

유기물 시용에 의한 벼논에서의 양분 유출경감

노기안 · 김필주 · 강기경 · 안윤수 · 윤성호
농업과학기술원 농업생태과

Reduction of Nutrient Infiltration by Supplement of Organic Matter in Paddy Soil

Kee-An Roh, Pil-Joo Kim, Kee-Kyung Kang, Yoon-Soo Ahn, Seong-Ho Yun (Division of Agricultural Ecology National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon 441-707, Korea)

ABSTRACT : To establish the best rice cultivating system in the aspects of environment-loving agriculture, the amounts and patterns of nitrogen leached in the paddy soil were investigated with 7 treatments; Recommendation(R), Farmer's usual practice(FUP), Straw compost+chemical fertilizers reduced(SCF), Fresh straw+recommendation(FSC), Fresh cow manure(FCM), Cow manure compost(CMC), and no fertilization as Control(C). And SCF, FCM and CMC were applied with same amounts of total nitrogen to R. The infiltrated water samples were collected in ceramic porous cups which were buried at 60cm depth from the top. Concentrations of nitrate-N in irrigated water were 1.3mg l⁻¹ on rice transplanting season when nutrients began to elute from paddy soil, and 0.4mg l⁻¹ after breaking off irrigation. But it was 4-6mg l⁻¹ in rice growing period. The maximum concentration of nitrate-N in leachate was not more than 7mg l⁻¹ during rice cultivation. The amounts of nitrogen leached in R, FUP, SCF, FSR, FCM, CMC and C were 59, 63, 25, 41, 24, 27, 17kg ha⁻¹y⁻¹ respectively.

Nitrogen leaching was decreased to about 30% by supplement of fresh rice straw(FSC) to R. Furthermore, it was possible to reduce to over 50% of nitrogen leaching by reducing chemical fertilizer application(CF), or by substituting of chemical fertilizers with fresh cow manure(FCM) or cow manure compost(CMC). In added organic fertilizer treatments, the amounts of infiltrated nitrogen were less 13-46kg ha⁻¹y⁻¹ than that of input by irrigation.

This experiment showed that nutrients leaching was minimized by substitution of chemical fertilizers with organic fertilizer or by application of straw with chemical fertilizers in rice paddy soil and rice cultivation with suitable fertilizer management can work as a purifier rather than contaminator of water.

key words : groundwater, nitrate-N, sustainable agriculture, manure, infiltration

서론

국내외적으로 환경오염에 대한 관심이 높아지면서 농경지로부터 비료성분 유출에 대한 논란이 계속되고 있으며, 영농활동 중 농경지로부터 유출되는 비료성분이 하천의 수질을 악화시키는 주요 오염원의 하나로 인식되어 왔다. 그러나 현재까지 작물 재배기간 중 농경지로부터 유출되는 비료성분에 대한 구체적인 조사는 미비한 상태이며^{1,2)} 이에 대한 구체적인 조사 및 대책수립이 절실히 필요한 상황이다. 농경지로부터 비료성분의 주요 유출경로는 침출수에 의한 용탈(Leaching), 강우 및 관수시 표면 유거수에 의한 세탈(Washing), 집중 강우시 토양침식(Erosion)을 통한 유출 등으로 요약할 수 있다.³⁾ 우리 나라는 비교적 수량이 풍부하

여 하천주변은 벼농사를 주로 하고 있으며, 이상의 유출경로 중 논두렁을 경계로 평탄지를 유지하고 있는 논으로부터 비료성분의 주요 유출경로는 세탈이나 토양침식을 통한 유출²⁾보다는 상시 담수에 의한 침출수의 유출에 따른 양분 용탈 가능성이 가장 높을 것으로 예측된다. 농경지로부터 비료성분의 용탈량은 시비방법, 시비시기, 벼의 생육시기, 토양의 물리적 특성 등에 의해 큰 차이를 보인다.¹⁾ 현대농업은 높은 생산성과 함께 주변환경에 대한 부하량이 가장 적은 환경친화적 농법을 요구하고 있다. 따라서 이상의 두 가지 목적을 동시에 이룰 수 있는 가장 합리적인 영농방법이 필요하며 이를 위한 종합적 연구가 절실히 요구된다.

본 연구는 논을 대상으로 토양 관리방법에 따른 오염물질 유출양상을 종합적으로 비교 검토하여 현재 국가적인

Table 1. Characteristics of soil profile.

Horizon	Depth	Soil classification	Ksat* (cm hr ⁻¹)
Surface (Ap)	14~16cm	Loam	0.50
Subsurface(A2)	~60cm below	Loamy sand	16.2

Note)*: Saturated hydraulic conductivity

논쟁거리중의 하나인 농지로부터의 비료성분의 유출을 줄이고 환경친화적 영농법 개발을 위한 기초자료를 얻고자 실시하였다.

재료 및 방법

본 시험은 1998년 한강 상수원 보호지역인 경기도 양평군 양서면 중동리의 보통논인 농가포장에서 실시하였다.

공시포장의 토양특성

공시포장의 토양단면 특성

공시포장은 고천통으로서 표토는 점토, 미사 및 모래함량이 각각 22.6, 31.6, 45.8%의 양토인 반면 심토는 점토, 미사 및 모래함량이 12.7, 5.9, 81.4%인 양질사토의 특성을 가지고 있었다. 각 층의 투수력을 일정수두법으로 측정할 수리전도도는 0.50cm hr⁻¹, 16.2 cm hr⁻¹로서(표 1) 층간의 투수속도 차이가 커 토양내의 수분과 양분의 이동속도는 수리전도도가 상대적으로 낮은 표토에 의해 지배를 받을 것으로 생각되었다.⁴⁾

공시포장 토양의 화학적 특성

공시토양의 화학적 특성(표 2)은 유기물과 유효 인산함량은 35mg kg⁻¹, 147mg kg⁻¹로서 비교적 높은 편이었으나, 규산함량은 53mg kg⁻¹로서 낮았다

처리내용 및 포장설치

처리내용은 표준시비구(Recommendation, R), 현지농가에서 사용하고 있는 관행시비구(Famer's usual practice, FUP), 볏짚퇴비+화학비료감비구(Straw compost+Chemical fertilizers reduced, SCF), 생산된 볏짚을 논으로 환원시킨 볏짚환원+표준시비구(Fresh straw+Recommedation, FSC), 축산농가에서 배출되는 가축분을 효율적으로 이용하고 환경에 대한 부하를 줄이기 위하여 생산된 우분을 바로 투입한 우분처리구(Fresh cow manure, FCM), 발효시킨 우분을 사용한 우분퇴비구(Cow manure compost, CMC), 그리고 무비구(Control, C)의 7 처리를 하였다. 시비량은(표 3) 표준시비구는 N-P₂O₅-K₂O=110-70-80kg ha⁻¹, 현지농가 관행시비구는 N-P₂O₅-

Table 3. Methods of Fertilizer Application.

Treatment	Chemical amounts applied (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O, kg ha ⁻¹)	Note
R	110 - 70 - 80	Chem. Fertilizer
FUP	138 - 68 - 68	Chem. Fertilizer
SCF	110 - 70 - 80	Straw Compost(10Mg ha ⁻¹) + Chem. fertilizer reduced
FSC	151 - 97 - 128	Fresh Straw(600kg ha ⁻¹) + Recomendation
FCM	110 - 97 - 27	FCM(22,450kg ha ⁻¹)
CMC	110 - 121 - 78	CMC(9,920kg ha ⁻¹)
C	-	Non-application

R: recomendation, FUP: farmer's usual practice

SCF: straw compost + chem. fertilizer reduced

FSC: fresh straw + recomendation

FCM: fresh cow manure CMC: cow manure compost

C: non-application as control

K₂O=138-68-68kg ha⁻¹, 볏짚퇴비+화학비료감비구는 볏짚퇴비(10Mg ha⁻¹)와 이에 상당하는 비료의 성분량을 표준시비량에서 줄였으며, 볏짚환원+표준시비구는 표준시비량에 포장에서 생산된 볏짚을 환원하였고, 우분과 우분퇴비 시용구는 질소함량을 기준하여(110kg ha⁻¹) 투입량을 산정하였다. 분시방법으로 표준시비, 볏짚퇴비와 화학비료감비, 볏짚환원과 표준시비구의 질소는 50-25-25%, 인산은 전량기비, 칼리는 70-0-30%로 분시하였고, 우분과 우분퇴비구는 전량기비로 시용하였다. 농가관행 시비구는 기비로서 복합비료(21-17-17)를 400kg ha⁻¹, 분얼비로서 요소 117kg ha⁻¹ 시용하였다. 우분, 우분퇴비 그리고 볏짚퇴비는 질소의 손실을 최소화하기 위하여 경운 하루전에 기비로 시용하였고, 볏짚은 추수시 잘게 절단하여 환원하였으며, 각 처리재료의 특성은 표 4와 같다.

시험포장은 12m×12m(144m²) 규모로서 처리당 2반복으로 임의 배치하였으며, 각 처리구당 관개수량 조절시설과 계량기를 설치하여 관개수의 유입량을 측정하였으며, 관개수는 포장 인근에 위치한 관정수를 사용하였다.

재배관리

공시품종은 추청벼로 5월 20일 손 이앙을 하여 6월7일에 새끼거름, 7월 15일에 이삭거름을 주었으며, 시험 목적상 9월20일 물떼기까지 상시담수를 하여 10월 20일 수확하였다.

관개수, 침투수 조사 및 시료분석

벼 재배기간 중 관개수 유입량은 관개배관에 설치된 계량기로 측정하였으며, 침투수량은 Ring type infiltrometer

Table 2. Chemical properties of soil in the experimental plot.

pH (H ₂ O,1:5)	T-N (g kg ⁻¹)	OM (g kg ⁻¹)	Av. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	K	Ex. Cations (cmol ⁺ kg ⁻¹)		CEC (cmol ⁺ kg ⁻¹)	SiO ₂ (mg kg ⁻¹)
					Ca	Mg		
5.6	1.9	35	147	0.2	3.8	1.0	8.5	53

Table 4. Chemical properties of organic matters applied in each treatment.

Material	T-C (g kg ⁻¹)	T-N (kg ha ⁻¹)	P ₂ O ₅ (g kg ⁻¹)	K ₂ O (g kg ⁻¹)	C/N Ratio	Moisture content (g kg ⁻¹)
Fresh straw	424	6.8	4.6	8.0	62	-
Straw compost	380	15.5	5.8	9.4	25	756
FCM	412	22.3	19.7	15.4	18	780
CMC	364	25.8	28.3	18.3	14	569

* Fresh straw was applied based on dry weight

로써 측정^{5,6,7,8)}하였다. 침출수 시료는 포장내 60cm 깊이에 Suction porous ceramic cup(Model 1900, SOILMOISTURE EQ. CO.)을 처리구당 3반복으로 설치하여 채취하였다.

침출수중의 NO₃⁻-N, PO₄³⁻-P는 Auto Analyzer(ALPKEM의 Environflow 3500TM)로, NH₄⁺-N은 Indophenol-Blue법, K⁺ 농도는 ICP로써 분석하였으며, 토양분석은 농촌진흥청 토양화학분석법⁹⁾에 준하여 실시하였다.

결과 및 고찰

주요 기상변화

시험기간 동안(1998) 양평지역의 주요 기상변화는 그림 1과 같다. 평년에 비해 6월 초순과 중순 사이는 낮은 온도가 지속되었으며 이로 인해 벼의 초기생육이 부진하였다. 이에 반해 9월 이후는 평년에 비해 고온이 장기간 계속되었다. 조사기간 중 강우특성은 8월 초 한반도 전체에 걸쳐 집중호우가 있었으며, 양평지역에도 10일간 약 740mm의 강우가 집중되어 8월 7일에는 본 포장이 홍수로 침수되었다. 특히 수계와 인접한 무비구와 추천시비구에는 퇴적물이 다량 유입되어 후기 양분의 유출양상에 큰 영향을 주었다.

침투수율 변화

전체 포장의 대표지역 6곳에 설치된 Infiltrometer를 통해 조사한 평균 침투수율은 그림 2와 같다. 이양초기에는 경

운과 썩레질에 의한 토양구조의 교란으로 침투율이 높았으나(약 34mm day⁻¹) 시간이 경과함에 따라 크게 감소하여 이양 1주일 후 부터는 거의 안정 (약 15mm day⁻¹)되어 7월 이후에는 약 10mm day⁻¹로 유지되었다. 그러나 이것은 일반 식양토의 평균침투율 4-5mm day⁻¹ 보다 2배 이상 높은 것으로^{10,11,12)} 공시포장의 표층토가 모래함량이 높은 양토로 얇게 구성되어 있고 심층토는 양질사토로 수리저항을 유발할 수 없는 구조에서 기인되는 것으로 해석된다. 따라서 토양내 시용된 비료성분이 주변 수계로 유입될 가능성이 상당히 높을 것으로 예측되며, 이양후 벼 생육 초기에는 더욱 높을 것으로 생각된다.

관개수중 주요 이온의 농도 변화

그림 3은 관개수로 사용한 관정수의 질산태 질소(NO₃⁻-N)와 칼리(K⁺)의 농도변화를 나타낸 것으로 강우시는 농도가 감소하였다가 다시 증가하는 경향이 벼 생육 후반기까지 계속되었으며, 암모니아태질소(NH₄⁺-N)와 인산(PO₄³⁻-P)은 아주 미량으로 무시할만한 수준이었다. NO₃⁻-N은 인축이 다량으로 섭취할 경우 청색증¹³⁾을 유발할 수 있기 때문에 관심의 대상이 되고 있으며 우리나라 식용수 기준도 NO₃⁻-N 농도를 10mg l⁻¹이하로 정하고 있다. 관정수중 질산태 질소의 농도는 인근 농경지에 질소의 투입이 시작되는 이양기에는 1.3mg l⁻¹, 물떼기를 한 9월 중순 이후에는 0.4mg l⁻¹로 낮았으나, 벼 생육기에는 4~6mg l⁻¹의 상대적으로 높은 농

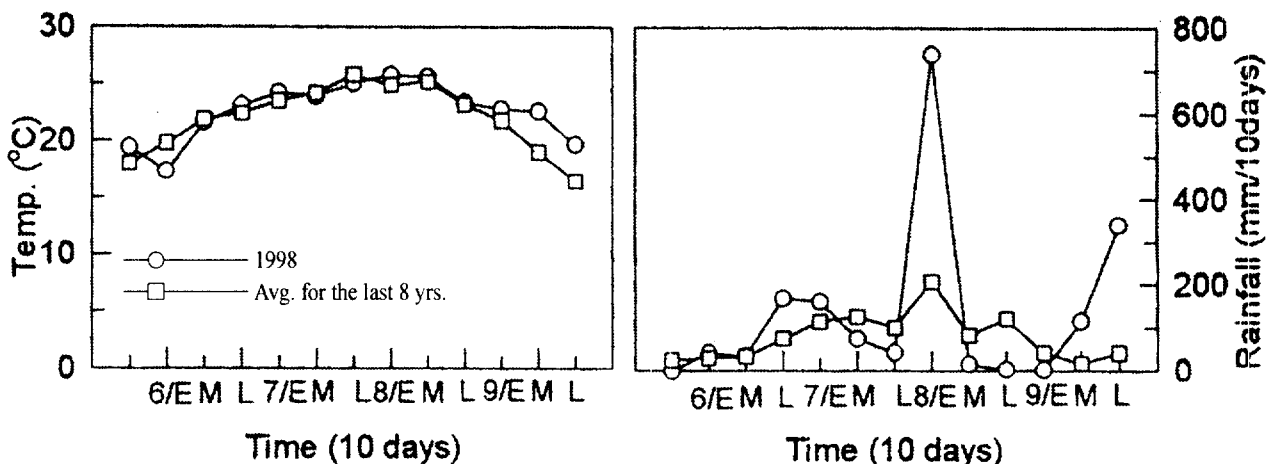


Fig. 1. Changes of weather condition in Yangpyeong, Korea during rice cultivation in 1998.

Note)E, M and L mean the 10 day period of 1~10, 11~20 and 21~the last day of each month, respectively.

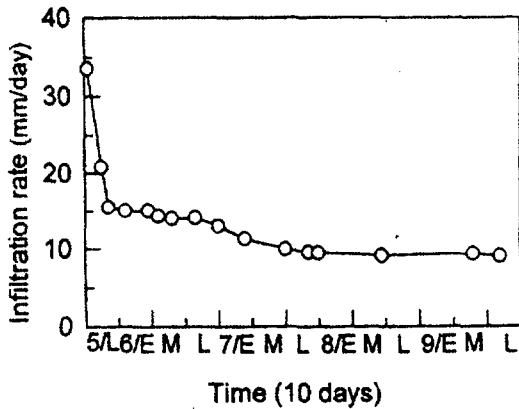


Fig. 2. Changes of infiltration rate during rice cultivation

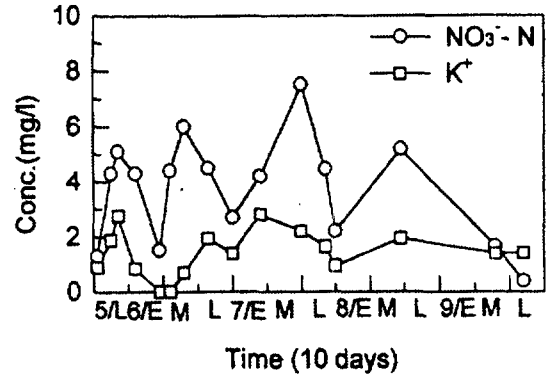


Fig. 3. Changes of ions concentration in irrigation water during rice cultivation

도를 유지하여 벼 재배기간 동안 주변 농경지에 투입한 질소가 지하수로 유입되고 있음을 간접적으로 알 수 있었다. 관정수에서 암모니아태질소가 거의 검출되지 않은 이유는 관정의 상부가 열린 상태에서 산소공급이 용이하고, 특히 공시포장 주변의 토양구조에 산화층이 크게 발달되어 있기 때문에 대부분의 무기태 질소가 이동중 질산태 질소로 전환되었기 때문으로 판단된다.^{14,15)} 관정수의 칼리 농도변화도 질산태질소의 농도변화와 비슷한 경향을 보였으며 2~3mg l⁻¹ 범위의 농도를 유지하였다. 인산(PO₄³⁻-P)은 자체가 토양과 강한 특이적 흡착반응을 하며^{16,17)} 산화층에서 철, 알루미늄 등과 반응, 불용화 되었기 때문에 거의 검출되지 않은 것으로 해석된다.^{18,19,20)}

논에서의 양분 용탈 특성

질소의 용탈 특성

벼 재배기간 동안 침출수를 통한 질소의 용탈은 질산태 질소(NO₃⁻-N), 암모니아태 질소 (NH₄⁺-N)로 나누어서 조사 하였다.

질산태 질소

토양내 질산태 질소의 물리적 이동은 크게 대류 (Convection), 확산(Diffusion), 분산(Dispersion)으로 구분되지만,^{21,22)} 논 토양에서 처럼 수분이동이 담수상태의 수압 (Hydraulic pressure)에 의해 지배를 받게 될 때 토양과 반응성이 약한 질산태 질소의 이동은 주로 대류에 의한 하향이동, 즉 수리분배와 수리전도도에 의해 지배받게 된다. 공시 토양은 심층토에 산화층이 깊고 폭넓게 발달된 조건으로서 NH₄⁺-N는 질산태 질소로 쉽게 전환되어 지하로 용탈될 것으로 생각된다.

그림 4는 벼 재배기간 동안 지하용탈수중 질산태 질소의 농도변화를 나타낸 것으로 이양후 가장 높았다가 생육 후반기로 갈수록 점차 낮아지는 경향이였다. 처리간 농도는 화학비료의 사용량이 가장 많은 농가관행구(FUP)가 가장 높았으나 최고 농도는 7.1mg l⁻¹로서 음용수의 질산태 질소 한계농도인 10mg l⁻¹보다 낮았다. 유기물과 화학비료를 함께 처리한 퇴비+화학비료 감비(SCF), 볏짚환원+표준시비구(FSC)의 질산태 질소 농도는 화학비료만 사용한 표준시비

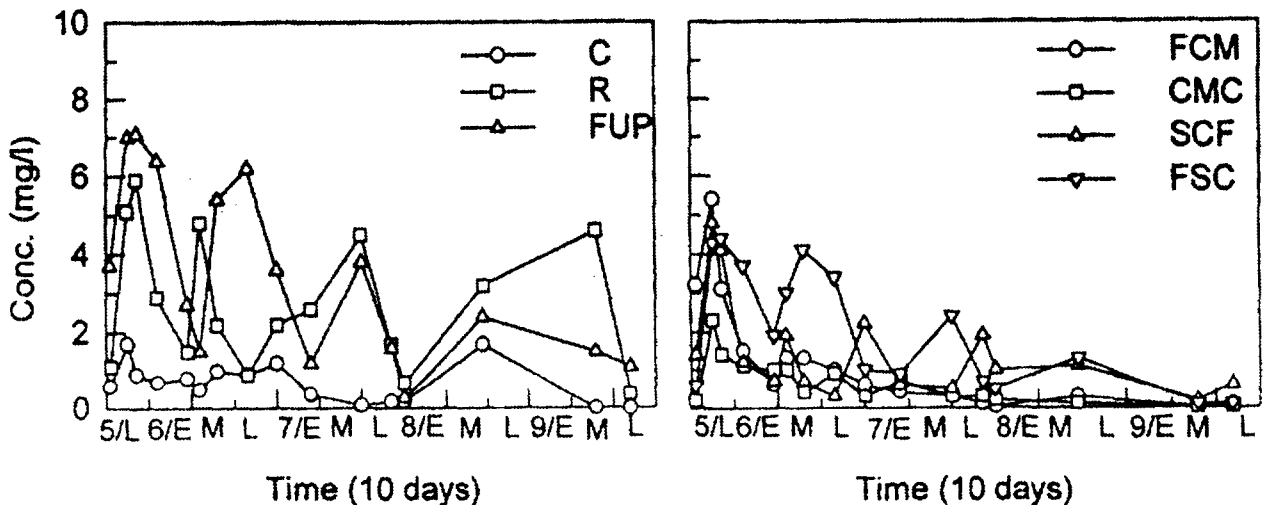


Fig. 4. Changes of NO₃⁻-N concentration in leachates on -60cm depth of rice paddy soil.

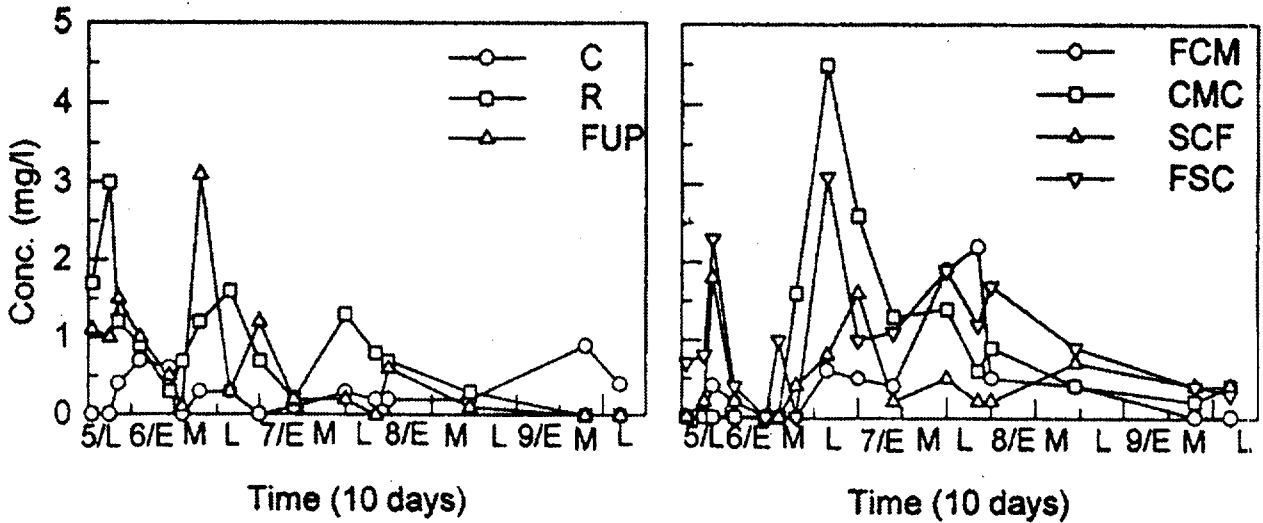


Fig. 5. Changes of NH_4^+-N concentration in leachates on -60cm depth of rice paddy soil.

(R), 농가관행 시비구(FUP)보다 낮아 화학비료와 함께 유기물을 첨가함으로써 지하 침출수중의 질산태질소 농도를 떨어뜨릴수 있었다. 또한 유기물만으로서 화학비료를 대체한 우분구(FCM)와 우분퇴비구(CMC)의 질산태 질소 농도는 화학비료만 사용한 처리보다 크게 낮았으며, 두 처리간에는 생육초기인 6월말까지는 우분구, 7월부터는 우분퇴비구의 농도가 높았다. 이것은 우분퇴비는 우분보다 유기태 질소의 비율이 높아 미생물에 의한 분해에 보다 많은 시간을 필요로 하기 때문으로 생각되며, 우분과 우분퇴비의 효과적인 사용을 위해서 벼의 생육기간 동안 질소요구도와 우분과 우분퇴비중의 질소용출에 관한 더 많은 연구가 요구된다.

벼의 생육후기인 8월 중순 이후 무비구, 추천시비구 그리고 농가관행구에서 질산태 질소농도가 급격하게 증가하였다. 이것은 8월초 집중호우로 인한 범람 퇴적물이 수계에 가까운 곳에 위치한 3 처리구에 집중적으로 유입되었으며 8월 중순 고온에 의한 신속한 분해 및 질산화로 인해 질산태 질소의 용탈이 증가하였으며 벼의 후반기 생육에도 영향을 끼친 것으로 생각된다. 그리고 벼 재배기간중 15회를 조사한 관정수중의 질산태질소 농도(그림3)는 농가관행구를 제외한 모든 처리구의 지하 용탈수중의 질산태질소 농도(그림4)보다 높아 주변 농가포장에서 비료를 과다하게 사용하고 있음을 간접적으로 확인할 수 있었다.

암모니아태질소

그림 5는 벼 재배기간 동안 침출수 중 암모니아태 질소의 농도변화를 나타낸 것으로 화학비료를 사용한 표준시비구와 농가관행 시비구에서 암모니아태 질소의 용출농도는 이양후 가장 높았으며, 가지저름과 이삭저름을 준 직후에는 다시 높아졌지만 점차적으로 감소하여 생육 후반기에는 1mg/l 이하의 낮은 농도를 유지하였다. 우리 나라 논토양

에서 시용된 요소의 가수분해율은 1주일동안 약 72% 정도 이지만²³⁾ 항온시험에서 처리된 요소는 7℃에서 1주일 내에 거의 가수분해되는 것으로 보고 되어있다.²⁴⁾ 따라서 토양에 시용된 요소의 가수분해 산물중 일부가 유출수와 함께 시비 초기에 용탈된 것으로 보인다. 이에 반해 유기물 시용구에서의 암모니아태 질소 용탈농도는 지온이 본격적으로 상승되는 6월 중순 이후부터 크게 증가하였다. 이것은 지온의 상승으로 미생물에 의한 유기물의 분해촉진과 질소의 무기화를 상승으로 암모니아태질소의 발생량이 증가하였기 때문으로 생각되며 최고농도는 4.5mg/l⁻¹였다.

인산의 용탈 특성

농지로부터 인산의 유출은 지하 용탈에 의해서는 거의 발생되지 않고, 대부분이 강우나 바람 등에 의한 토양유실과 함께 발생하는 것으로 알려져 있다. 특히 사면경사가 급하거나 강우강도가 높은 지역의 나지 토양에서 토사유실에 의한 인산의 유출이 하천의 부영양화에 직접적으로 관여하는 것으로 알려져 있다.^{25,26)} 본 공시포장에서도 벼 재배과정중 무기인산의 지하유출은 없어 인산의 지하용탈에 의한 주변수계의 오염유발 가능성은 없는 것으로 조사되었다. 이는 인산자체의 강한 흡착특성^{16,17)} 이 외에 본 공시포장의 심층토에 폭넓게 발달된 산화층에서 인산이 철, 알루미늄 등과 반응하여 불용화 되었기 때문으로 해석된다.^{18,19,20)} 이러한 결과는 본 공시포장내 관정수에서 인산이 검출되지 않은 것과 같은 맥락에서 해석된다.

단지 장마기에 집중호우로 인한 토양유실에 의한 인산의 유출 가능성이 있을 것으로 판단되며, 이에 대한 조사는 있어야 할 것으로 생각된다.

칼리의 용탈 특성

그림 6은 침출수 중 칼리의 농도변화를 나타낸 것으로

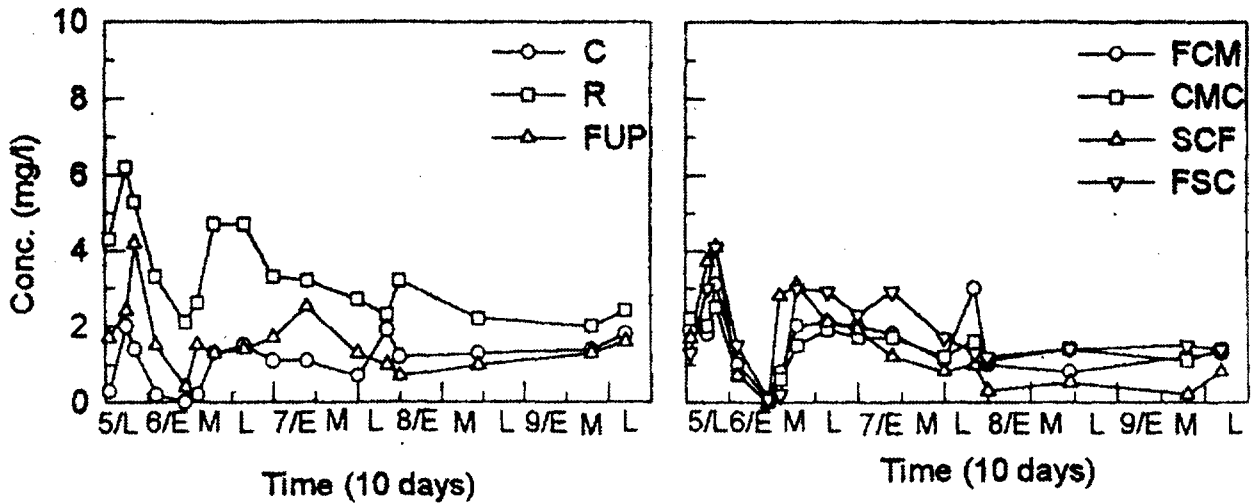


Fig. 6. Changes of K concentration in leachates on -60cm depth of rice paddy soil.

처리간 농도의 차이는 있었으나 용탈양상은 거의 비슷한 경향을 보여 시비 직후에 비교적 높은 농도로 용탈되었다. 6월 초순 칼리의 용탈농도가 크게 떨어졌으며, 이는 비의 양분요구도 증가, 관정수내 칼리 농도 저하로 관개수를 통한 공급량이 감소하여 토양내 용존칼리 함량의 감소되었기 때문으로 해석된다. 침출수 중의 칼리의 농도는 표준시비구(R)에서 6mg l^{-1} 수준으로 가장 높았으며, 다른 처리에서는 4mg l^{-1} 를 넘지 않았다.

양분의 유출율

표 5는 시비조건에 따라 시비와 관개수로 투입된 양분의 총량에 대한 지하 용탈양의 비율을 나타내고 있다. 관개수에 의해 공급된 양분의 총량은 처리구의 토양 특성에 의한 관개량에 따라 약간의 차이가 있었으며, 화학비료로서 질소를 사용한 처리는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 형태로 용탈된 양이 $\text{NH}_4\text{-N}$ 형태보다 훨씬 많았으나 유기질비료를 사용한 우분이나 우분

퇴비 시용구에서는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 와 $\text{NH}_4\text{-N}$ 가 거의 비슷한 양으로 용탈되었다. 일본에서의 비 재배과정중 질소의 지하 용탈량은 $10\sim 60\text{kg ha}^{-1}$ 정도인 것으로 보고되고 있으며,^{27,28)} 국내에서는 토성과 시비관리 방법 등에 따라 다소간 차이가 있지만 약 $8\sim 63\text{kg ha}^{-1}$ 정도가 지하로 유출되는 것으로 보고되었다.^{10,11,12,29,30)} 이번 시험에서 지하로 용탈된 질소의 총량은 표준시비구(R)와 농가관행 시비구(FUP)에서 $59, 63\text{kg ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ 인 반면 화학비료와 유기물을 동시에 사용한 퇴비+화학비료 감비구(SCF)나 벧짚환원+표준시비구(FSC)는 $25, 41\text{kg ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ 였으며, 화학비료를 사용하지 않고 우분(FCM)이나 우분퇴비(CMC)로서 질소비료를 대체한 처리는 $24, 27\text{kg ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ 로서 화학비료 시용구인 표준시비나 농가관행 시비보다 50% 정도나 적어 비 논에 유기물을 시용함으로써 질소 성분의 지하용탈을 크게 줄일수 있으며 근래 환경오염의 주성분으로 인식되고 있는 가축분도 효과적으로 사용할 경우 질소성분의 지하용탈을 줄일 수 있는 유용한 유기자원

Table 5. Infiltration rate of nutrients in paddy soil during rice cultivation

Treatment	Input ($\text{kg ha}^{-1}\text{y}^{-1}$)			Infiltration ($\text{kg ha}^{-1}\text{y}^{-1}$)			Infiltration rate(%)	
	Fert.*	Irr.*	Sub total	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	Sub total		
N	R	110	53	163	48	11	59	36
	FUP	138	64	202	50	13	63	31
	SCF	110	71	181	17	8	25	14
	FSC	151	73	224	26	15	41	18
	FCM	110	37	147	14	10	24	16
	CMC	110	43	153	13	14	27	18
	C	-	44	44	11	6	17	39
K	R	66	24	90			51	57
	FUP	56	28	84			24	29
	SCF	66	28	94			19	20
	FSC	106	29	135			29	21
	FCM	22	16	38			23	61
	CMC	65	20	85			23	27
	C	-	14	14			19	136

Note) *: Fert. and Irr. mean fertilization and irrigation, respectively.

으로 이용될 수 있음을 알 수 있었다.

또한 표준시비구나 농가관행구를 제외한 나머지 유기물 시용구에서는 벼 재배기간 동안 관개수에 의해 눈에 공급된 질소의 양보다 지하로 용탈된 양이 13-46kg ha⁻¹y⁻¹나 적어 화학비료와 함께 유기물을 투입하거나 우분이나 우분퇴비로서 질소비료를 대체한 경우 벼농사는 수질 오염보다는 오히려 질소성분을 13-46kg ha⁻¹y⁻¹나 정화하는 공익적 기능이 있는 것으로 조사되었다. 이는 일본에서의 연구결과^{31,32)}와도 일치하는 내용으로 농경을 통한 소수계 오염 유발에 대한 우리의 일반적인 개념이 다소 잘못되었음을 알 수 있었다.

질소의 투입량에 대한 지하 용탈량의 비율은 무비구가 가장 높아 총 44kg ha⁻¹의 질소가 관개수를 통해 유입되어 이중 약 41%가 용탈되었으나 이는 무비구의 질소 공급량이 가장 적었기 때문으로 생각된다. 화학비료만 사용한 표준시비와 농가관행구의 질소 용탈율은 36%와 31%로서 20% 이하인 유기물 시용구보다 많이 높았으며, 이(1996)가 미사질 양토의 3요소구에서 조사한 12%의 질소 용탈율과 비교하면 크게 높은 것으로 공시포장의 토성과 침투율 차이 때문으로 해석된다. 특히적으로 표준시비구(R)의 질소 용탈율이 높은것은 8월 초순 집중 호우로 인한 범람으로 유입된 유기물이 8월말 이후 고온하에서 많이 분해됨으로서 질소의 지하용탈량이 많았으나 이때 유입된 유기물은 투입량으로 계산되지 않았기 때문으로 생각된다.

칼리의 역시 화학비료에 벗짚이나 벗짚퇴비를 추가하여 시용하거나 또는 우분이나 우분퇴비로 화학비료를 대체하여 시용함으로써 지하 용탈량을 줄일수 있었으며 인산은 눈에서 지하로의 용탈이 거의 일어나지 않았다.

요 약

상수원 보호지역내 하상층적토, 사력질의 벼 재배 눈에서 표준시비, 농가관행시비, 우분, 우분퇴비, 벗짚퇴비+화학비료감비, 벗짚환원+표준시비 그리고 무비구의 7 처리를 하여 벼 재배 과정 동안 비료성분의 지하 용탈특성을 조사, 분석한 결과는 다음과 같다. 관정수중의 질산태 질소의 농도는 인근 농경지로부터 시비질소의 유입이 시작된 이양 일에는 1.3mg l⁻¹, 물떼기 이후에는 0.4mg l⁻¹로 낮았으나 벼 생육기에는 4~6mg l⁻¹로서 상대적으로 높은 농도를 유지하였다. 벼 재배기간 동안 침출수 중 질산태 질소의 농도는 농가관행구가 가장 높았으나 최고 농도는 7.1mg l⁻¹로서 음용수의 질산태 질소 한계농도인 10mg l⁻¹보다 낮았다.

표준시비, 농가관행, 퇴비+화학비료 감비, 벗짚환원+표준시비, 우분, 우분퇴비, 무비구의 벼 재배기간중 질소의 총 투입량은 각각 163, 202, 181, 224, 147, 153, 44kg ha⁻¹이었으며 처리별 질소의 지하 용탈량은 각각 59, 63, 25, 41, 24, 27,

17kg ha⁻¹로서 퇴비+화학비료 감비나 우분이나 우분퇴비로서 화학비료를 대체한 처리는 표준시비나 농가관행 시비구에 비교하여 질소의 지하 용탈을 50%나 줄일 수 있었으며 벗짚환원+표준시비구는 화학비료만 사용한 표준시비구에 비교하여 투입된 질소의 양은 많았지만 지하 용탈량은 30%나 적었다. 또한 화학비료만 사용한 표준시비구나 농가관행구를 제외한 나머지 유기물 시용구에서는 관개수로 눈에 공급된 질소의 양보다 눈으로부터 지하로 용탈된 질소 양이 13-46kg ha⁻¹y⁻¹나 적어 화학비료와 함께 유기물을 투입하거나 우분이나 우분퇴비로서 질소비료를 대체한 경우 벼농사는 수질 오염보다는 오히려 질소성분을 13-46kg ha⁻¹y⁻¹나 정화하는 공익적 기능이 있는 것으로 조사되었다.

조사기간 동안 전처리구의 침출수와 관정수에서 인산은 검출되지 않았으며, 칼리는 화학비료 사용량이 많은 추천시비구에서 공급량의 약 57%가 용탈되었고 유기물 처리에 의해 칼리의 용탈량을 크게 감소시킬 수 있었다. 이상의 결과를 통해 벼 재배기간 중 기존의 화학비료 위주의 시비체계에서 축산분뇨등을 효율적을 이용함으로써 화학비료의 사용량을 줄이거나, 벗짚등 유기자원의 환원을 통해 양분의 지하용탈에 의한 수계오염 가능성을 크게 줄일 수 있을 것으로 조사되었다.

참 고 문 헌

1. 이기상. 1996. 벼 재배시 질소 양분 행동에 관한 연구. 시험 연구사업보고서(농업환경부편). 농촌진흥청 농업과학기술원. p. 408-412.
2. 정영상, 양재의, 박철수, 권영기, 주영규. 1998. 북한강 울문천 소유역에서 수질변화와 농업활동에 의한 N, P 부하량. 한국토양비료학회지 31(2):170-176
3. Brady, N. 1990. The Nature and Properties of Soils (10th Ed). Macmillan Pub. Co. New York. pp. 418-438.
4. 김필주, 정덕영, 이병열. 1997. 우분퇴비 처리에 따른 다충구 조 토양내 음이온의 용출 특성. 한국토양환경학회지 2(2) 25-33.
5. Elrick, D. E., and W. D. Reynolds. 1992. Infiltration from constant-head well permeameter and infiltrometers. In Advances in Measurement of Soil Physical Properties : Bringing Theory into Practice (ed G. C. Topp, W. D. Reynolds, and R. E. Green). SSSA Special Pub. No. 30. SSSA. Madison, Wisconsin. pp. 1-24.
6. Lee, D. M., W. D. Reynolds, D. E. Elrick, and B. E. Clothier. 1985. A comparison of three field methods for measuring saturated hydraulic conductivity. Can. J. Soil Sci. 65:563-573.
7. Reynolds, W. D. 1993. Saturated hydraulic conductivity : Field measurement. Soil Sampling and Methods of Analysis. Can. Cos. Soil Sci. Lewis Pub. pp. 599-613.

8. Reynolds, W. D., and D. E. Elrick. 1990. Ponded infiltration from a single ring : I. Analysis of steady flow. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:1233-1241.
9. 농업기술연구소. 1988. 토양화학분석법. 농업기술연구소. 농업진흥청.
10. 이기상, 허일봉. 1995. 벼 재배시 질소양분 행동에 관한 연구. 시험연구사업보고서(농업환경부편). 농촌진흥청 농업과학기술원. p. 346-349.
11. 이기상, 허일봉. 1996. 벼 재배시 질소양분 행동에 관한 연구. 시험연구사업보고서(농업 환경부편). 농촌진흥청 농업과학기술원. p. 408-412.
12. 이기상, 이동창, 허일봉, 이연. 1997. 벼 재배시 양분행동에 관한 연구. 시험연구사업보 고서(농업환경부편). 농촌진흥청 농업과학기술원. p. 703-710.
13. Comly, H. H. 1945. Cyanosis in infants caused by nitrate in well water. *J. Am. Med. Assoc.* 129:112.
14. Patrick, W. H., Jr., and R. D. DeLaune. 1972. Characterization of the oxidized and reduced zones in flooded soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36:573-576.
15. Ponnampetuma, F. N. 1972. The chemistry of submerged soils. *Adv. Agron.* 24:29-96.
16. Higston, F. J., R. J. Atkinson, A. M. Posner, and J. P. Quirk. 1967. Specific adsorption of anions. *Nature.* 215:1459-1461.
17. Higston, F. J., R. J. Atkinson, A. M. Posner, and J. P. Quirk. 1968. Specific adsorption of anions on geothite. *Trans. 9th Int. Congr. Soil Sci.* 1:669-678.
18. Amarasiri, P. A., and S. R. Olsen. 1973. Liming as related to solubility of P and plant growth in an acid tropical soil. *Soil Sci. Soc. Am. Pro.* 37:716-720.
19. Miller, R. W., R. L. Donahu, and J. U. Miller. 1990. *Soils. An introduction to soils and plant growth. An Introduction to Soils and Plant Growth.* 6th ed. Prentice-Hall International, Inc. pp 270-278.
20. Sanchez, P. A., and G. Uehara. 1980. Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. In *The Role Phosphorus in Agriculture* (ed. F. E. Khasawner, E. C. Sample, and E. J. Jamprath). Madison, ASA.
21. Nelson, K. E., A. J. Turgeon, and J. R. Street. 1980. Influence on mobility and transformation of nitrogen carriers applied to turf. *Agron. J.* 71:487-492.
22. Passioura, J. B., and D. A. Rose. 1971. Hydrodynamic dispersion in aggregated media. 2. Effects of velocity and aggregate size. *Soil Sci.* 11:345-351.
23. 류순호, 이상모. 1988. 담수토양의 표면에 시용한 요소의 행동에 관한 연구. 농시논문집(농업산학협동) 31:201-206.
24. Broadbent, F. E., G. N. Hill, and K. B. Tyler. 1958. Transformations and movement of urea in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Pro.* 22:303-307.
25. Sharply, A. N. 1995. Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus. *J. Environmental Quality* 24:920-926.
26. USEPA. 1994. National Water Quality Inventory. 1992 Report of Congress. USEPA. 841-R-94-001. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.5
27. 國松孝男. 1986. 農林地からの榮養鹽の流出と對策. 水處理技術. 27(10) 713-720.
28. Uwasawa, M., and T. Konno. 1997. Estimation of nitrogen and zinc environmental assimilating capacity of cultivated soil -To promote sustainable agriculture in Japan-. *JARQ* 31:171-178.
29. 신동석, 권선국. 1990. 논에서 질소 인의 농도와 유출입. 환경농학회지 9(2) : 133-141. 한국농공학회지.
30. 이창기, 이길철, 이홍재, 유홍일, 이민효. 1990. 영농화학물질의 적정시용방안에 관한 연구(I) - 비료를 중심으로. 국립환경연구원보. 12 : 339-354.
31. Hidaka, S. 1995. Water purifying function of paddy fields as the agriculture for environmental presentation. *J. Agr. Sci.* 50:393-397, 448-451 (in Japanese).
32. Iwama, H. 1997. Materail balance and ecological functions of paddy farming in Japan. The 4th JIRCAS International Symposium. Sustainable Agricultural Development Compatible with Environmental Conservation in Asia. p. 1-9.