

## 논에서의 영양물질 배출량 추정(Ⅰ) - 모형의 개발 -

### Prediction of Nutrient Loading from Paddy Fields(Ⅰ) - Model Development -

김현수\* · 정상옥\*\*

Kim, Hyeon Soo · Chung, Sang Ok

#### Abstract

The objective of this study is to develop GLEAMS-PADDY model to predict nutrients loading from paddy-field areas. This model is developed by modifying the GLEAMS model which is used for uplands, and composed of hydrology and nutrient submodels. The optimal field size for GLEAMS-PADDY model application is about up to 50 ha with mild slope, relatively homogeneous Soils and spatially rainfall, and a single crop farming.

The GLEAMS model is modified to handle ponded soil surface condition and saturated soil profile in paddy field. In the hydrology submodel of the GLEAMS-PADDY model, the ponded depth routing method is used to handle the ponded water condition of paddy field. To compute potential evapotranspiration the FAO-24 Corrected Blaney-Criddle method is used for paddy field instead of Penman-Monteith method in the GLEAMS model.

In the nutrients submodel of the GLEAMS-PADDY model, the soil was assumed saturated and soil profile in the root zone was divided into oxidized and reduced zones.

**Keywords :** Paddy field, Nonpoint source pollution, GLEAMS-PADDY, Ponded water, Surface runoff, Soil profile, Nutrients

#### I. 서 론

농업은 홍수조절, 토양침식 방지, 오염물질 제거 및 대기 정화 등의 자연환경과 생태계 유지에 큰 역할을 해온 것이 사실이다. 그러나 농촌공간에서의 도로, 철도 등 사회간접자본 시설의 확충, 공업 및 주택단지조성 등에 의해 농업·농촌은 이제 자연환경과 생태계 보전을 위한 보루의 역할을 더 이

\* 농업기반공사 농어촌연구원

\*\* 경북대학교 농과대학

\* Corresponding author. Tel.: +82-31-400-1764  
fax: +82-31-409-6055

E-mail address: kimhs@karico.co.kr

상 지속하기 어려운 실정에 처하게 되었다. 특히, 농업생산성 향상과 고소득 농작물의 재배면적 증가에 따른 비료와 농약 등 농업화학물질의 과다사용은 농업유역의 자연환경과 생태계 유지를 어렵게 하고 있는 실정이다.

벼 재배에 사용되는 비료성분은 주로 질소와 인이며, 이들은 작물에 흡수되고 토양에 흡착되며, 또한 배수로를 통해 하천으로 유출되어 호소나 저수지의 부영양화를 유발하는 주요 원인이 된다. 저수지의 부영양화는 수생 생태계 내부의 복잡한 물리적, 화학적, 그리고 생물학적인 상호작용을 통하여 각종 생물이나 수질 등 여러 가지 연쇄적인 변화를 일으켜 환경에 악 영향을 미치며 수자원 이용가치를 감소시킨다.

농경지로부터의 비점원오염 배출부하량 예측 모형에 관한 연구는 미국을 비롯한 주요 곡물생산국을 중심으로 이루어져 왔으며, 밭에서 비료와 농약의 사용에 따른 표장 단위(field-scale)에서의 비점원오염 부하량을 예측하는 CREAMS, GLEAMS, EPIC, AGNPS 등의 모형과 지하관개의 관리계통 모형인 ADAPT, DRAINMOD 모형 등이 개발되어 관련연구에 활용되고 있다.<sup>2),5),8),10),11)</sup>

미국 농무성 농업연구소(ARS)에서는 비점원오염에 따른 수질관리를 위하여 수치모형과 지리정보시스템(GIS)을 합성하는 연구가 계속되고 있으며, GLEAMS, AGNPS, EPIC, SWRRBWQ 모형을 비점원오염 부하량 추정모형으로 선정하였다.<sup>1)</sup>

국내에서도 농업유역에 사용되는 비료 및 농약에 의해 발생하는 환경오염에 대한 관심이 날로 높아짐에 따라 위에서 소개한 모형을 활용하여 우리나라 농촌유역을 대상으로하는 비점원오염에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 논을 대상으로 한 연구로는 CREAMS 모형에 논에서의 물수지와 영양물질 흐름 특성을 고려하여 CREAMS-PADDY 모형<sup>3),15)</sup>을 개발하고 적용성을 평가한 바 있으나 시작단계라 할 수 있다.

본 연구의 목적은 논에서의 물과 영양물질의 흐름

특성을 파악하고, 밭농업지대에 사용하는 GLEAMS version 3.0 모형<sup>9)</sup>을 수정·보완하여 논으로부터의 영양물질 배출부하량을 예측하기 위한 GLEAMS-PADDY 모형을 개발하는데 있다.

## II. 논에서의 물과 물질의 흐름

### 1. 논에서의 물 흐름

밭 관개는 부족한 토양수분 요구량의 보급이 주 목적이므로 그 이상의 물은 지표유출이나 지하침투를 통해 자연배출 된다. 그러나 논의 경우는 일정 범위의 담수를 통해 작물의 성장에 필요한 수분과 영양물질을 공급하는 것으로 밭과 다른 흐름특성을 지닌다.

일반적으로 논은 재배기간 중에는 짧은 낙수기간을 제외하고는 일정한 깊이로 담수되고 논 토양은 포화상태를 유지한다. 또한, 생육기별 적정한 담수심을 유지하기 위해 물꼬의 높이를 조절하며, 강우의 표면유출 또는 낙수 등에 의해 논 표면수는 유출된다.

또한, 논은 대형 농기계 작업으로 인한 담수과 경운으로 작토층 아래로 물이 쉽게 침투하지 못하는 투수성이 작은 토층인 경반이 존재하며, 경반 아래의 심토층은 지하수위의 상황에 따라 포화상태를 유지하지 못할 수도 있다.

이러한 논과 밭의 물 흐름 차이는 SCS 유출곡선 번호법과 토양함수량 조건에 따른 토양수분 저류추적기법에 의해 지표유출량과 지하침투량을 계산하는 GLEAMS 모형의 수문부모형으로는 논의 담수 상태와 토양의 포화상태 조건을 해석하는 것은 매우 어려우며, 논에서 벼 재배기간 동안 적정담수심을 고려하는 담수심 추적에 의한 물수지법의 적용이 요구된다.

논에서의 물수지는 강우량과 관개량으로 구성되는 유입량과 논 표면수의 지표유출량, 증발산량, 침투량으로 구성되는 유출량으로 계산한다.

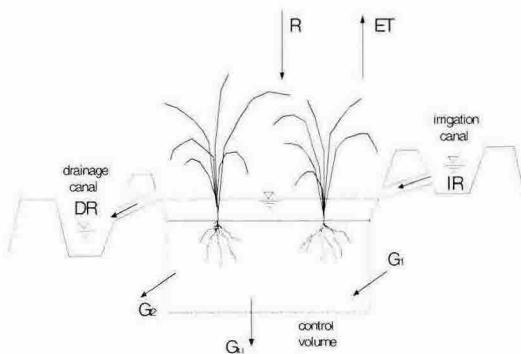


Fig. 1 Water balance components in a paddy field

일반적인 광역 논에서의 물수지 식은 다음과 같다.

$$\Delta S = (R + G_1 + IR) - (ET + G_2 + DR) \quad (1)$$

여기서,  $R$ 은 강우량,  $ET$ 는 증발산량,  $IR$  및  $DR$ 은 각각 지표수 유입량과 유출량,  $G_1$ ,  $G_2$ 는 각각 지하수 유입량과 유출량으로 이를 핵의 차( $G_1 - G_2$ )는 논의 침투량 중 지구내의 배수로나 하천 등에 유출되지 않는 심층 침투량이며,  $\Delta S$ 는 저류량의 변화이다.

## 2. 논에서의 유사 및 영양물질 이동

논 표면의 경사는 거의 수평으로, 토양유실의 요인 중 경사에 의한 영향이 없어짐으로써 물의 운동 에너지가 발생하지 않으며, 재배기간 동안 물로 채워져 있으므로 토양유실의 첫단계인 빗방울에 의한 토립자 타격과 박리작용이 미약한 것으로 판단된다. 따라서, 강우에 의한 논에서의 토양침식과 유사 이동은 밭에 비해 매우 적다. 그러나 이앙 준비 단계에서 담수상태의 써레질 작업은 비교적 다량의 토양입자 유실을 발생시킬 수 있다.

한편, 밭 토양은 대부분 산소가 공급되는 산화층으로 구성되지만, 논 토양은 벼 재배기간 동안 담수상태가 유지됨에 따라 담수 시작 후 일정기간이 지나면 대기로부터 토양내로의 산소공급이 차단되어 대략 표토층 1cm를 기준으로 산화층과 환원층으

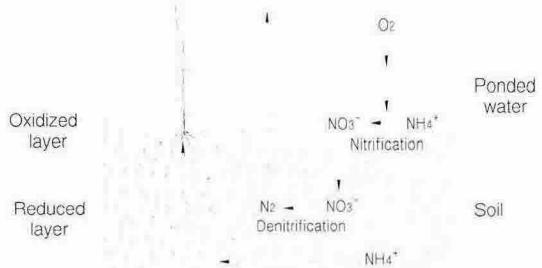


Fig. 2 Nitrification and denitrification in paddy soil

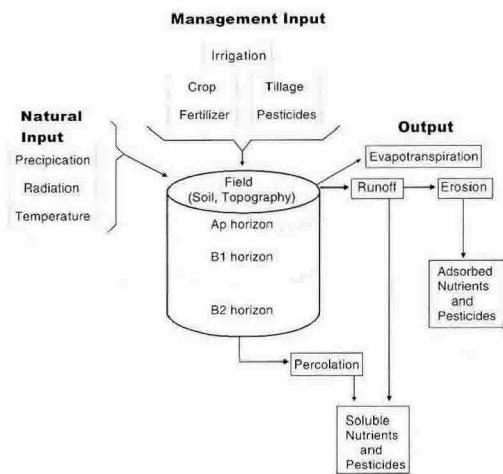
로 균군역의 토충분화가 이루어진다.<sup>14)</sup> Fig. 2는 논 토양에서 토충분화에 따른 산화층과 환원층에서의 질산화 반응과 탈질산화 반응을 나타내고 있다.

질소비료가 논 표면에 시비되면 많은 양의 질소가 산화되어 물에 녹으며, 균군역내 환원층에서는 질산성 질소의 탈질작용이 활발히 일어난다. 이는 토충의 대부분이 산화층인 밭 토양에서는 거의 발생하지 않는다.

우리나라에서 이용되는 요소 비료는 암모니아성 질소이며, 관개수 및 강우에 용해되어 유입되는 질소는 대부분 질산성 질소이다. 또한, 인은 일반적으로 물에는 잘 녹지 않으나 토립자에 강하게 흡착된다. 따라서, 담수상태 논에서 인의 농도는 질소에 비해 매우 낮으며, 토양유실량이 밭에 비해 소량이므로 지표유출에 의한 인 배출부하량은 매우 적은 수준이다.

## III. GLEAMS 모형의 개요

GLEAMS 모형은 지표유출에 의한 농업화학물질의 이동을 예측하는 CREAMS 모형을 작물의 균군 역을 통한 지하침투를 포함시켜 농업화학물질의 이동을 모의할 수 있도록 개발되었으며, 영농관리에 따른 농경지로부터 비점원오염을 평가하는데 효율

Fig. 3 Schematic of GLEAMS model<sup>9)</sup>

적인 모형이다.

Fig. 3은 GLEAMS 모형의 구성도를 나타내고 있으며, 수문, 침식, 화학물질의 3개 부모형으로 구성되어 있다. 포장에서의 관개, 작물, 비료 및 농약 등의 영농관리와 기상자료를 활용하여 지표유출량, 지하침투량, 증발산량을 계산하고, 지표유출에 따른 토양침식량, 침식토양에 흡착된 영양물질량, 그리고 지표유출과 침투수에 용해된 영양물질의 농도와 부하량을 계산한다.

### 1. 수문부모형

GLEAMS 모형의 수문부모형은 SCS 유출곡선번호법과 저류추적기법을 적용하여 지표유출량을 추정한다. 증발산량은 Penman-Monteith법으로 구한 잠재증발산 추정치에 작물계수를 곱하여 산정한다.

또한, 관개의 필요성과 공급된 관개량은 작물뿌리성장 깊이내 토층의 생장저해수분점으로부터 계산하며, 토층별 토양함수량이 위조점에 도달하면 토양함수량이 포장용수량 상태가 되도록 관개량을 계산한다.

### 2. 침식부모형

침식부모형은 강우로 인해 농경지 토양의 박리, 유사운송, 그리고 퇴적되는 과정을 추정한다. 즉, 임의의 구간에서 유사량이 운송력보다 작을 경우에는 물의 운동에너지에 의해 토양침식이 발생하고, 반대로 유사량이 운송력을 초과하는 경우에는 퇴적 한다. 침식량은 수정 USLE식, 지표유출에 의한 유사운송력은 Yalin (1963) 식을 적용한다.

### 3. 화학물질부모형

화학물질부모형은 농약과 영양물질에 대한 2개의 부문으로 구성되어 있으며, 수문부모형에서의 지표유출, 침층침투, 증발산, 근군역내의 토양함수량 등에 따른 농약 및 영양물질 흐름을 추정한다.

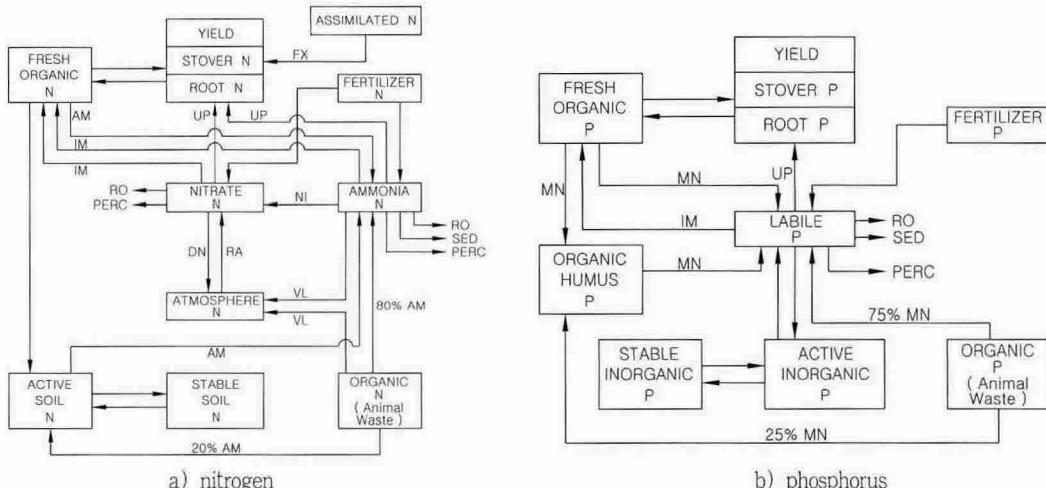
질소의 흐름과정은 작물잔류물, 토양 유기물, 가축분뇨 등의 무기화(mineralization)작용과, 부동화(imobilization) 및 탈질작용, 작물흡수, 지표유출, 침투, 토양침식 등에 의한 질소 이동을 포함하고 있으며, 암모니아성 질소와 질산성 질소 형태로만 유출되며, 유기 질소의 형태로는 유출되지 않는다.

인은 가급태 인(labile P)의 형태로 유출되며, 유기인 형태로는 유출되지 않는다. Fig. 4는 질소와 인의 흐름과정을 나타내고 있다.

### IV. GLEAMS-PADDY 모형의 개발

#### 1. GLEAMS-PADDY 모형의 개요

본 연구는 논에서의 물 흐름과 영양물질 이동 특성을 분석하였으며, GLEAMS(ver. 3.0) 모형을 수정·보완하여 논에서의 영양물질 배출부하량을 예측하는 GLEAMS-PADDY 모형을 개발하였다. 본 개발모형의 적용대상 적지로는 상류부와 하류부의 표고차가 적은 경사가 완만한 50 ha 이하의 광역논으로, 비교적 같은 종류의 토양과 공간적

Fig. 4 Schematic representation of nutrients cycle<sup>9)</sup>

으로 균일한 강우를 갖는 벼 1모작의 영농지구이다.

GLEAMS-PADDY 모형은 수분과 영양물질부모형으로 구성되며, 관개, 재배작물, 시비량 및 시비시기 등의 영농관리 조건과 강우, 기온 등의 기상조건에 따른 증발산량과 지표유출량, 그리고 영양물질 흐름을 예측하며, 토양침식에 대해서는 고려하지 않았다.

Table 1은 GLEAMS 모형의 이론 및 관련식을 근거로 GLEAMS-PADDY 모형에 교체, 보완, 개발하여 적용한 주요내용을 정리한 것이다.

GLEAMS 모형의 수문부모형에서는 지표유출량 계산에 SCS 유출곡선번호법과 저류추적기법이 적용되었으나, GLEAMS-PADDY 모형의 수문부모형에서는 논에서의 담수심 추적에 의한 물수지법이 적용되었다. 증발산량 산정방법은 우리나라 논에서 많이 사용하는 FAO-24 Corrected Blaney-Criddle법<sup>11),16)</sup>을 적용하였다.

또한, GLEAMS-PADDY 모형의 영양물질부모형은 물질흐름의 기초가 되는 토양함수조건을 포화상태 상태로 가정하였고, 산화층(표토층 1 cm)과

환원층의 토층분화를 고려하였으며, 논에서의 영양물질 순환과 표면수의 영양물질 농도 계산식을 추가하였다.

## 2. 수문부모형

### 가. 지표유출량

논에서의 지표유출량은 담수심과 물꼬 높이의 관계로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} DR_d &= W_d - OH_d & W_d > OH_d \\ DR_d &= 0.0 & W_d \leq OH_d \end{aligned} \quad \dots \quad (2)$$

여기서,  $DR$ 은 지표유출량(cm),  $OH$ 는 물꼬높이(cm)로서, 담수심( $W$ , cm)이 물꼬높이 이상일 경우 물꼬높이 이상의 양은 전량 지표유출되는 것으로 가정하였으며, 첨자  $d$ 는 일자이다.

### 나. 증발산량

GLEAMS 모형에서 잠재증발산량 산정에 사용한 Penman-Monteith법은 우리나라의 경우 농촌용수수요량조사 종합보고서<sup>13)</sup>에서 밭작물에는 이용하였

Table 1 Comparison of GLEAMS and GLEAMS-PADDY model

Item		GLEAMS	GLEAMS-PADDY	Remark
Hyd. sub- model	Runoff	· SCS curve number · Storage routing method	· Ponded depth routing method · Storage routing method	Changed Changed
	ET.	· Penman-Monteith	· FAO-24 Corrected B-C	Changed
Nut. sub- model	Soil layer	· Oxidized layer	· Oxidized and reduced layers	Modified
	SWCC	· WP, FC, SAT	· SAT	Modified
	Concen- tration	· Surface runoff	· Ponded water	Developed

B-C : FAO-24 Corrected Blaney-Criddle, ET : evapotranspiration, SWCC : soil water content condition,

WP : wilting point, FC : field capacity, SAT : saturation

으나, 논 벼에는 이용하지 않았다. GLEAMS-PADDY 모형은 FAO-24 Corrected Blaney-Criddle법(이하 B-C법)을 이용하여 기준작물 잠재증발산량을 추정하고, 농업생산기반정비사업 계획설계기준 관개편<sup>12)</sup>에 제시된 B-C법의 벼 작물 계수를 곱하여 실제 증발산량을 추정한다. 다음은 B-C법에 의한 기준작물 잠재증발산량 산정과 벼의 실제 증발산량 계산식이다.

$$Et_0 = a + b[p(0.46T + 8.13)] \quad (3)$$

$$ET = K_c \cdot E_{t0} \quad (4)$$

여기서,  $E_{t0}$ 는 기준작물 잠재증발산량( $\text{mm}/\text{d}$ ),  $a$ ,  $b$ 는 보정계수,  $p$ 는 주간시간백분율(%),  $T$ 는 평균 기온( $^{\circ}\text{C}$ ),  $ET$ 는 논 벼의 실제 증발산량( $\text{mm}/\text{d}$ ),  $K_c$ 는 작물계수이다.

#### 다. 침투량

담수상태 논의 토양함수량은 중간 낙수시의 짧은 기간을 제외하고는 포화상태이다. 침투량은 강우 또는 관개에 의해 공급된 물이 토양속으로 스며드는 양으로 논두렁 침투량과 강하 침투량으로 구분할 수 있으며, 각각의 양은 재배방식과 시기, 그리고 물관리방식에 따라 다르다. 본 연구에서는 포장

에서 관측한 침투량 측정자료를 적용하였다.

#### 라. 담수심 추적

GLEAMS-PADDY 모형에서 물수지법은 유입인자로 강우량과 관개량, 손실인자로 증발산량, 침투량, 물꼬에서의 지표유출량 등으로 구성되며, 일별 담수심 추적 식은 다음과 같다.

$$W_d = (W_{d-1} + R_d + IR_d) - (F_d + ET_d + DR_d) \quad (5)$$

여기서,  $W$ 는 담수심( $\text{cm}$ ),  $R$ 은 강우량( $\text{cm}$ ),  $IR$ 은 관개량( $\text{cm}$ ),  $F$ 는 침투량( $\text{cm}$ ),  $ET$ 는 증발산량( $\text{cm}$ ),  $DR$ 은 지표유출량( $\text{cm}$ ), 첨자  $d$ 는 일자이다.

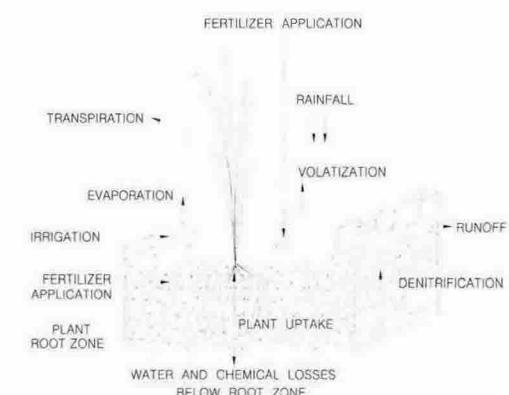


Fig. 5 Physical system of GLEAMS-PADDY model

### 3. 영양물질부모형

GLEAMS-PADDY 모형의 영양물질 부모형은 질소와 인을 다루고 있으며, 농약에 대해서는 논 벼에 대한 관련 연구자료가 미흡하여 본 연구에서는 고려하지 않았다.

논 벼의 균군역내 토층을 표토 1cm의 산화층과 표토층 아래의 환원층으로 구분하였고, 질소 유출 부하량은 산화층과 환원층에서의 질산성 및 암모니아성 질소의 농도에 의해 결정되며, 담수층내에서 영양물질의 화학적 반응은 고려하지 않는다. 인성 분은 총인에 대해서 고려하였다.

Fig. 5는 GLEAMS-PADDY 모형의 물리적체계를 나타내고 있으며, 논으로의 비료 성분은 시비, 강우 및 관개수에 용해되어 유입되고, 지표유출, 증발산, 침투, 탈질 등에 의해 유출된다.

#### 가. 질소의 흐름

GLEAMS-PADDY 모형에서는 질소 흐름을 질산성 질소와 암모니아성 질소로 구분하며, 질소수식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} NO_3_d = & (NO_3_{d-1} + NIT_d + RFNO_d + IRNO_d) \\ & - (DNI_d + RONO_d + PERCNO_d) \\ & + UPNO_d \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} NH_4_d = & (NH_4_{d-1} + FENH_d + MN_d) \\ & - (NIT_d + RONH_d + PERCNH_d) \\ & + UPNH_d \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,  $NO_3$ 는 질산성 질소량(kg/ha),  $NIT$ 는 질산화량(kg/ha),  $RFNO$ ,  $IRNO$ 는 각각 강우 및 관개수에 용해된 질산성 질소량(kg/ha),  $DNI$ 는 탈질량(kg/ha),  $RONO$ ,  $PERCNO$ 는 각각 질산성 질소의 지표유출량 및 지하침투량(kg/ha),  $UPNO$ 는 작물의 질산성 질소 흡수량(kg/ha),  $NH_4$ 는 암모니아성 질소량(kg/ha),  $FENH$ 는 암모니아성 질소의 시비량(kg/ha),  $MN$ 은 암모니아화량(kg/ha),  $NIT$ 는 암모니아성 질소의 질산화량(kg/ha),  $RONH$ ,  $PERCNH$ 는 각각 암모니아성 질소의 지표유출량과

지하침투량(kg/ha),  $UPNH$ 는 작물의 암모니아성 질소 흡수량(kg/ha)이며, 첨자  $d$ 는 일자이다.

#### 1) 무기화

GLEAMS 모형의 균군역내 토층에서의 무기화 과정은 토양함수량과 토양온도 등에 영향을 받으며, 토양함수량이 포화상태이거나 토양온도가 0°C 이하 일 때는 무기화 반응은 발생하지 않는 것으로 가정한다.

GLEAMS-PADDY 모형은 산화층에서의 질산화량을 다음과 같이 계산한다.

$$NIT = \frac{(TFN)(SWFN)}{SOILMS} \quad (8)$$

여기서,  $NIT$ 는 질산화량(kg/ha),  $TFN$ 는 토양온도인자,  $SWFN$ 는 토양함수량인자,  $SOILMS$ 는 토양 중량(t/ha)이며, 토양함수량인자는 포화함수량 상태를 고려하여 1.0으로 가정하였다.

#### 2) 표면수의 질소농도와 지표유출부하량

질소성분의 유입은 시비에 의한 암모니아성 질소, 강우 및 관개수에 용해되어 유입하는 질산성 질소로 구분하며, 암모니아성 질소는 시비되면 산화층의 물에 용해되거나 토양에 흡착되고, 강우 및 관개수가 논에 담수되면 산화층의 물에 용해된 질소와 희석되는 것으로 가정하였다. 이렇게 유입된 질소는 논 표면수의 지표유출과 침투에 의해 배수로와 균군역 아래로 유출된다.

산화층의 질산성 질소는 토양에 흡착되지 않고 물에 완전히 용해되어 이동하므로 분배계수  $K_d$ 는 0이고 추출계수는 0.5이다. 산화층의 물에 용해된

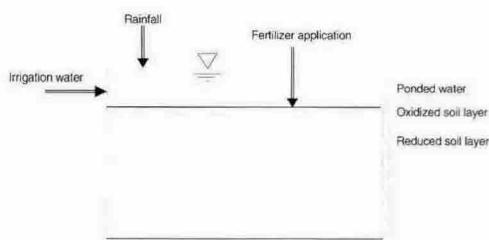


Fig. 6 Nutrients input to the paddy field

질산성 질소와 암모니아성 질소 농도는 다음과 같다.

$$CNO3W = 0.5 \frac{(SNO3)10^3}{SOILMS} \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

$$CNH4W = \left[ \frac{AMON10^3}{SOILMS} \right] \exp \left[ \frac{-(F - Abst)}{CNHKD \left( \frac{1 - POR}{2.65} \right) + POR} \right] \left[ \frac{\beta}{1 + \beta CNHKD} \right] \dots \dots \dots \quad (10)$$

여기서,  $CNO3W$ 는 산화층의 물에 용해된 질산성 질소 농도( $\text{mg/l}$ ),  $SNO_3$ 는 질산성 질소량( $\text{kg/ha}$ ),  $SOILMS$ 는 토양중량( $\text{t/ha}$ ),  $CNH4W$ 는 산화층의 물에 용해된 암모니아성 질소 농도( $\text{mg/l}$ ),  $AMON$ 은 암모니아성 질소량( $\text{kg/ha}$ ),  $F$ 는 침투량( $\text{cm}$ ),  $Abst$ 는 초기차단량( $\text{cm}$ ),  $POR$ 은 토양 공극률,  $CNHKD$ 는 암모니아성 질소의 분배계수,  $\beta$ 는 추출계수로 분배계수의 함수이며, 암모니아성 질소의 분배계수는 토양에 포함된 점토함량의 함수이다.

논 표면수의 질산성 질소 농도는 표면수, 산화층의 물, 관개수 및 강우에 용해된 질산성 질소 농도를 가중 평균하여 계산하며, 관개수 및 강우에는 암모니아성 질소가 용해되지 않으며, 산화층의 물에 용해된 암모니아성 질소가 관개수 및 강우에 희석되는 것으로 가정하였다. 논 표면수의 질산성 및 암모니아성 질소 농도는 다음과 같이 계산한다.

$$PN03W_d = \frac{(PNO3W_{d-1} \times W_{d-1}) + (CNO3W_d \times POR \times D)}{W_{d-1} + (POR \times D) + IR_d + R_d} + (CNO3IR_d \times IR_d) + (CNO3R_d \times R_d) \dots \dots \dots \quad (11)$$

$$PNH4W_d = \frac{(PNO3W_{d-1} \times W_{d-1}) + (CNH4W_d \times POR \times D)}{W_{d-1} + (POR \times D) + IR_d + R_d} \dots \dots \dots \quad (12)$$

여기서,  $PNO3W$ ,  $CNH4W$ 는 논 표면수의 질산

성 및 암모니아성 질소 농도( $\text{mg/l}$ ),  $CNO3W$ ,  $CNH4W$ 는 산화층의 물에 용해된 질산성 및 암모니아성 질소 농도( $\text{mg/l}$ ),  $CNO3IR$ ,  $CNO3R$ 은 관개수 및 강우의 질산성 질소 농도( $\text{mg/l}$ ),  $POR$ 은 산화층 공극률,  $D$ 는 산화층 두께( $\text{cm}$ ),  $W$ 는 담수심( $\text{cm}$ ),  $IR$ 은 관개량( $\text{cm}$ ),  $R$ 은 강우량( $\text{cm}$ )이며, 첨자  $d$ 는 일자이다.

질소의 지표유출부하량은 다음과 같다.

$$RON03 = 0.1(PNO3W)(DR) \dots \dots \dots \quad (13)$$

$$RONH4 = 0.1(CNH4W)(DR) \dots \dots \dots \quad (14)$$

여기서,  $RON03$ ,  $RONH4$ 는 질산성 및 암모니아성질소의 지표유출부하량( $\text{kg/ha}$ ),  $PNO3W$ ,  $CNH4W$ 는 논 표면수의 질산성 및 암모니아성 질소 농도( $\text{mg/l}$ ),  $DR$ 는 지표유출량( $\text{cm}$ )이다.

### 3) 침투수의 농도와 침투부하량

근군역내 각 토층별 침투량은 동일한 것으로 가정하였으며, 일 단위로 각 토층의 질소 수지를 계산한다. 토층별 침투부하량은 다음과 같이 계산한다.

$$INFNO3_i = 0.1(CNO3W_{i-1})(F) \dots \dots \dots \quad (15)$$

$$INFNH4_i = 0.1(CNH4W_{i-1})(F) \dots \dots \dots \quad (16)$$

여기서,  $INFNO3$ ,  $INFNH4$ 는 아래 토층으로의 침투부하량( $\text{kg/ha}$ ),  $CNO3W$ ,  $CNH4W$ 는 각 토층의 물에 용해된 질산성 및 암모니아성 질소 농도( $\text{mg/l}$ ),  $F$ 는 침투량( $\text{cm}$ )이며, 첨자  $i$ 는 토층번호이다.

근군역의 마지막 토층을 통과하면 근군역 아래로의 심층침투부하량(용탈)이 발생하는 것으로 가정하였다.

### 4) 탈질량

탈질작용은 근군역내 환원층에서 발생하며 토양함수량이 포장용수량을 초과할 때 혐기성 미생물에 의해 질소가스로 변화하여 대기중으로 방출되는 것으로 토양함수량인자와 토양온도인자, 유기질탄소의 반응속도인자에 의해 식 (17)과 같이 계산하며,

토양함수량인자를 토양함수량이 포화상태인 1.0으로 가정하였다. 탈질량은 발생당일 각 토층의 질산성 질소로부터 감해진다.

$$DNI_i = SNO3_i \{1 - \exp[-(DK_i)(TFDN_i)(SWFD_i)]\} \quad (17)$$

여기서,  $DNI$ 는 탈질량(kg/ha),  $SNO3$ 는 토층내 질산성 질소량(kg/ha),  $DK$ 는 부식비,  $TFDN$ 은 토양온도인자,  $SWFD$ 는 토양함수량인자이며, 첨자  $i$ 는 토층번호이다.

### 5) 작물의 질소 흡수량

작물의 질소 흡수량(uptake)은 작물의 잠재엽면 적지수, 잠재생산량, 증산량에 따른 각 토층별 질소요구량에 근거하여 생육시기별 질소요구량과 증산량을 각 토층별로 나누어 계산한다.

$$UPNO_i = 0.1(CNO3W_i)(TR_i) \quad (18)$$

$$UPNH_i = 0.1(CNH4W_i)(TR_i) \quad (19)$$

여기서,  $UPNH$ ,  $UPNO$ 는 작물의 질산성 및 암모니아성 질소 흡수량(kg/ha),  $CNO3W$ ,  $CNH4W$ 는 각 토층의 물에 용해된 질산성 및 암모니아성 질소 농도(mg/l),  $TR$ 은 증산량(cm)이며, 첨자  $i$ 는 토층 번호이다.

### 나. 인의 흡수

인은 물에 잘 용해되지 않으며 토양 흡착력이 강한 성질을 지니고 있다. 논에서의 인 수지 식은 다음과 같다.

$$TP_d = (TP_{d-1} + FEP_d + MN_d) - (ROLP_d + PERCLP_d + UPP_d) \quad (20)$$

여기서,  $TP$ 는 총인량(kg/ha),  $FEP$ 는 인의 시비량(kg/ha),  $MN$ 은 무기화량(kg/ha),  $ROLP$ 는 인의 지표유출량(kg/ha),  $PERCLP$ 는 인의 침투량(kg/ha),  $UPP$ 는 작물의 인 흡수량(kg/ha)이며, 첨자  $d$ 는 일자이다.

1) 논 표면수의 농도와 지표유출 부하량  
산화층의 물에 용해된 인 농도는 다음과 같다.

$$CPLABW_d = \frac{(C_{av})(CPKD)\beta}{1 + (CPKD)\beta} \quad (21)$$

여기서,  $CPLABW$ 는 산화층의 물에 용해된 인 농도(mg/l),  $CPKD$ 는 인의 분배계수,  $\beta$ 는 인의 추출계수로 분배계수와의 합수로 계산하며, 첨자  $d$ 는 일자이다.

또한, 논 표면수의 인 농도는 다음과 같이 계산 한다.

$$PPLABW_d = \frac{(PPLABW_{d-1} \times W_{d-1}) + (CPLABW_d \times POR \times D)}{W_{d-1} + (POR \times D) + IR_d + R_d} \quad (22)$$

여기서,  $PPLABW$ 는 논 표면수의 인 농도(mg/l),  $CPLABW$ 는 산화층의 물에 용해된 인 농도(mg/l),  $POR$ 은 산화층 공극률,  $D$ 는 산화층 두께(cm),  $IR$ 은 관개량(cm),  $R$ 은 강우량(cm)이며, 첨자  $d$ 는 일자이다.

또한, 인의 지표유출부하량은 식 (23)으로 계산 한다.

$$ROLP = 0.1(PPLABW)(DR) \quad (23)$$

여기서,  $ROLP$ 는 인의 지표유출부하량(kg/ha),  $PPLABW$ 는 논 표면수의 인 농도(mg/l),  $DR$ 은 지표유출량(cm)이다.

### 2) 침투수의 인 농도와 침투 부하량

근군역으로부터의 심층 침투수의 인 침투부하량은 다음과 같다.

$$INFP_i = 0.1(CPLABW_{i-1})(F) \quad (24)$$

여기서,  $INFP$ 는 인의 침투부하량(kg/ha),  $CPLABW$ 는 각 토층의 물에 용해된 인 농도(mg/l),  $F$ 는 침투량(cm)이며, 첨자  $i$ 는 토층번호이다.

### 3) 작물의 인 흡수량

작물 생육시기별 인 요구량은 질소 대 인 비를

고려하여 계산한다.

이상의 내용에서와 같이 GLEAMS-PADDY 모형의 영양물질 부모형은 GLEAMS 모형에 포함된 영양물질의 다양한 흐름 요소들 중 논 토양과 논 표면수 및 침투수의 일반적인 영양물질 흐름 특성을 고려하였다.

#### 4. 입출력 자료

GLEAMS-PADDY 모형의 입력자료는 수문 및 영양물질부모형의 매개변수 파일과 기상자료, 관개량, 침투량 등의 데이터 파일이다.

작물에 대한 매개변수는 엽면적지수, 잠재생산량, 탄소대질소비, 질소대인비, 작물 최대높이 등이 포함되며, 이들은 모형에 데이터베이스화 되어 있다.

데이터 파일은 수문부모형에 적용되고 일별로 작성되며, 강우, 기온, 기타 기상자료 등의 데이터 파일로 구성되어 있다.

GLEAMS-PADDY 모형의 모의결과 출력자료는 수문부모형에 의한 증발산량 및 지표유출량과 영양물질부모형에 의한 질소와 인의 논 표면수 및 침투수의 농도, 지표유출 및 침투부하량, 탈질량, 작물흡수량 등에 대한 일별 자료가 포함된다. 또한, 이들 자료는 강우별, 월별, 년별 및 여러해 동안의 합계 등으로 출력 가능하다.

#### V. 결 론

본 연구에서는 벼 논에서의 물과 영양물질 흐름 특성을 파악하고 밭지대에 적용하는 GLEAMS 모형을 수정·보완하여 논지대에 적용 가능한 GLEAMS-PADDY 모형을 개발하였으며 그 내용을 요약하면 다음과 같다.

1. GLEAMS-PADDY 모형의 수문부모형은 GLEAMS 모형의 SCS 유출곡선번호법과 저류추적기법을 담수심 추적에 의한 물수지법으로 수정하였으며, 증발산량 산정방법은 밭작물에 이용하는

Penman-Monteith법을 우리나라 논 벼에 많이 사용하는 FAO-24 Corrected Blaney-Criddle법을 적용하였다.

2. 영양물질 부모형은 물질흐름의 근거가 되는 토양함수조건을 포화상태로 가정하였고, 균군역내 토층을 산화층(표토층 1cm)과 환원층으로 구분하였으며, 논에서의 영양물질 순환과 논 표면수 및 침투수의 영양물질 농도 계산식을 추가하였다.

3. GLEAMS-PADDY 모형은 시비시기 및 시비량과 관개용수의 물질농도 조건에 대한 논에서의 영양물질 배출부하량을 예측하고, 영양물질 배출부하량 저감 방안을 검토하는데 그 활용성이 있을 것으로 판단된다.

GLEAMS-PADDY 모형의 적용성과 활용성을 높이기 위한 추가적인 연구 분야로는 GLEAMS 모형에 포함된 논에서의 침식부모형과 화학물질부모형의 농약부문 적용에 대한 연구이다. 또한, 영양물질 배출부하량에 영향을 미치는 다양한 인자의 개발과 적용에 관한 연구도 필요한 것으로 판단된다.

#### References

1. Allen, R. G. and W. O. Pruitt, 1992. FAO-24 reference evapotranspiration factors. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE. 117(5) : 758~773.
2. Anderson, D. L. and E. G. Flagg, 1995. Agricultural best management practices and surface water improvement and management. *Water Science & Technology*, 31 : 109~116.
3. Chin, Young Min, Seung Woo Park, Sang Min Kim, Moon Sung Kang and Min Goo Kang, 2002. Nutrient loads estimation at paddy field using CREAMS-PADDY model. *Journal of the Korean Society of Rural Planning*, 8(1) : 60~68. (in Korean)
4. Chung, Sang Ok, 1996. Effects of agricultural drainage on surface and ground

- water quality. *Journal of the Korean National Committee on Irrigation and Drainage* 3(2) : 20~35. (in Korean)
5. Chung, S. O., A. D. Ward, and C. W., Schalk, 1992. Evaluation of the Hydrologic component of the ADAPT water management model. *Trans. Amer. Soc. Agric. Engrs.* 35(2) : 571~579.
  6. Kim, Hyeon Soo, 2002. Development of A Model for Nutrients Loading from Paddy fields. Ph.D. Diss. : Kyungpook National University. (in Korean)
  7. Knisel, W. G. (ed), 1993. GLEAMS : *Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems Version 2.10*. UGA-CPES-BAED, PUB. No. 5.
  8. Knisel, W. G. (ed.) 1980. CREAMS: *A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems*. USDA Conservation Research Report Number 26.
  9. Knisel, W. G. and F. M. Davis, 2000. *GLEAMS Version 3.0 User Manual*. USDA-ARS-SEWRL, Tifton, Georgia. Pub. No. SEWRL-WGK/FMD-050199.
  10. Leonard, R. A. and W. G. Knisel, 1989. Groundwater Loadings by Controlled-Release : A GLEAMS simulation. *Trans. Amer. Soc. Agric. Engrs.* 32 : 1915~1922.
  11. Leonard, R. A., W. G. Knisel, and D. A., Still, 1987. GLEAMS : Groundwater Loading Effects of Agricultural Management System. *Trans. Amer. Soc. Agric. Engrs.* 30 : 1403~1418.
  12. M. A. F., 1998. *Planning and design standard of agricultural infrastructure improvement project (Irrigation part)*. Seoul, Korea. (in Korean)
  13. M. A. F., 1999. *Integrated paper of demand water quantity survey of rural water*. Seoul, Korea. (in Korean)
  14. Oh, Wang Guin, Jun Kyu Park, 1982. *Paddy soil and fertilization*. Kari Reserch Group, Seoul, Korea. (in Korean)
  15. Seo, Chun Suk, Seung Woo Park, Sang Jun Im, Kwang Sik Yoon, Sang Min Kim, Moon Sung Kang, 2002. Development of CREAMS-PADDY model for Simulating Pollutants from Irrigated Paddies. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 44(3) : 146~156. (in Korean)
  16. Skaggs, R. W. and J. D. Gregory, 1995. Comparision of methods for Estimating REF-ET. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE. 121(6) : 427~435.