서 강우시 토양유실량과 더불어 전질소 (T-N), 전인 (T-P), 전칼리 (T-K)의 유출변화를 살펴보기 위하여 경기 수원과 전북 익산 시험포장에 집수기를 설치하여 강우시 필지 논에서 유출수 전체를 연속 채수하여 분석하였다.

Materials and Methods

시험포장은 농업기후대적인 특성을 고려하여 중부와 남부지역으로 구분하였다 (Yun, 2010). 중부지역의 연구대상 지점은 경기 수원시 국립농업과학원 생물부의 구내 논포장 (37°15'26.14"N, 126°59'20.22"E)이었고, 연도별 시험구 면적은 2012년 0.15a, 2013년 0.14a, 2014년 0.21a이었다. 남부지역의 연구대상 지점은 전라북도 익산시 농촌진흥청 벼 맥류부 구내에 논포장 (35°56'6.60"N, 126°55'41.46"E)에 위치하고, 연도별 시험구 면적은 2012~2013년 0.18a, 2014년 0.36a이었다.

토양통에 있어 경기 수원의 시험포장은 지산 미사질식양토 (Jisan Silt Clay Loam, SiCL : Fine, mixed, mesic family of Aquic Hapludalfs)이었고, 전북 익산의 시험포장은 전북 미사질 양토 (Jeonbug Silt Loam, SiL : Fine silty, mixed, mesic family of Typic Ochraqualfs)로 나타났으며, 토양 이화학성의 3년간 평균값은 Table 1과 같다.

벼의 재배방법과 품종은 각 지역에서 보통기 재배시험을 적용하여 경기 수원지역에서는 삼광벼, 전북 익산지역에서는 호품벼로 비교하였다. 이앙일과 수확일은 Table 2와 같이 경기 수원지역에서 5월 22일과 10월 11일, 전북 익산지역에서 5월 29일과 10월 17일이었으며, 재식거리 30 × 15 cm로 주당 3본씩 기계 이앙하였다. 시비량은 10 a당 질소 9 kg, 인산 2 kg, 칼리 2 kg를 사용하였으며 질소는 기비 50%, 분얼비 30%, 수비 20% 비율로 나누어 사용하였고, 인산은 전량 기비로 칼리는 기비 70%, 수비 30%로 사용하였다. 백미수량은 3m²의 면적에서 3반복 수확하여 수분 함량이 15% 되게 말린 다음 탈망, 정선한 후 일본 Sasake사의 ST 제현기로 백미를 조제하여 농촌진흥청 농사시험조사기준 (1995년)에 의하여 조사하였다.

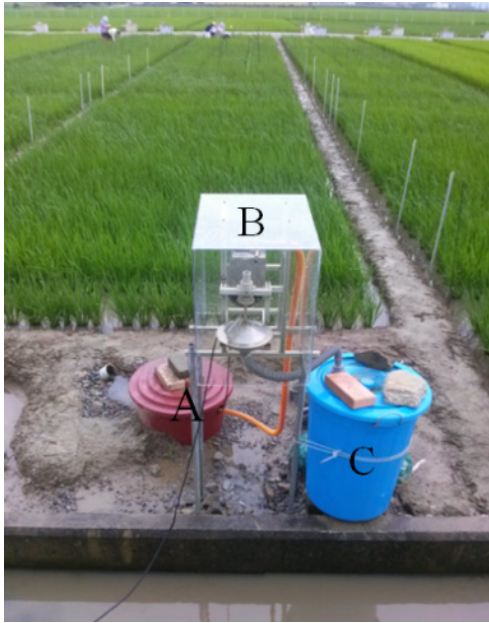
강우 후 유출이 발생할 때마다 시험포장에서 유출된 토

Table 1. Physico-chemical properties of test soils before experiment.

Districts	Particle size distribution (%)			Texture, USDA	pH	O.M.	Av P ₂ O ₅	Ext. cation				Av SiO ₂
	Sand	Silt	Clay					Ca	K	Mg	Na	
	----- wt.% -----				1:1	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	----- cmol _c kg ⁻¹ -----				g kg ⁻¹
Suwon	9.8	56.5	33.7	SiCL	6.4	21	101	7.5	0.3	2.2	0.3	317
Iksan	12.0	65.3	22.7	SiL	6.9	25	70	6.6	0.4	3.2	1.5	304

Table 2. Application rates of chemical fertilizers and rice yields during rice growth season from 2012 to 2014.

Districts	Field scale	Rice cultivar	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O kg ha ⁻¹	Rice planting ~ Harvest	Milled rice Yield kg 10a ⁻¹
Suwon city	0.16a	Samkwang	9.0-2.0-2.0	22. May ~ 11. Oct.	450
Iksan city	0.24a	Hopum	9.0-2.0-2.0	29. May ~ 17. Oct.	492

**Fig. 1. The run-off sampler for over-flow water measurement from a paddy field.**

* An abbreviation : (A) Water lift pump connected over-flow water from a paddy field, (B) Automatic sample splitter with 1 to 100 ratios, (C) Water tank with 100 L

사와 물은 유출구에 직접 고무호스를 연결하여 200 L 용량의 플라스틱 용기에 집수되도록 하였으며 유출수가 100 L가 되었을 때, Fig. 1과 같이 수위조절용 자동 펌프 (0.3 Hp)가 작동되어 분취기 (특허10-1334791, 2013.11.25., 토양유실량 또는 유출수량 측정하기 위한 유출수분취기)로 양수되어 1:100 비율로 채취하였다. 집수시료는 폴리에틸렌 용기 (2 L)에 채수하여 4°C 이하의 온도에서 보관하여 분석시료로 사용하였다.

토성은 피펫법으로 입경을 분석하여 미 농무성 기준의 삼각도표법 (USDA법)에 따라 분류하였다. pH는 풍건한 토양을 증류수와 1:5로 혼합하여 30분간 진탕한 현탁액을 Ion analyzer로 측정하였고, 유기물 함량은 Tyurin법으로 분석하였으며, 유효인산은 Lancaster법으로 추출하여 분광광도계로 분석하였다. 치환성 양이온 (K, Ca, Mg)은 5 g의 토양 시료에 50 ml의 1M-Ammoniumacetate (pH=7.0)를 가하여 30분간 진탕하여 No.2 여지로 여과 후 원자방출분광광도계 (ICP-OES, GBC)를 이용하여 분석하였다.

강우, 관개수, 유출수 및 침투수를 포함한 수질시료의 분

석은 수질공정시험법 (ME, 2007)과 Standard Method (APHA, 2005)에 준하여 수행하였다. 부유물질은 시료 1,000 mL를 취하여 유리섬유여지법으로, 전질소 (T-N)는 수질시료 500 mL를 취하여 각각 환원증류-킬달법과 중화적정법으로 분석하였다. 총인산 (T-P)은 수질시료 500 mL를 취하여 50 mL로 농축한 다음 Ascorbic acid reduction법에 기준하여 분석하였다. 전칼리 (T-K)는 No.2 여지로 여과 후 원자방출분광광도계 (ICP-OES, GBC)를 이용하여 분석하였다.

Results and Discussion

범용토양손실공식 (USLE)은 미국 농경지에서의 토양손실 예측을 위해 경험적 방법에 의해 개발되었으며, Wischmeier et al. (1971)에 의해 건설현장에 확대 적용되었다. 이 공식은 유역의 기후 (강우), 토양, 토지형태, 토지이용 등의 변수를 이용하여 그 대상유역에서의 토양손실량을 추정한다. 또한 USLE공식은 장기간에 걸친 연평균 토양손실량을 추정하기 위한 모형으로서 단기간 예측에서 오차가 커질 수 있는 특성을 가지고 있으며, 경사진 소유역의 토양침식량 추정에 합리적인 방법으로 알려져 있다.

토양유실에 영향을 미치는 두가지 중요한 물리적 특성은 투수능력과 토양입자의 구조적인 안정성이다. 투수능력은 입자의 구조적인 안정성에 가장 영향을 받으며, 유기물 함량, 토양조직, 점토광물의 함량과 종류, 토양의 깊이, 지표면의 기복 등도 투수능력에 영향을 미친다. 본 연구대상지역에서의 USLE 수식인자를 살펴보면 (Table 3), 경사인자, 식생피복인자, 토양보전관리인자는 지역간 차이가 없었으며, 다만 토양침식성 인자 (K)에서 익산 시험포장이 수원 시험포장보다 높았으나 일반농경지 토양에서 K값의 범위는 0.1~0.7 MT hr MJ⁻¹ mm⁻¹인 점을 고려할 때 두 지역 간의 잠재적인 토양유실 가능성은 유사할 것으로 판단되었다.

강우자료는 시험포장 인근에 위치한 수원기상대와 군산기상대의 5월에서 10월까지 6개월에 기상자료를 이용하였다. 그리고 논 토양 유실에 영향을 미치는 강우량을 더 세부적으로 조사하기 위하여 시간별 강우량을 조사하였다. 강우인자는 1회 강우가 12.7 mm 이상 연속된 강우를 대상으로 하였으며 연속강우 기강 중 무강우 시간이 6시간 이상일 경우는 1회 강우로 계산하였다.

조사된 2개 지역의 강우량 및 강우강도를 요약하면 Table

Table 3. USLE (Universal Soil Loss Equation) factors of Suwon and Iksan paddy field.

District	K fator MT hr MJ ⁻¹ mm ⁻¹	LS factor	C fator	P factor
Suwon City	0.03	0.03	0.06	1.0
Iksan city	0.04	0.03	0.06	1.0

* An Abbreviation : K= soil erodibility factor, LS= slope length and steepness factor, C= cover management factor, P= support practice factor

Table 4. Monthly rainfall distribution and typhoon events during rice growing season in Suwon and Iksan districts from 2012 to 2014.

Districts	Rainfall				EI ₃₀				Typhoon event		
	2012	2013	2014	Ave.	2012	2013	2014	Ave.	2012	2013	2014
	mm				MJ mm ha ⁻¹ yr ⁻¹ hr ⁻¹				number		
Suwon city	1,455	951	822	1,076	8,434	2,742	2,657	4,611	5	0	0
Iksan city	1,083	1,001	844	976	2,795	3,522	3,381	3,233	5	0	0

* Total rainfall > 12.7 mm

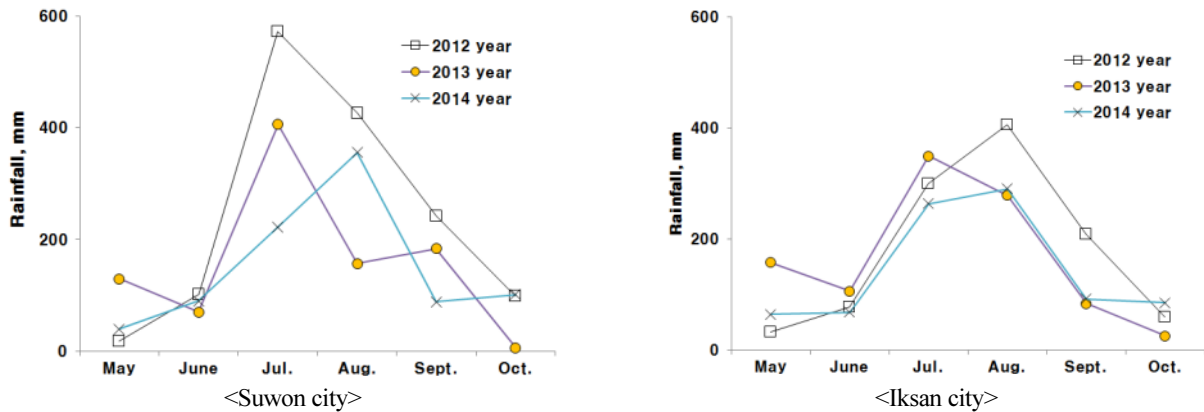


Fig. 2. Monthly rainfall distribution during rice growing season in Suwon and Iksan districts in 2012 to 2014.

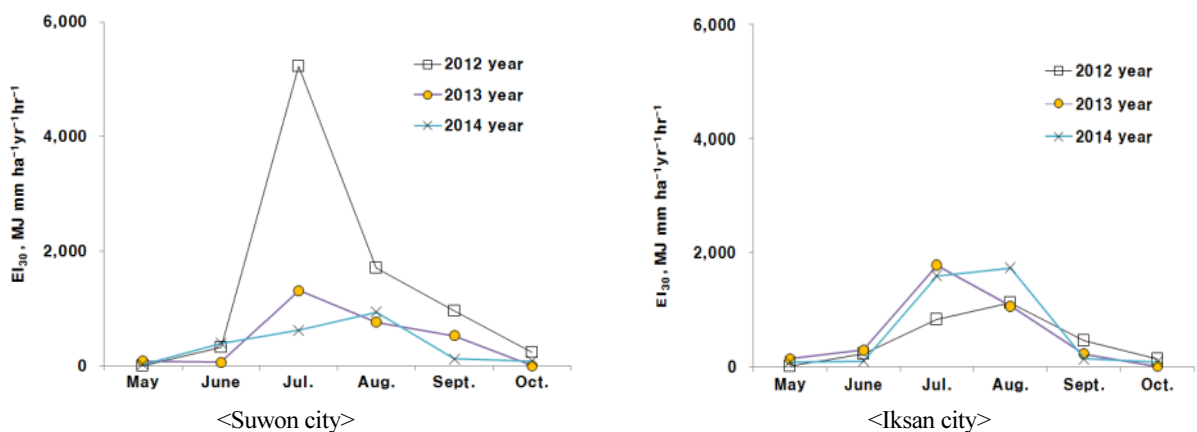


Fig. 3. Monthly EI30 distribution during rice growing season in Suwon and Iksan districts from 2012 to 2014.

4와 Fig. 2과 Fig. 3와 같았다. 2012년에서 2014년의 조사기간 중 2개 지역의 강우량은 평균 1,026 mm로 951~1455 mm 범위에 있었고, 강우인자 (EI₃₀)는 평균 3,922 MJ mm ha⁻¹yr⁻¹hr⁻¹로 2,657~8,434 MJ mm ha⁻¹yr⁻¹hr⁻¹ 범위에 있었으며, 강우사상별 최대 강우강도 (EI₃₀)는 7월에 높았다.

지역별 평균 (2012~2014년) 강우량은 수원이 1,076 mm이고 익산이 976 mm으로 수원이 약간 많았으며 수원과 익산 모두 7~8월에 강우량이 많았다. 연도별로는 2개 지역 모두에서 2012년 > 2013년 > 2014년의 순으로 강우량과 강우인자가 높았다.

Table 5. Runoff and soil loss from Suwon and Iksan paddy field during rice growth season from 2012 to 2014.

District	Runoff				Soil loss			
	2012	2013	2014	Ave.	2012	2013	2014	Ave.
	----- m ³ ha ⁻¹ yr ⁻¹ -----				----- Mg ha ⁻¹ yr ⁻¹ -----			
Suwon City	5,301	3,030	1,895	2,508	0.383	0.161	0.046	0.197
Iksan City	4,583	3,811	1,732	3,375	0.880	0.404	0.115	0.466
Ave.	4,942				0.632			

Table 6. Nutrient exports from Suwon and Iksan paddy field during rice growth season from 2012 to 2014.

District	T-N				T-P				T-K			
	2012	2013	2014	Ave.	2012	2013	2014	Ave.	2012	2013	2014	Ave.
	----- kg ha ⁻¹ yr ⁻¹ -----				----- kg ha ⁻¹ yr ⁻¹ -----				----- kg ha ⁻¹ yr ⁻¹ -----			
Suwon City	5.57	5.65	3.79	5.00	0.60	0.68	0.60	0.63	14.4	6.4	3.96	8.25
Iksan City	8.01	11.1	7.63	8.91	1.23	3.55	0.85	1.88	27.5	17.2	5.37	16.69

지역별 연간 강우량은 2012년에 수원 1,455 mm와 익산 1,083 mm로 월별 최대 강우강도 (EI₃₀)는 수원 5,220 MJ mm ha⁻¹yr⁻¹hr⁻¹ (7월)과 익산 1,119 MJ mm ha⁻¹yr⁻¹hr⁻¹ (8월)이었으며, 2013년에는 수원 821 mm (2012년, 1,455 mm), 익산 843mm (2012년, 1,083 mm)로, 일별 최대 강우강도(EI₃₀)는 수원 45 MJ mm ha⁻¹yr⁻¹hr⁻¹ (2013. 8. 10), 익산 55 MJ mm ha⁻¹yr⁻¹hr⁻¹ (2013. 07. 31)이었으며, 2014년에는 수원 795 mm, 익산 779 mm로, 강우사상별 최대 강우강도 (EI₃₀)는 수원은 8월, 익산은 7~8월에 높았다. 2012~2014년 태풍분석보고서 (기상청)에 따르면 연구기간 중 태풍의 발생수와 태풍명은 2012년 7월 중순에서 9월 중순까지 5개로 카눈, 담레이, 덴빈, 볼라벤, 산바이였으며, 2013년과 2014년에는 시험지역에 영향을 준 태풍은 없었다.

연구기간 동안 (2012~2014년) 조사된 2개 지역의 물 유출량과 토양유실량을 요약하면 Table 5와 같다. 3년간 물 유출량은 평균 2,942 m³ ha⁻¹yr⁻¹으로 2,657~5,301 m³ ha⁻¹yr⁻¹ 범위에 있었고, 유출율은 평균 36%로 나타났다. 지역 및 연도별 평균 물 유출량은 수원이 3,409 m³ ha⁻¹yr⁻¹이고 익산이 3,375 m³ ha⁻¹yr⁻¹로 수원이 약간 많았으며 수원과 익산 모두 '12년에 가장 많았다. 지역별 물 유출량은 2012년에 수원 5,301 m³ ha⁻¹yr⁻¹와 익산 4,583 m³ ha⁻¹yr⁻¹이었으며 지역별 전체 강우량에 대한 물 유출율은 수원 36.4%와 익산 42.4%이었고 전체적인 논물 유출율은 평균 39.4%이었다. 2013년의 물 유출량은 수원 3,030 ton/ha, 익산 3,811 ton/ha이었으며, 지역별 전체 강우량에 대한 물 유출율은 수원 36%, 익산 42%이었다. 2014년도에 물 유출량은 수원 2,081 m³ ha⁻¹yr⁻¹, 익산 1,732 m³ ha⁻¹yr⁻¹이었으며, 지역별 전체 강우량에 대한 물 유출율은 수원 35%, 익산 22%이었다.

농촌지역의 경우 유출률은 0.02~0.35의 범위로 나타났으며 (Lee et al., 2008), 평지밭의 경우 7회에 걸쳐 유출률

은 0.18, 고랭지 밭의 경우 0.30으로 나타났다 (Choi et al., 2009). Song et al. (2012)은 경안천 상류지역에 위치한 산림과 논으로 구성된 소유역을 대상으로 9개 강우사상에 대한 강우유출 조사 결과 논에서 물 유출을 평균 22.4%로 5.8~41.1%범위라고 하였으며, Choi et al. (2012)은 우분 퇴비를 사용한 논에서의 물 유출율은 39%로 보고하였다.

논토양에서 물유출에 따른 지역별 토양 유실량을 2012년부터 2014년까지 분석한 결과는 Table 6과 같았다. 3년간 2개 지역의 토양 유실량은 평균 0.331 Mg ha⁻¹yr⁻¹으로 0.046~0.880 Mg ha⁻¹yr⁻¹의 범위이었으며, 지역별로는 수원이 0.197 Mg ha⁻¹yr⁻¹이고 익산이 0.466 Mg ha⁻¹yr⁻¹으로, 수원에 비해 익산이 많았으며 수원과 익산 모두 2012년도에 가장 많았다. 연도별 토양유실량은 2012년에 수원 0.384 Mg ha⁻¹yr⁻¹와 익산 0.880 Mg ha⁻¹yr⁻¹으로 평균 논토양 유실량은 0.632 Mg ha⁻¹yr⁻¹이었다. 2013년의 토양 유실량은 수원 0.303 Mg ha⁻¹yr⁻¹, 익산 0.381 Mg ha⁻¹yr⁻¹으로 평균 0.342 Mg ha⁻¹yr⁻¹이었다. 2014년도에 토양 유실량은 수원 0.046 Mg ha⁻¹yr⁻¹, 익산 0.115 Mg ha⁻¹yr⁻¹으로 평균 0.081 Mg ha⁻¹yr⁻¹이었다.

토양 유실량에 있어서 Kim et al. (2013)은 영농기간 동안 강우사상 시 논 배출수와 저류지 평가에서 0.095 Mg ha⁻¹yr⁻¹이라 하였고, Choi et al. (2012)은 2011년 우분 퇴비를 사용한 논에서의 0.124 Mg ha⁻¹yr⁻¹로 보고하였으며, Lee et al. (2011)은 영산강 수계 하야지구의 논에서의 SS 유출 특성 연구에서 평균 0.301 Mg ha⁻¹yr⁻¹로 164~456 Mg ha⁻¹yr⁻¹ 범위라고 발표하였다. 또한, Chen et al. (2012)은 연평균 강우량이 2,000 mm를 상회하는 대만 아열대 단구지 논토양에서의 토양유실량은 0.770 Mg ha⁻¹yr⁻¹로 보고하였다.

논토양에서 물유출에 따른 지역별 양분 유출량을 2012년부터 2014년까지 분석한 결과는 Table 6과 같았다. 조사지

역의 시험기간 중 양분 유출량은 평균 T-N $7.0 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 으로 3.8~8.0 범위이었으며, T-P $1.26 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 으로 0.6~3.6 범위이었으며, T-K $16.6 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 으로 5.4~27.5 범위이었다. 지역별로는 수원이 각각 5.0, 0.6 및 $8.3 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 이었고 익산의 경우 각각 8.9, 1.9 및 $16.7 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 이었으며, 조사된 T-N, T-P 및 T-K 모두에서 수원 지역에 비해 익산지역에서 많았다. 년도별 양분유출량을 살펴보면, 2012년 질소와 인 유출량은 수원의 경우 각각 5.6과 $0.6 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 이었고 익산의 경우 8.0과 $1.2 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 로 평균 질소와 인 유출량은 각각 6.79와 $0.92 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 이었다. 2013년 질소, 인과 칼륨의 유출량은 수원이 각각 5.65과 0.68, 6.4 kg/ha 이었고 익산의 경우 각각 11.1, 3.55, $17.2 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 로 평균 질소, 인과 칼륨의 유출량은 각각 8.38, 2.12와 $11.8 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 이었다. 2014년 질소, 인과 칼륨의 유출량은 수원이 각각 3.8과 0.6, $0.4 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 이었고 익산의 경우 각각 7.6, 0.9, $5.4 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 로 평균 질소, 인과 칼륨의 유출량은 각각 5.7, 0.8와 $4.7 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 이었다.

Choi et al. (2011)은 2011년 우분 퇴비를 사용한 논에서의 T-N $15.7 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$, T-P $0.4 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 이 유출되었으며, 강원 춘천지역 비담수 논토양에서 T-N $36.9 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}\text{kg/ha}$, T-P $2.9 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 로서 관행 논토양 대비 15.8~44.1%의 오염물질 저감 효과를 보였다. Kwun and Yoo (1989)가 경기 화성지역에서 벼 재배기간 동안 영양물질 유출을 조사한 결과에서 T-N $12.4 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$, T-P $2.2 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 가 유출되었고, Yoon et al. (2012)은 전북 남원지역의 광역 논에서 영농기간 동안 유출수에 의한 영양물질의 유출량은 T-N $54.7\sim 57.8 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$, T-P $2.0\sim 2.3 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 이라고 보고하였다.

Kunimatsu (1986)은 1983년 일본에서 연구되었던 농경지에서 영양물질 이동에 대한 연구결과와 일본 농립 통계의 자료를 인용하여 논에서 영양물질의 수지를 계산한 결과 지표유출을 통해 T-N $14.3 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 그리고 T-P $0.5 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 가 손실되었다.

Takeda et al. (1991)은 비와호 수역에서 11.6 ha의 논을 대상으로 영양물질의 유출량을 조사한 결과, 전질소 $45.7 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 그리고 총인 $8.7 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 로 나타났으며, 그 중 비영농기간 (227일) 동안에 각각 T-N 52%, T-P 14%가 유출된 것으로 보고하였다.

Kim and Cho (1995)가 경기도 화성군 반월면 둔대리를 대상으로 벼 재배 기간 동안 농업배수에 의한 영양물질의 유출량을 조사한 결과, T-N $15.0 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$, T-P $0.6 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 이었으며, 유실률은 T-N 5.32%, T-P 0.01%로 나타났다. 또한 Kwon and Yoo (1989)가 경기도 화성군 정남면 패량리 농경지 29.3 ha를 대상으로 벼 재배기간 동안 영양물질의 유출량을 조사한 결과, T-N는 $12.37 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 그

리고 T-P은 $2.16 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 로 나타났다.

Yoon et al. (2002)은 영농기간 동안 유출수에 의한 영양물질의 유출량은 T-N의 경우 $54.7\sim 57.8 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$, T-P은 영농기간 $2.0\sim 2.3 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 로 나타났으며, 시기별로 6월에 유출량이 가장 높았는데 이는 사용된 비료성분이 유출수에 용해되었기 때문으로 판단된다. 유출량을 시비된 화학비료량을 기준으로 유실률을 계산한 결과, T-N의 경우 시비량의 약 39~43%, T-P은 14.5~17%가 유출과정을 통하여 유실된 것으로 나타났다.

한편, 아열대 지역의 논토양에서 폭우시 유출수 중의 최대 부유물질 농도는 녹비재배 $3,400 \text{ mg L}^{-1}$ > 휴경 $1,700 \text{ mg L}^{-1}$ > 벼 재배 500 mg L^{-1} 으로 천수 및 휴경 논에서 무관개시 폭우에 의한 토양표면의 빗물타격으로 토양유실이 나타나기 때문에 (Chen et al., 2002) 논토양 보전을 위해서는 휴경시 폭우에 의한 토양유실 방지를 위하여 물꼬관리가 필요한 것으로 판단되었다.

괴불이란 조류로 인하여 논의 표토가 얇게 들고 일어나 물위에 뜨는 현상을 말하며 이러한 현상은 논토양 표면에 조류의 대량 번식으로 생성된 점액물질이 토양입자를 서로 엉기게 한 후 조류의 광합성으로 생긴 산소가 기포를 만들고, 기포의 부력에 의해서 표토가 물위에 뜨게 된다. 논에 발생하는 조류는 남조류와 녹조류가 있고, 남조류는 질소비료의 증시에 따라 증가하였고 녹조류는 인산비료의 증시에 따라 증가하는 것으로 알려져 있다 (Lee et al., 1992). 또한, 관개수 높이가 낮고 수온이 상승하면 물 순환이 충분치 않아 남조류인 *Oscillatoria*가 대량 번식하는 것으로 보고된 자 있다 (Myong et al., 2010)

Fig. 4와 같이 전북 익산의 시험포장에서는 이앙 후인 2012년 5월 29일부터 2012년 7월 12일 (강우량 58 mm)까지 익산 논토양에 괴불현상이 발생한 바 있었다. 수원보다 익산시험포장의 인산함량이 낮음에도 불구하고 괴불 현상이 나타난 것은 물을 알게 대어 수온이 높은 상태에서 높은 유



Fig. 4. Soil flake dispersion in the Iksan rice field at right after the rice-planting (31 May 2012).

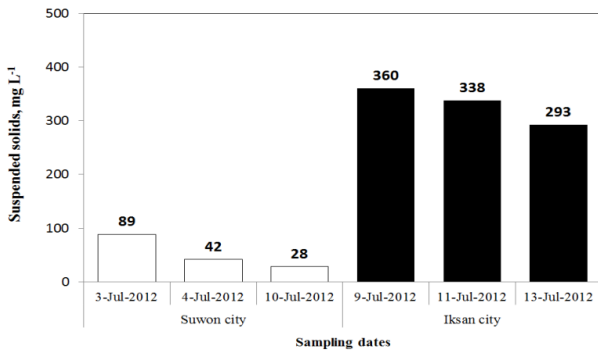


Fig. 5. Concentration of suspended solids export between from Suwon paddy field and Iksan one during late May and early July 2012.

기물의 영향으로 생각되었다.

익산 지역의 토양의 인산전북 익산 포장에서 괴불 발생 기간인 2012년 7월 12일 이전까지 수원과 익산포장에서 강우 후 채취한 유출수의 부유물질 농도를 비교한 결과, 수원 포장의 부유물질농도는 평균 53 mg L⁻¹이었고, 익산포장 부유물질농도는 평균 330 mg L⁻¹으로, 수원보다 6.2배 높게 나타났다 (Fig. 5).

따라서 2012년도에 익산 시험포장의 물유출량이 4,583 MT ha⁻¹yr⁻¹으로, 수원 시험포장의 물유출량 5,301 MT ha⁻¹yr⁻¹보다 적음에도 불구하고 토양유실량은 수원의 0.383 MT ha⁻¹yr⁻¹보다 2배 이상 많은 0.880 MT ha⁻¹yr⁻¹인 것은 토양유실이 강우량 및 강우강도 증가에 따른 물 유출과 비례적으로 증가하는 경향을 고려할 때, 논에서 괴불현상 발생으로 논토양 표토가 부유된 상태에서 강우강도가 커져 토양유실량이 증가한 것으로 판단되었다.

Conclusion

관개논에서 영농기간의 토양유실량 및 양분 유출량을 지역별로 평가하고자 2012년부터 2011년까지 수원과 익산 포장에 무저 집수구를 설치하여 토양 유실 및 물 유출량을 조사하였다.

강우량은 평균 1,026 mm, 강우인자 (EI₃₀)는 평균 3,922 mm ha⁻¹yr⁻¹hr⁻¹이었으며, 강우사상별 최대 강우강도 (EI₃₀)는 7월에 높았다. 물 유출량은 평균 2,942 MT ha⁻¹yr⁻¹으로 수원 2,508 MT ha⁻¹yr⁻¹, 익산 3,375 MT ha⁻¹yr⁻¹으로 강우량 대비 36%이었다. 질소, 인, 칼륨의 평균 유출량은 각각 T-N 6.95, T-P 1.26 T-K 16.60 kg ha⁻¹yr⁻¹이었고, 지역별로 수원이 각각 5.0과 0.6, 8.3 kg ha⁻¹yr⁻¹이었고 익산의 경우 각각 8.9, 1.9, 16.7 kg ha⁻¹yr⁻¹이었다. 한국의 관개 논에서 벼 재배시 토양유실량은 평균 0.33 MT ha⁻¹yr⁻¹ (최소 0.05~최대 0.88)으로 년도 및 지역별로 강우량과 강도에 따라 결과가 상이하게 나타났으며, 특히 2012년에 익산지역

의 토양유실량이 수원이나 다른 년도보다 많았던 것은 괴불 발생에 기인하는 것으로 판단되었다.

References

- APHA, AWWA, and WEF. 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater, 21th ed., American Public Health Association, Washington, DC.
- Chen, S.K., C.W. Liu, and Y.R. Chen. 2012. Assessing soil erosion in a terraced paddy field using experimental measurements and universal soil loss equation. *Catena* 95:131-141.
- Choi, J.K., J.G. Son, K.S. Yoon, H.J. Lee, and Y.J. Kim. 2012. Runoff Characteristics in Paddy Field using Cow Manure Compost Fertilizer. *J. Korean Soc. Agri. Engi.* 54:29-36.
- Choi, Y.H., C.H. Won, J.Y. Seo, M.H. Shin, H.J. Yang, K.J. Lim, and J.D. Choi. 2009. Analysis and Comparison about NPS of Plane Field and Alpine Field. *J. Korean Soc. Water Enviro.* 25:682-688.
- Kim, B.Y., and J.K. Cho. 1995. Nutrient effluence by the outflowing water from the paddy field during rice growing season. *Korean National Committee on Irrigation and Drainage* 2:150-156.
- Kim, C.S. 1982. A study on the rainfall runoff from paddy fields in the small watershed during Irrigation period. *Magaz. the Korean Soc. Agri. Engin.* 24:99-108.
- Kim, J.S., S.Y. Oh, and K.S. Kim. 1999. Characteristics of Concentration and Load of Nitrogen and Phosphorous in Paddy Field Areas. *J. Korean Soc. Agri. Engi.* 41:47-56.
- Kim, M.K., S.I. Kwon, G.B. Jung, H.S. Hong, M.J. Chae, S.G. Yun, and K.H. So. 2013. Chemical properties and nutrient loadings of rainwater during farming season. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 46:386-390.
- Kunimatsu, T., 1986. Management and runoff of nutrients from farming land. *Water Management Technol.*, 27:713-720.
- Kwon, S.K. and M.H. Yoo. 1989. Establish prevention of eutrophication and environmental pollution of reservoirs (II). *Korean Rural Community and Agricultural Corporation.*
- Lee, B.S., Y.J. Jung, M.J. Park, and K.I. Gil. 2008. A Study on the Discharge Characteristics of Non-point Pollutant Source in the Agricultural Area of the Kyongan Watershed. *J. Korean Soc. Water Enviro.* 24:169-173.
- Lee, H.K., J.E. Park, G.H. Ryu, J.O. Lee, and Y.S. Park. 1992. Fresh water algae occurred in paddy rice fields(5): Fertilizer response and chemical control. *Kor. Soc. weed Sci.* 12:158-165.
- Lee, K.S., J.W. Jung, D.H. Choi, K.S. Yoon, W.J. Choi, S.M. Choi, S.S. Lim, H.N. Park, and B.J. Lim. 2011. Characteristics of suspended solids export from paddy fields. *J. Korean Soc. Water Enviro.* 27:868-876.
- Merz, R., Bloshp, G, and parajka. J. 2006. Spatio-temporal

- variability of event runoff coefficients. *Journal of Hydrology*. 321:591-604.
- Ministry of Environment, 2006. Master Plan for Water Environment Management (2006-2015). GPVP1200710956. Report of ME.
- Ministry of Environment. 2007. Standard Methods for Examination of Water quality. Gwacheon-si, Republic of Korea.
- Myong, H.B., J.J. Park, G.W. Jo, and E. Yang, J. Jeong and Y.G. Cho. 2010. Assessment on reservoir water depth for intake of optimum water quality. Report of WQRI, Gwangju 19:28-45.
- Shin, D.S. and S.K. Kwon. 1990. The Concentration and Input/Output of Nitrogen and Phosphorus in Paddy Fields. *Korean J. Environ. Agri.* 9:133-141.
- Song, I.H., M.S. Kang, S.H. Hwang, and J.H. Song. 2012. Characteristics and EMCs of NPS Pollutants Runoff from a Forest-Paddy Composite Watershed. *J. Korean Soc. Agri. Engi.* 54:9-17.
- Takeda I., T. Kunimatsu, S. Kobayshi, and T. Maruyama. 1991. Contaminant balance of a paddy field area and its loading in the water system-studies on pollution loadings from a paddy field area, *The Japanese Soc. Irrig. Drain. Reclam. Eng.*, 153:63-72.
- Wischmeier, W.H., C.B. Johnson, and B.V. Cross. 1971, A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *J. Soil Water Conserv.* 26:189-193.
- Yoon, K.S., K.H. Han, J.Y. Cho, C.H. Choi, J.G. Son, and J.K. Choi. 2002. Water and Nutrient Balance of Paddy Field Irrigated from a Pumping Station during Cropping Period. *J. Kor. Soc. Rural Plan.* 8:3-14.
- Yun, J.I. 2010. Agroclimatic maps augmented by a GIS technology. *Kor. J. Agr. Fore. Meteorol.* 12:63-73.