한국환경농학회지 제24권 제3호 (2005)
Korean Journal of Environmental Agriculture Vol. 24, No. 3, pp. 270-279

연구보문

벼농사에서 질소유출이 수질에 미치는 영향평가

노기안* · 김민경 · 이병모[1)] · 이남종 · 서명철 · 고문환

농업과학기술원 환경생태과, [1)]농업과학기술원 친환경농업과

(2005년 7월 11일 접수, 2005년 8월 9일 수리)

Assessment of Nitrogen Impaction on Watershed by Rice Cultivation

Kee-An Roh*, Min-Kyeong Kim, Byeong-Mo Lee, Nam-Jong Lee, Myung-Chul Seo, and Mun-Hwan Koh (National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon 441-707, Korea)

ABSTRACT: It is important to understand and evaluate the environmental impacts of rice cultivation for developing environmentally-friendly agriculture because rice is main crop in Korea and rice cultivation have both functions of water pollution and purification with environmental and cultivation conditions. This paper presents the evaluation of nitrogen impact by rice cultivation on water system. A simple protocol was proposed to assess the potential amount of nitrogen outflow from paddy field and most of parameters affect on the nitrogen outflow from paddy field such as the amount of fertilizer application, water balance, the quality and quantity of irrigation water, soil properties, nitrogen turnover in the soil and cultivation method were considered. To develop the protocol, coefficients for parameters affected nitrogen turnover and outflow were gotten and summarized by comparison and analysis of all possible references related, and by additional experiments at field and laboratory. And potential amount of nitrogen input and output by water in paddy field were estimated with the protocol at the conditions of the nitrogen contents of irrigation water, amount of fertilizer application, and irrigation methods. Where irrigation water was clean, below 1.0 mg L^{-1} of nitrogen concentration, rice cultivation polluted nearby watershed. At the conditions of 2.0 mg L^{-1} of nitrogen concentration, 110 kg ha^{-1} of nitrogen fertilizer application and flooding irrigation, rice cultivation had water pollution function, but it had water purification function with intermittent irrigation. At the conditions of 3.0 mg L^{-1} of nitrogen concentration and 110 kg ha^{-1} of nitrogen fertilizer application, rice cultivation had water purification function, but that had water pollution function with 120 kg ha^{-1} of nitrogen application. Where irrigation water was polluted over 6.0 mg L^{-1} of nitrogen, it was evaluated that rice cultivation had water purifying effect, even though the amount of nitrogen application was 120 kg ha^{-1}.

Key Words: Environmental impact, Rice paddy, Nitrogen, Irrigation, Water pollution, Nutrients input, Nutrients output

서 론

벼농사는 물을 가장 많이 사용하는 농업으로 주변의 수질환경과 밀접한 연관이 있다. 논에 과잉으로 투입된 양분들은 바로 주변의 하천수를 오염시켜 부영양화의 원인이 될 수 있지만 반대로 벼농사는 관개수중의 양분을 활용하여 벼를 재배하거나, 거대한 인공습지로서의 역할을 수행함으로써 주변의 수질을 정화하는 기능을 가지고 있다. 농업비점오염원에 의한 환경오염이 사회적 문제로 대두되면서 여러 가지 농업형태 중 유일하게 수질정화 기능을 가지고 있는 벼농사에 대한 종합적인 분석·평가와 이를 통한 공익적 기능 활용 증대의 필요성이 날로 증대되고 있다. 벼농사가 주변 수질에 미치는 영향은 지하침투수나 배수에 의한 양분 유출에 의해 발생되지만 이를 평가하기 위해서는 벼논에서의 질소동태와 여기에 영향을 미치는 토양 및 관개수특성, 재배방법 등 다양한 요인들에 대한 이해가 필요하다. 하지만 이와 같이 다양한 요인들에 관한 종합적 연구는 환경이나 재배조건 시험의 수행과정에 따라 큰 차이가 날 수 있으며, 여러 전문분야에서 많은 노력과 장기간의 시간을 필요로 한다. 따라서 벼농사가 수질에 미치는 영향을 밝히기 위

*연락저자:
Tel: +82-31-290-0213 Fax: +82-31-290-0294
E-mail: karoh@rda.go.kr

한 많은 연구들이 수행되었지만[1-8] 대부분 단편적인 연구들을 수행 하여 벼농사가 주변수질에 미치는 영향을 종합적으로 평가하기에는 한계가 있었다. 따라서 본 연구는 농업에서 가장 중요한 하천오염 유발인자인 질소와 인산 중 질소를 대상으로 하여 벼농사가 하천수질에 미치는 영향을 간편하고 종합적으로 평가할 수 있는 평가기법을 개발하고 이를 통해 벼농사가 수질에 미치는 영향의 종합적인 평가를 시도하였다.

재료 및 방법

벼농사에서 질소가 수질에 미치는 영향평가방법 개발의 기본원리는 논에 투입된 질소의 공급량과 유출 또는 활용되는 양은 동일하다는 질소 balance 개념에서 출발하였다. 질소의 공급량과 유출량을 계산하기 위해 시비량, 관개수 수질, 관개량과 물이용 수지, 토양유기물 함량, 유기물 시용여부, 이앙방법, 물관리 방법, 수확량 등 질소의 공급량과 유출량 결정에 영향을 주는 요인들과 요인상호간의 관계를 자료 분석, 현지포장 및 실내실험을 통해 지수화 하였으며 산정된 지수들을 excel 프로그램으로 종합하여 벼논에서 질소의 순환과정을 정량화하였다. 논에서 질소의 수계유출은 크게 지하침투수와 표면수의 배수에 의해 발생하므로 이 경로로 배출되는 유출량을 알아야만 수질에 미치는 영향의 정확한 평가가 가능하지만 표면배수에 의해 유출되는 양은 농가의 물관리에 의해 좌우되므로 평가방법을 결정하기가 어려워 질소의 총 공급량에서 대기유출, 작물이용, 토양잔류량 부분을 뺀 값을 수질에 영향을 미칠 수 있는 잠재유출량으로 산정하여 벼농사가 수질에 미치는 영향으로 평가하였으며, 우리나라 벼농사의 평균적인 환경 및 재배조건을 적용하여 관개수 수질, 시비량, 물관리 방법에 따른 질소의 잠재유출량변화를 추정하였다. 또한 지수화 과정은 평가기법의 간편하고 보편적인 활용을 위해 가능한 일반적이고 평균적인 자료를 사용하였다.

결과 및 고찰

질소의 유입량 산정

벼논으로의 질소유입량은 시비량, 관개 및 강우에 의한 수계 공급량, 토양의 질소공급량, 대기질소 고정량을 모두 합하여 산정하였다.

가. 시비량 산정

시비량은 평가대상 지역에서 실제로 사용되는 양을 적용하였다.

나. 관개수에 의한 유입량 산정

관개수에 의한 질소유입량은 식 (1)과 같이 관개수중의 질소농도와 관개량의 곱으로 계산하였다

$$NQI_{irr} = NC_{irr} \times WQI_{irr} \quad (1)$$

여기서 NQI_{irr}은 관개수에 의한 질소 공급량, NC_{irr}은 관개수중의 질소농도, WQI_{irr}은 관개량이다.

1) 관개수중의 질소농도 산정

관개수중의 질소농도는 실측치를 활용하며, 실측이 어려울 경우 환경부에서 제공하는 전국 하천수 수질측정망 자료, 농업기반공사에서 제공하는 농업용수 수질조사자료 농촌진흥청의 농업용수 변동조사자료 들의 활용이 가능하다.

2) 관개량 산정

벼 재배기간 동안 필요한 관개량은 식 (2)와 같이 물소모량(지하침투량 + 증발산량)에서 강우 이용량을 뺀 값에 이앙방법별 관개량 지수를 곱해서 계산하였다.

$$WQI_{irr} = (WQ_{dem} - WQI_{rain}) \times I_{tra}$$
$$WQ_{dem} = WQO_{inf} + WQO_{tra} \quad (2)$$

여기서 WQI_{irr}은 관개량, WQ_{dem}은 물소모량, WQI_{rain}은 강우이용량, I_{tra}은 이앙방법별 관개량 지수, WQO_{inf}은 지하침투량, WQO_{tra}은 증발산량을 내타낸다.

가) 물소모량 산정

(1) 지하침투량

논에서의 물소모량은 지하침투량과 증발산량의 합으로 계산할 수 있다. 우선 지하침투량은 토양특성이나 주변 환경과 따라 커다란 차이가 있으며, 측정에 많은 시간과 노력을 필요로 해 본 연구에서는 간편하고 단순한 방법으로 지하침투량을 산정하고자 토양특성을 사질·사양질, 미사사양질, 식양질·미사식양질, 식질의 4개 그룹으로 구분한 후 논토양 관련 토양통들을 해당그룹으로 분류하였다. 그룹별로 지하침투량은 관련자료의 분석과[5-8] 포장시험 결과[9]들을 종합하여 Table 1과 같이 산정하였다.

(2) 증발산량

벼논에서의 증발산량은 지역과 기상에 따라 값의 편차가 클 수도 있으며 많은 연구에서 그 분포범위가 444~850 mm y^{-1}으로 다양한 값을 보였으며[4,10-12] 본 연구에서는 그 값들의 평균치인 600 mm y^{-1}를 적용하였다.

나) 강우이용량(유효강우량)

벼논에서의 강우이용량은 물관리, 기상요인에 의해 크게 좌우되며 본 연구에서는 2004년 충남 홍성군 홍동면의 2개 포장에서 지하침투량, 관개량, 강우량을 실측한 결과를 활용 Table 2와 같이 산출하였다. 관개량은 관개양수기에 계량기를 연결하여 직접 측정하였으며, 지하침투량은 포장별로 9개의 직경 15 cm 원통형 아크릴 관을 토양에 박은 후 증발산

을 방지하기 위해 검은 비닐로 덮은 후 10일 후의 수위변화를 측정하였다. 시험포장의 지하침투량은 지하배수가 잘 안 되는 토성(덕평통)으로 평균 지하침투량은 1.4 mm day^{-1}이었으며, 벼작기 중 관개일수를 100일로 계산하여 지하침투량(140 mm)과 증발산량(600 mm)을 합쳐 벼논의 물소모량을 740 mm로 산정하였다. 벼 재배 기간 중의 물소모량(740 mm)에서 실측한 관개량(286 mm)을 뺀 450 mm(4,500 Mg ha^{-1})을 강우이용량으로 산정하였으며 유효강우량을 초과한 강우부분에 대해서는 논에서 머무르지 않고 수계로 바로 유출되므로 강우에 의한 영향에서 제외하였다.

벼농사에서의 연간 관개량은 토성별 지하침투량(Table 1), 증발산량, 강우이용량(Table 2)을 종합하여 Table 3과

Table 1. Estimation of infiltration rate by different soil texture at paddy during rice cultivation

Soil texture (family)	Soil series	Infiltration rate (mm day^{-1})
Sandy Coarse loam	Geumji, Geumcheon, Nagcheon, Namgye, Baegsu, Sadu, Sindab, Yeompo, Jangcheon, Haggog Gacheon, Gapo, Gamcheon, Gangseo, Gocheon, Gwangpo, Gupo, Geumjin, Dongam, Dongho, Magog, Maryeong, Maegog, Munpo, Bognae, Sachon, Sangye, Seoggye, Seogcheon, Subug, Abgog, Yecheon, Yonggog, Weolgog, Eungog, Janggye, Jeomgog, Cheonbu, Chuncheon, Taean, Hagpo, Hamchang, Hwasu, Hoegog	10
Coarse silty	Gwanghwal, Nampyeong, Mangyeong, Mulgeum, Opyeong, Icheon	5
Fine loamy Fine silty	Gangdong, Gugog, Geumgog, Dapyeong, Daeweon, Deoggog, Manseong, Baeggu, Bigog, Samam, Seongju, Sinheung, Agog, Angye, Yanggog Yeongsan, Ocheon, Oggye, Ogcheon, Yongji, Yulgog, Yulpo, Inje, Imgog, jangyu, Jisan, Jindo, Cheonpyeong, Chilgog, Cheolweon Tongcheon, Pangog, Pyeonghae, Hagsan, Hampyeong, Haenggog, Hyocheon, Heungpyeong Gagog, Gangjin, Gyeongsan, Goryeong, Gyuam, Geumseo, Gimhae, Daldong, Deogha, Mungyeong, Miweon, Banggog, Bogcheon, Bonggog, Bongrim Sugye, Simcheon, Yegog, Ogdong, Yonggang, Weolpyeong, Yuga, Yugog, Jeonbug, Jonggog, Juggog, Jinmog, Cheonggye, Cheongweon, Chunpo Pyeongtaeg, Podu, Poseung, Hagseong, Haecheog, Hyangho	3
Clayey	Gongdeog, Geugrag, Gimje, Deogpyeong, Dongsong, Banggi, Bongnam, Buyong, Sinpyeong, Yeosu, Yeoncheon, Yongsu, Yongho, Yugye, Iho, Cheolweon, Chogye, Teuggog, Paju, Pori, Haean, Honam, Hwadong	2

Table 2. Estimation of the amount of irrigation water by rainfall at paddy during rice cultivation

	Irrigation water (mm)	Infiltration rate (mm day^{-1})	Infiltration water (mm 100 day^{-1})	Evapo-trans piration (mm)	[a)]Irrigation demand (mm)	Rainfall (mm)	[b)]Irrigation by rainfall (mm)
Site 1	209	1.1	110	600	710	1,018	501
Site 2	363	1.7	170	600	770	1,018	407
Avg.	286	1.4	140		740		454

[a)] : Irrigation demand = Infiltration water + Evapo-transpiration
[b)] : Irrigation by rainfall = Irrigation demand - Irrigation water.

Table 3. Estimation of the amount of irrigation water by different soil texture at paddy during rice cultivation

	Sandy Coarse loam	Coarse silty	Fine loamy Fine silty	Clayey	Weight average
Distribution area (ha)	419,352	91,238	646,298	111,361	
Infiltration rate (mm)	10	5	3	2	5.4
Evapotranspiration (mm)	600	600	600	600	600
Irrigation demand (mm)	1,600	1,100	900	800	1,140
Irrigation by rainfall (mm)	450	450	450	450	450
Irrigation water (mm)	1,150	650	450	350	690

같이 추정하였으며, 관개수에 의한 질소유입량 결정에 활용하였다.

토양특성별 논면적을 가중평균을 하여 산정한 우리나라 벼논의 평균 지하침투량은 5.4 mm day^{-1}이었으며, 평균 관개량은 690 mm로 다른 연구들[3,4,13] 보다는 낮았지만 이는 배수에 의한 표면수 유출이 없다는 조건하에서 계산하였기 때문이다.

3) 이앙방법별 관개량 지수

논에서의 물 사용량은 이앙방법별로 큰 차이를 보이며, 본 연구에서는 관련 자료의 결과[14](Table 4)를 활용하였다.

다. 강우에 의한 유입량

본 연구에서 강우에 의한 질소유입량은 작기 중 내린 강우량 중 유효강우량에 해당되는 4,500 Mg ha^{-1}에(Table 2) 강우중의 질소농도를 곱하여 산정하였다. 강우중의 질소농도는 지역, 시기, 강우량 등에 따라 편차가 크다[4,15-17]. 본 연구에서는 강우중의 질소농도를 강우량과의 가중평균으로 구한 1.58 mg L^{-1}를[17] 적용하여 벼 작기중 강우에 의한 질소 공급량을 7.1 kg ha^{-1}로 산정하였다.

라. 토양에 의한 공급량

토양에 의한 질소공급은 주로 토양유기물의 무기화과정을 통해 이루어지며 시비질소보다 작물의 이용효율이 매우 높아[1,3] 작물 재배에서 매우 중요하다. 토양으로부터 한 작기에 공급되는 질소량은 토양 유기질소의 1.0~4.0%로[4,18] 토성, 기후, 물 관리방법 등에 따라 차이가 크며, 토양에서 100 mesh 이상 크기의 유기물 함량은 3.3~7.0 Mg ha^{-1}지만 질소무기화에는 거의 기여하지 않는다고 했다[19]. 따라서 본 연구에서는 위 결과들의 중간값인 2.5%를 토양유기물의 무기화율로 적용하여, 토양유기물 함량과 식 (3)으로 토양에 의한 질소 공급량을 간편하게 계산하였다.

$$NQIsoil = OMCsoil \times 1{,}200{,}000 \times (1/1.724) \times (1/11) \times 0.025 \times (1/1000) \quad (3)$$

여기에서 NQI_{soil}은 토양에 의한 질소공급량(kg ha^{-1}), OMC_{soil}은 토양 유기물함량(g kg^{-1}), 1,200,000은 토양의 가비중이 1.2일 때 작토층 깊이 10 cm에서의 토양 무게, 1/1.724는 유기물 중 C함량, 1/11은 유기물중의 C/N 비이며[20], 이 식을 사용하여 추정한 유기물함량 1.0% 당 토양의 질소공급량은 Table 5에서 같이 15.8 kg ha^{-1}이었다.

한편 농촌진흥청의 토양검정에 의한 시비처방법에서 유기물함량에 의한 일반논의 질소시비량 계산은 아래의 식 (4)를 이용하고 있다[21].

$$NQI_{fer} = 12.74 - 1.52 \times OMC_{soil} + 0.028 \times SiO_2C_{soil} \quad (4)$$

여기서 NQI_{fer}는 질소시비량(kg $10a^{-1}$), OMC_{soil}은 토양유기물함량(%), SiO_2C_{soil}은 유효규산함량(mg kg^{-1})이다. 이 식에서 유효규산함량을 고정시킬 경우 토양유기물함량 1.0% 증가 시 질소시비 저감량은 15.2 kg ha^{-1}이며, 이는 본 연구의 식 (3)으로 추정한 유기물 1.0%당 토양질소 공급량인 15.8 kg ha^{-1}과 거의 일치함을 알 수 있었다.

마. 대기질소 고정량

논에서의 미생물이나 조류에 의한 대기질소 고정에 관한 국내연구는 거의 없어 우리와 환경이 비슷한 일본의 연구들을 인용하였으며[22,23] 고정량은 25~35 kg ha^{-1}라고 했다. 본 연구에서는 그 중간값인 30 kg ha^{-1}을 적용하였다.

바. 유기물 시용에 의한 공급량

유기물 시용에 의한 질소 공급량을 유기물의 종류에 따라서 다양할 수 있으나 현재 우리나라의 벼논에 실질적으로 시용되는 유기물은 거의 대부분이 볏짚이므로 본 연구에서는 볏짚을 대상으로 조사하였다. 볏짚에 의한 질소공급량은 볏짚생산량에 볏짚중의 질소 함량을 곱해서 계산하였으며, 볏짚생산량은 Table 6처럼 쌀 생산량을 기준으로 도정률 75%를 적용하여 정조생산량을, 정조에서 수확지수 0.45를 적용하여 추정하였다. 볏짚중의 질소함량은 많은 연구[9,24-26]에서 0.3~0.8% 범위의 편차를 보였으나, 본 연구에서는 관련 자료의 평균치와 담당자의 경험에 의해 0.5%를 적용하여 볏짚 시용에 의한 질소공급량을 추정하였으며 볏짚을 논에 환원하지 않고 수거한 경우는 생산량의 15%가 작물잔사로 환원되는 것으로 계산하였다.

Table 4. Irrigation demand for rice cultivation by different transplanting methods

	Transplanting	Water seeding	Direct seeding on dry paddy
Irrigation demand (mm)	1,068	1,398	2,086
Index	1.00	1.31	1.95

Table 5. Estimation of nitrogen supply with organic matter in soil at rice paddy during rice cultivation

OM (g kg^{-1})	15	20	25	30	35	40
N supply (kg ha^{-1})	23.7	31.6	39.5	47.5	55.4	63.3

Table 6. Estimation of nitrogen absorbed by rice plant with the amount of polished rice production (kg ha^{-1})

Polished rice (A)	Rough rice	Straw	Amounts of nitrogen		
			Grain (B)	Straw (C)	Total
	A/0.75	Harvest Index 0.45	Nitrogen content (1%)	Nitrogen content (0.5%)	B+C
4,500	6,000	7,333	60.0	36.7	96.7
5,000	6,667	8,148	66.7	40.7	107.4
5,500	7,333	8,963	73.3	44.8	118.1

질소 유출량 산정

벼논에 유입된 질소는 배출수나 지하침투수를 통한 수계 유출, 암모니아 휘산이나 탈질에 의한 대기중으로의 손실, 무기질소의 유기화에 의한 토양 잔류, 작물에 의한 흡수의 과정들을 통해 이동한다. 질소의 수계유출량은 크게 지하침투수와 표면수의 배수에 의해 발생하므로 이 경로로 배출되는 유출량을 알아야만 수질에 미치는 영향의 정확한 평가가 가능하지만 표면배수에 의해 유출되는 양은 농가의 물관리에 의해 좌우되므로 평가방법을 결정하기가 어려워 앞에서 기술한 방법에 의해 구한 총 유입량에서 대기로의 유출량, 작물흡수량, 토양 잔류량을 뺀 값으로 산정하였다.

가. 대기 유출량

벼논에서 질소의 대기유출은 암모니아 휘산과 탈질과정으로 대변할 수 있으며 두 과정으로 유출되는 양을 합해서 대기로의 유출량으로 산정하였다. 질소의 대기유출량은 유입질소의 18.8~25.0%[1,19,23,27,28], 또는 30~80 kg ha^{-1}[1,29,30]라는 많은 연구들이 있으며, 본 연구에서는 이들의 평균값인 23%를 적용하여 식 (5)처럼 벼논에서의 대기로의 질소 유출량으로 산정하였다.

$$NQO_{air} = NQO_{amm} + NQO_{nit} = NQI_{ior} \times 0.23$$
$$NQI_{ior} = NQI_{fer} + NQI_{irr} + NQI_{rain} + NQI_{air} + NQI_{soil} \quad (5)$$

여기서 NQO_{air}은 대기로의 질소 유출량, NQO_{amm}은 암모니아 휘산량, NQO_{nit}은 탈질량, NQI_{ior}은 무기질소 총유입량, NQI_{fer}은 시비량, NQI_{irr}은 관개질소 유입량, NQI_{rain}은 강우질소 유입량, NQI_{air}은 질소 고정량, NQI_{soil}은 토양질소 공급량을 나타낸다.

1) 암모니아 휘산량

논토양에서 암모니아 휘산은 거의 시비질소에서 유래되며 휘산량은 비료종류, 시비방법, 시비시기, 토양반응 등에 따라 큰 차이가 난다. 본 연구에서 논에서의 암모니아 휘산량은 시비질소의 16.5%[31], 14.7%[32]라는 결과들의 평균값인 15%를 적용하여 식 (6)으로서 산정하였다.

$$NQO_{amm} = NQI_{fer} \times 0.15 \quad (6)$$

2) 탈질량

탈질은 토양의 질소산화물들이 N_2, N_2O등의 가스형태로 대기중으로 비산되는 것으로 본 연구에서는 식 (7)처럼 인용자료들의 평균값인 무기질소 총 공급량의 23%에서 암모니아 휘산 부분(시비질소의 15%)을 뺀 값을 탈질에 의한 유출량으로 산정하였다.

$$NQO_{nit} = NQO_{air} - NQO_{amm} \quad (7)$$

3) 물관리에 따른 탈질량 변화

논토양의 탈질과정에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 토양의 산화 환원상태로서 토양의 산화환원이 반복되면 탈질량은 증가하게 되며, 농경지내에서의 질소동태와 수계로 유출되는 질소의 양에도 영향을 미치게 된다. 간단관개에 의한 낙수처리로 질소의 대기유출량은 약 10%가 증가하며 이는 거의 탈질과정으로 유출된다고 하였다[3]. 따라서 본 연구에서는 물관리 특히 간단관개에 의해 질소의 대기유출량은 10%가 증가하며, 이 증가분은 탈질량의 증가에 의한 것으로 식 (8)을 이용하여 산정하였으며, 또한 질소의 동태의 정량화시 간단관개에 의한 대기유출량 증가분 10% 만큼 수계유출 가능량이 감소하는 것으로 산정하였다.

$$NQOI_{air} = NQO_{air} \times 1.1 = NQO_{amm} + NQOI_{nit}$$
$$NQOI_{nit} = NQO_{nit} + (NQO_{air} \times 0.1) \quad (8)$$

여기서 $NQOI_{air}$은 간단관개시 대기로의 질소유출량, NQO_{air}은 간단관개를 실시하지 않을 때의 질소의 대기유출량, NQO_{amm}은 간단관개를 실시하지 않을 때의 암모니아 휘산량, $NQOI_{nit}$은 간단관개시 탈질량, NQO_{nit}은 간단관개를 실시하지 않을 때의 탈질량, NQO_{air}은 간단관개를 실시하지 않을 때 질소의 대기유출량이다.

나. 작물흡수량

농경지의 질소동태에서 가장 큰 비중을 차지하는 분야가 작물에 의한 흡수부분이며 본 연구에서는 쌀 수확량을 기준으로 하여 Table 9와 같이 도정률 75%, 수확지수 0.45, 정조의 질소함량은 1.0%, 볏짚의 질소함량 0.5%를 적용 벼에 의한 질소의 흡수량을 산정하였으며, 볏짚에 의한 흡수량은 그루터기나 작물잔사로 토양에 환원되는 15%를 제외한 85%를

흡수량으로 산정하였다.

다. 토양 잔류량

벼논에 유입된 질소의 유기화량은 20~34% 등[1,3,27,33-35] 많은 연구결과들이 보고 되었지만 대개 유입질소의 약 20%가 유기태질소로서 토양에 잔류한다고 하였으며[3] 본 연구에서도 질소의 유기화율을 투입된 질소의 20%로 하여 식 (9)와 같이 계산하였다. 단 토양공급 질소의 재유기화에 대해서는 관련 자료를 구할 수 없어서 식 (10)에 포함시키지 않았다.

$$NQO_{org} = NQI_{tot} \times 0.2$$
$$NQI_{tot} = NQI_{fer} + NQI_{irr} + NQI_{rain} + NQI_{org} + NQI_{soil} \quad (9)$$

여기서 NQO_{org}은 공급질소의 토양잔류량, $N = NQI_{tot}$은 토양에 의한 공급을 제외한 질소의 총공급량, NQI_{org}은 유기물 공급에 의한 질소공급량이다.

질소의 수계유출량 산정

벼농사에서 질소의 유출량은 표면유출량과 지하침투량으로 구분되며 그 양을 결정하는 데는 앞에서 기술한 바와 같이 여러 가지 요인들이 단독 혹은 상호 연관하여 작용한다.

가. 볏짚시용이 질소동태에 미치는 영향

질소의 지하침투량에 영향을 주는 요인 중 그 영향력이 큰 요인 중의 하나가 볏짚시용이다. 볏짚시용에 의한 지하침투량 변화는 컬럼 시험에서 볏짚시용으로 질소의 지하침투의 주성분인 토양중의 질산태 질소농도가 26~40% 감소하며[36], 사질논에서 볏짚 시용으로 질소 총유입량은 많아지지만 볏짚 미시용구 보다 질소의 지하 침투량이 27% 감소하며[26], 4년간의 볏짚시용으로 작물의 질소흡수량이 3.1 kg ha^{-1} 증가하는 동시에 논으로부터의 질소의 침투량은 3.7 kg ha^{-1}이 경감되어 환경부하를 저감하는 효과를 나타낸다고 했다[37]. 볏짚시용에 따른 벼의 수량증수 효과로서 유기물 함량 2.0% 인 논에 볏짚 시용으로 8~9% 증수되며, 볏짚 시용 후 5년차부터 10% 가량 증수한다고 보고했다[38]. 따라서 본 연구에서 볏짚시용에 의한 논의 질소 balance 계산은 질소유입량은 볏짚에 의한 질소흡수량의 85%를 추가하였으며, 질소의 수계유출량은 25%를 감하고, 작물흡수량은 8%를 추가하여 산정하였으며, 이에 따라 암모니아 휘산, 탈질, 토양잔류량 볏짚을 시용하지 않았을 때와 같은 비율로 추가로 산정하였다. 결과적으로 볏짚시용으로 질소의 수계유출량은 감소, 수량증대에 따른 작물흡수량 증대, 수계유출량 감소와 작물흡수량 증대의 차이만큼 대기유출과 토양잔류량이 증대하게 된다.

나. 토성이 지하침투량에 미치는 영향

물이나 질소의 지하침투량을 결정하는 가장 중요한 요인은 토양특성에 의한 관개수의 침투속도일 것이다. 관개수의 침투수량이 많은 사질토양 일수록 질소의 침투량이 많고 침투수량이 적을수록 많고 침투량도 적을 것이다. Table 7에서는 침투속도와 침투량과의 관계를 구하고자 컬럼시험을 한 결과를 나타내고 있다.

다. 벼논에서의 질소동태 및 잠재 수계유출량 산정

앞에서 선정한 요인들과 요인간의 지수를 종합하여 Fig. 1과 같이 Excel program을 개발하였다.

개발된 방법에 우리나라 벼농사의 평균적인 환경과 재배조건인 토양 중 유기물함량[40] 22 g kg^{-1}, 관개수중의 질소농도[41] 2.78 mg L^{-1}, 시비량 110 kg ha^{-1}을 적용하여 계산한 벼농사에서 질소의 수계 유입, 유출량은 Table 8과 같이 각각 26.3 kg ha^{-1}, 26.7 kg ha^{-1}로 거의 균형을 이루어 벼농사가 수질에 미치는 영향은 크지 않는 것으로 평가되었다.

Table 9는 관개수중의 질소농도, 시비량, 물관리 방법별 수계로부터의 질소유입량과 잠재유출량을 계산한 결과로서, 관개수중의 질소농도가 1.0 mg L^{-1} 이하로 깨끗한 지역에서는 벼농사는 수질의 오염원으로 작용함을 알 수 있었다. 관개수중의 질소농도가 2.0 mg L^{-1}, 시비량 110 kg ha^{-1}의 조건에서 간단관개를 할 경우는 벼농사는 수질을 정화하는 기능이 있었으나 반대로 상시담수를 할 경우는 오히려 오염원으로 작용하였다.

질소농도가 3.0 mg L^{-1}인 경우는 시비량 110 kg ha^{-1}의 조건에서는 벼농사는 수질정화의 기능이 있었지만 시비량이 120 kg ha^{-1}로 증가하면 오염원으로 작용하였으며, 관개수중의 질소농도가 6.0 mg L^{-1} 이상으로 비교적 오염된 지역에서는 시비량이 120 kg ha^{-1}까지도 벼농사는 수질을 정화하는

Table 7. Amount of nitrogen infiltration by different soil texture

Soil texture	Sandy Coarse loam	Coarse silty	Fine loamy Fine silty	Clayey
Infiltration rate (mm day^{-1})	10	5	3	2
AWI[a] Index	2.00	1.00	0.60	0.40
NCW[b] Index	0.60	1.00	1.53	2.10
AIW[c] Index	1.2	1.0	0.9	0.8

[a] : Amount of Water Infiltrated
[b] : Nitrogen Concentration in Infiltration Water
[c] : Amount of Nitrogen Infiltrated.

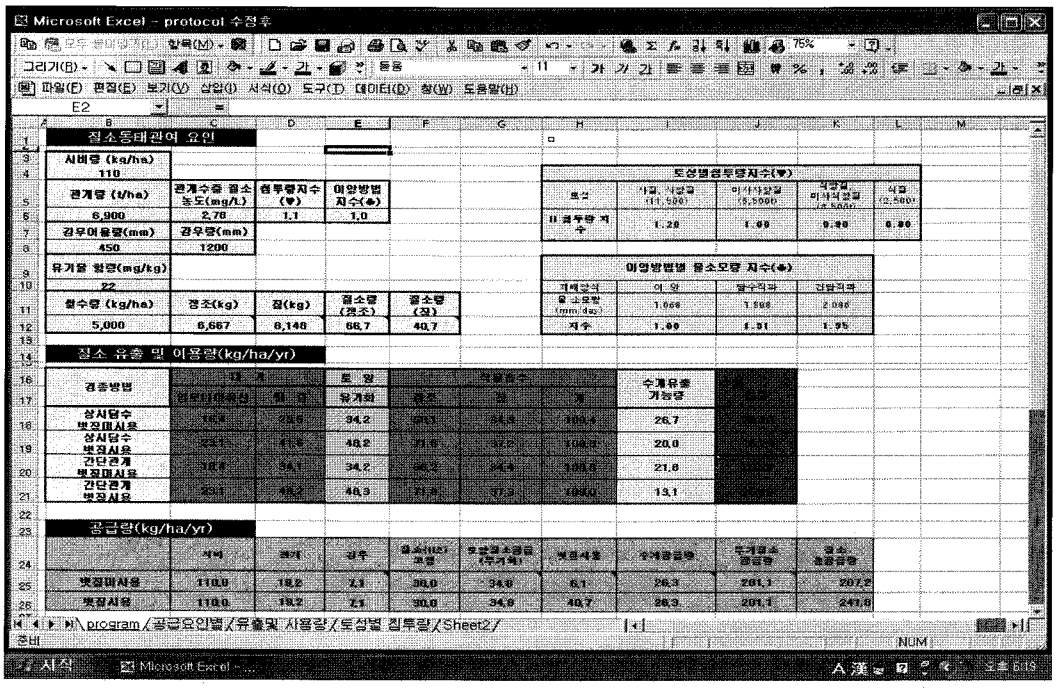

Fig. 1. Excel program for estimation of nitrogen outflow from rice paddy.

Table 8. Estimation of the nitrogen dynamics of rice paddy at mean conditions[a)] of rice cultivation in Korea (kg ha^{-1})

Input	Fertilizer	N Fixation	N Mineralization	Straw	Water			Total
					Irrigation	Rainfall	Sub-total	
	110.0	30.0	34.8	6.1	19.2	7.1	26.3	207.2

Output	Ammonia volatilization	Nitrification	Organization	Plant			Potential N outflow	Total
				Grain	Straw	Sub-total		
	16.4	29.5	34.2	66.1	34.3	100.4	26.7	207.2

[a)]Amount of Irrigation water : Irrigation (690 mm) + Effective rainfall (450 mm), Flooding.
Concentration of nitrogen in irrigation water : 2.78 mg L^{-1}, Content of OM in soil : 22 g kg^{-1}
Rice harvest (polished) : 5,000 kg ha^{-1}. Rice Straw : Not applied. Machine transplanting.

Table 9. Estimation of the potential nitrogen outflow by water from paddy field with nitrogen concentration in irrigation water, fertilizer application and irrigation method at mean conditions[a)] of rice cultivation in Korea

N concentrations in irrigation water (mg L^{-1})	Amount of N inflow by water	Potential amount of N outflow by water			
		110 (kg ha^{-1})		120 (kg ha^{-1})	
		Flooding	Intermittent irrigation	Flooding	Intermittent irrigation
1.0	14.1	19.3	14.6	25.4	20.5
2.0	20.9	23.5	18.7	29.5	24.5
2.78	26.3	26.7	-	-	-
3.0	27.8	27.6	22.7	33.7	28.6
4.0	34.7	31.8	26.8	37.9	32.5
5.0	41.6	36.0	30.7	42.0	36.5
6.0	48.5	40.1	34.7	46.2	40.6

[a)]Amount of Irrigation water : Irrigation (690 mm) + Effective rainfall (450 mm),
Content of OM in soil : 22 g kg^{-1}, Rice harvest (polished) : 5,000 kg ha^{-1}
Rice straw : Not applied, Machine transplanting, Flooding.

기능을 가지고 있는 것으로 평가되었다. 이같이 벼농사는 지역 환경이나 재배방법에 따라 수질정화 또는 오염원으로 그 기능이 다르게 결정됨을 알 수 있었다. 따라서 환경조건별 벼농사가 수질에 미치는 영향의 평가를 통한 적절한 관리방법의 도입으로 벼농사에 의한 수질오염은 줄이며, 정화기능은 증대시키는 방안이 필요할 것으로 생각된다. 하지만 이와 같은 평가방법은 앞으로도 지속적인 자료보완과, 요인분석의 세분화를 통해 더욱 정밀한 평가가 가능하도록 추가적인 연구가 추진되어야 할 것이며 이를 바탕으로 벼농사에 의한 수질오염방지와 벼농사의 공익적 기능증대에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

요 약

벼농사에 의한 질소가 하천수질에 미치는 영향을 종합적으로 평가하기 위해 공급 질소의 유입량과 유출 및 이용되는 양은 동일하다는 질소 balance 개념 평가기법을 개발하였다. 유입량과 유출량 결정에 영향을 주는 시비량, 관개수 수질, 관개량과 물이용 수지, 토양유기물 함량, 토양질소공급량, 유기물 시용여부, 이앙방법, 물관리 방법, 수확량, 암모니아 휘산 및 탈질량, 토양잔류량 등 관련요인들과 요인상호간의 관계를 자료 분석, 현지포장 및 실내실험을 통해 지수화하였으며 사용된 지수들을 종합하여 벼농사의 수질영향평가법으로 제시하였다. 질소의 총 공급량에서 대기유출, 작물이용, 토양잔류 부분을 제외한 차이를 벼농사에서 질소의 잠재유출량으로 산정하여 벼농사가 수질에 미치는 영향으로 평가하였으며, 개발된 방법으로 평가한 우리나라의 평균적인 환경 및 재배조건에서 벼농사는 수계를 통한 질소의 유입량과 유출량이 거의 균형을 이루어 주변수질에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 평가되었다. 하지만 관개수중의 질소농도가 1.0 mg L^{-1} 이하로 깨끗한 지역에서의 벼농사는 수질의 오염원으로 작용하였으며, 관개수중의 질소농도가 2.0 mg L^{-1}이고 시비량이 110 kg ha^{-1}인 조건에서는 간단관개를 할 경우는 벼농사는 수질을 정화하는 기능이 있었으나 반대로 상시담수를 할 경우는 오염원으로 작용하였다.

질소농도가 3.0 mg L^{-1}인 경우는 시비량 110 kg ha^{-1}의 조건에서는 벼농사는 수질정화의 기능이 있었지만 시비량이 120 kg ha^{-1}로 증가하면 오염원으로 작용하였으며, 관개수중의 질소농도가 6.0 mg L^{-1} 이상으로 비교적 오염된 지역에서는 시비량 120 kg ha^{-1} 까지도 벼농사는 수질을 정화하는 기능을 가지고 있는 것으로 평가 되었다. 하지만 이 같은 평가방법은 앞으로도 지속적인 자료보완과, 요인분석의 세분화를 통해 더욱 정밀한 평가가 가능하도록 추가적인 연구가 추진되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Koyama, T., Sybuya. M., Tokuyasu, M., Shimomura, T., Ide, T., and Ide, K. (1977) Balance sheet and residual effects of fertilizer nitrogen in Saga paddy field. *Proc. Int. Seminar on SEFMIA Tokyo*(20), 289-296.
2. Kolenbrander, G. J. (1981) Leaching of nitrogen in agriculture. *In nitrogen losses and surface run-off.* (ed. Brogan, J. C.) Nijhoff. 199-216.
3. Maeda K. I. (1983) Quantitative estimation of behavior of nitrogen applied to paddy field. *Bull. Natl. Agric. Res. Cent.*(1), 121-192.
4. Yoon, K. S. (1999) Study on the mechanism of organic matter turnover for modelling of pollution load estimation from paddy field. *Annual research report of Chonnan university.* 6-35.
5. Seo, M. C., Kang, K. K., Yun, H. B., and Eom, K. C. (2001) Assesment of positive function of paddy farming according to agricultural production conditions. *Annual research report of agricultural environment. NIAST.* 355-387.
6. Lim, J. N. and Oho, J. S. (1970) Survey of infiltration rate at main soil series of paddy field. *Annual research report of NIAST.* 2, 88-90.
7. Shin, C. S., Mun, J., Kim, J. G., and Kim, J. D. (1971) Survey of infiltration rate at main soil series of paddy field. *Annual research report of NIAST.* 2, 117-123.
8. Oho, J. S. and Ryu, K. S. (1972) Survey of infiltration rate at main soil series of paddy field. *Annual research report of RDA.* 218-235.
9. Roh, K. A. and Ha, H. S. (1999) Nutrient balance during rice cultivation in sandy soil affected by the fertilizer management. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 32(2), 155-163.
10. Kazumi, K. A message from Japan and Asia to the world water discussion (3rd World water Forum report). *Japanese Institute of Irrigation and Drainage.* 41.
11. Lee, K. C., Koo, J. W., and Goh, H. S. (1983) Study on the evapotranspiration requirement in paddy fields(I). *Research report of Jeonbuk university.* 14, 129-133.
12. Goh H. S. (1984) Study on the evapotranspiration requirement in paddy fields(II). *Research report of Jeonbuk university.* 15, 133~138.
13. Mizuta, K. (2001) N, P and K input by irrigation

water into paddy field of Fukuoka prefecture. *Jpn. J. Crop Sci.* 70(4), 595-598.

14. Oho, D. S., Eom, K. C., and Shin, J. S. (1994) Development of water saving technology for rice cultivation. *Annual research report of agricultural environment. NIAST.* 172
15. Lee, J. S., Kim, B. Y., Kim, J. H., and Hong, S. G. (1999) Chemical composition of rainwater in Suwon and Ansung area. *Kor. J. of Environ. Agric.* 18(2), 169-173.
16. Lee, J. S., Jung, G. B., Kim, J. H., Kim, W. I., Yun, S. G., and Im, J. C. (2001) Volume-weighted ion concentration of rainwater in Taean area. *Kor. J. of Environ. Agric.* 20(4), 284-288.
17. Lee, J. S., Kim, J. H., Jung, G. B., and Eom, K. C. (2003) Volume-weighted ion concentration of rainwater in Suwon area during farming season. *Korean J. of Agriculture and Forest Meteorology*, 5(1), 1-5.
18. Tisdale S. L., Waner, L. N., and Beaton, J. D. (1985) *Soil fertility and fertilizer (4th edition).* 125.
19. Ito, J. and Iimura, K. (1989) Amount of crude organic matter in fine grey paddy soil in Hokuriku district and its effect on nitrogen mineralization. *Jpn. J. Soil Sci. and Plant Nutr.* 60(1), 56-59.
20. Kiyoichi K. (1981) *Chemistry of soil organic matter,* second edition. Society publish center (Japanese). 199-202.
21. NIAST. (1999) *Fertilizer application recommendation for crops.* National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon, Korea.
22. Tasima, F., Tatsumoto, T., and Egashira, K. (2003) Nitrogen balance in the paddy field of the aigama-paddy cultivation. *Jpn. J. Soil Sci Plant Nutr,* 74, 15-21.
23. Toriyama K. (1996) Progress and prospect of the research on paddy soil management under various rice growing system. 1. progress in nutrient behavior and management research on paddy soil(1) nitrogen *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.* 67(2), 198-207.
24. Kim, Y. H., Yoon, J. H., and Jung, B. K. (2000) Nitrogen suppling capacity of paddy soil. *Annual research report of agricultural environment.* NIAST. 244-266.
25. Yeon B. Y. (1998) Changes of rice yield and soil properties by continuous application of chemical fertilizer and soil amendments. *Annual research report of agricultural environment.* NIAST. 451-460.
26. Roh, K. A., Kim, P. J., Kang, K. K., Ahn, Y. S., and Yun, S. H. (1999) Reduction of nutrient infiltration by supplement of organic matter in paddy soil. *Kor. J. of Environ. Agric.* 18(3), 196-203.
27. Patric, W. H. Jr. and Ready, K. R. (1997) Fertilizer nitrogen reactions in flooded soils. *Proc. Int. Seminar on SEFMIA.* Tokyo. 275-281.
28. Park, Y. H., Lee, Y., Kim, S. C., Roh, J. S., Park, K. R., and Lee, J. Y. (2004) Integrated nutrient management for rice cultivation. *Annual research report of agricultural environment.* NIAST. 404-429.
29. Yatazawa M. (1978) Agro-ecosystem in Japan. In : *Cycling of mineral nutrients in agricultural ecosystem.* Elsevier Scientific Pub. Co., Amsterdam. 167-179.
30. Hasegawa K. (1992) Studies on the behavior and balance of nitrogen in paddy field near the lake and its influence of environment especially on water quality. *Annual report of Shiga prefecture agriculture experiment station* 17, 1-164.
31. Lee, Y., Park, Y. H., and Kim., S. C. (2004) Research on gaseous nitrogen losses from agricultural soil. *Annual research report of agricultural environment.* NIAST. 477-487.
32. Jung Y. S., Ha, S. K., Cho, B. O., and Lee, H. J. (1996) Use of phosphate coated urea to decrease ammonia volatilization loss from direct seeded rice field at early stage. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 29(1), 8-14.
33. Takei Y. and Uehara., Y. (1973) Nitrification and denitrification in the surface layer of submerged soil (part 1). *Jpn. J. Soil Sci. and Plant Nutr.* 44, 463-470.
34. Shoji, S., Wada, G., Saito, K., Shinbo, I., and Takahashi, J. (1971) The fate of fertilizer nitrogen applied to the paddy field and its absorption by rice plant. II. The fate of basal nitrogen in paddy field. *Jpn. J. Crop Sci.* 40, 281-286.
35. Wada, G., Shoji, S., Takahashi, J., Saito, K., and Shinbo, I. (1971) The fate of fertilizer nitrogen applied to the paddy field and its absorption by rice plant. III. The fate of top-dressed nitrogen in the soil and its absorption by rice plant. *Jpn. J. Crop Sci.* 40, 287-293.
36. Lee, S. E., Song, Y. S., Lee, Y. J., and Lee, C. S. (1993) Change of nitrate concentration in soil with application of rice straw and the amount of chemical fertilizer. *Annual research report of agricultural*

environment. NIAST. 31.

37. Shibara H., Kawamura, M., and Kobayashi, M. (1994) Effect of rice straw application on the quality of infiltration water and soil micro-organism at paddy field. *Annual report of Shiga prefecture experimental station*. 35, 1-18.
38. Yoo, C. H., Kim, J. G., Park, K. H., and Kim, S. J. (1988) Effect of long-term organic matter application on physico-chemical properties in rice paddy soil 2. The effect of some physical properties of paddy field by the long-term application of rice straw and compost. *J. Kor Soc. Soil Sci. fert*. 21(4), 373-379.
40. RDA. (1999) *Annual report of the monitoring on agro-environmental quality*. 9.
41. RDA. (2003) *Annual report of the monitoring on agro-environmental quality*. 40.