

# CREAMS-PADDY 모형을 이용한 논에서의 영양물질 부하 추정

## Nutrient Loads Estimation at Paddy Field Using CREAM-PADDY Model

진영민\* · 박승우\*\* · 김상민\*\*\* · 강문성\*\*\*\* · 강민구\*\*\*

\*삼안건설기술공사 · \*\*서울대학교 농공학과 · \*\*\*서울대학교 농공학과 대학원 ·  
\*\*\*\*서울대학교 PostDoc.

Chin, Young-Min · Park, Seung-Woo · Kim, Sang-Min ·  
Kang, Moon-Sung · Kang, Min-Goo

### ---ABSTRACT---

A Modified CREAMS model, CREAMS-PADDY was developed to simulate the hydrology and nutrient transport at an irrigated rice paddy. The hydrology at a paddy was simulated by a daily water balance routine which reflects daily inflow, outflow, and water level changes. The soil erosion was simulated using modified USLE. The nutrient transport for total nitrogen and phosphorus were depicted for various phases of each constitute such as extraction, percolation, mineralization, and plant uptakes. Field monitoring was conducted to investigate the water quality changes at a paddy field at three times a week during the growing season of 1996. The proposed model simulates the water quality of the paddy reasonably well, and is found to be applicable to field conditions.

## 1. 서론

농경지로부터의 비점원 오염은 부하형태가 다양하고 복잡하여 주위영향을 크게 받아 정확한 부하량이나 부하양상을 구명하기 어렵다. 특히, 논은 영양물질을 정확시키는 자정작용이 있는 측면과, 논은 유출수에 비료분이 많아 영양염류에 의한 수질오염원이 되는 양면성이 있는 것으로 알려져 있다. 농경지의 비점오염은 점원오염과는 다르게 봄, 여름에 주로 부하되므로 연간변동률이 크고, 경우에 따라서는 점원보다 비점원에서의 영양물질 부하량이 크기 때문에 유역의 종합적인 수질관리 및 수질예측을 위해서는 이러한 영양물질 부하량의 정성적 및 정량적 분석이 요구된다.

논에서의 물질순환에 대한 연구는 대부분 일본과 우리나라에서 이루어지고 있으며 우리나라의 경우 논에

서의 비점오염 부하량을 파악한 연구는 있으나 그 기작을 규명하여 모형화한 연구는 아직까지 행해지지 않았다.

국내의 논에서의 영양물질의 부하에 관한 연구로는 홍 등 (1989)<sup>10)</sup>과 신 (1990)<sup>5)</sup>이 경기도 화성군에서 농경지에서의 질소와 인의 유출에 관하여 조사 분석한 바가 있으며, 김 (1993)<sup>3)</sup>은 경기도 이천의 농업유역에 대한 오염원에 따른 수질오염 특성과 유달을 등에 관해 연구한 예가 있다.

일본의 경우는 國松 (1989)<sup>12)</sup>이 일본의 통계자료로부터 논에의 물질수지의 평균치를 발표하였고, Mori (1990)<sup>33)</sup>가 논에서의 질소와 인 이동기작을 파악하여 부하량을 구하는 등 많은 연구가 행해져왔다.

외국의 경우 밭의 물질순환기작을 규명하기 위해 많은 연구가 이루어져 왔으며, CREAMS (Knisel, 1980)<sup>23)</sup>, GLEAMS (Knisel, 1993), EPIC (Williams

등, 1984)<sup>34)</sup>과 같은 물질순환 기작을 모형화한 수질모형들이 개발되어 왔다. 하지만, 경작체계가 다른 이유로 논에 대한 영양물질의 물질순환에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다. 또한, 기존의 농업비점오염 모형들은 담수관개를 실시하는 논의 수문과정을 고려하지 않으며, 미국이나 유럽등의 농업유역을 대상으로 개발되고 있기 때문에, 우리나라 유역에 대한 적용성 분석에서는 모형의 매개변수를 보정하여 논에 관한 조건을 모의발생하였다. 그러나, 이러한 모의발생 결과는 실제 상황에 대한 재현에 어려움이 클 뿐만 아니라, 영농 조건의 변화에 따른 비점오염량의 추정에 한계가 있는 것이 사실이다.

따라서, 논 수문과정과 물질순환 기작을 고려한 비점오염 배출량 추정모형의 개발이 필요하다. 본 연구는 포장단위의 농업비점오염 모형인 CREAMS 모형을 근거로 하여 논 물수지 및 물질수지를 고려한 CREAMS-PADDY 모형을 구성하였다. 개발된 모형은 시험포장에서의 모니터링 결과와 비교 검토하여 검증하고, 다양한 수질관리 대안에 대한 배출량의 변화를 비교하도록 하였다. 즉, 본 연구의 목적은 수도의 생육기간 동안 논에서의 물질순환을 모니터링하여 각 요소가 갖는 시기별 농도를 조사하여 유출부하 특성을 살펴보고, 모니터링을 통해 얻은 실측치와 CREAMS-PADDY 모형의 모의발생치를 비교하여 모형을 검증하며, 모형을 이용해 단위면적당 총질소 및 총인의 배출부하량을 산정하는 데 있다.

## II. CREAMS-PADDY 모형의 개발

### 1. CREAMS 모형

CREAMS (Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Management System) 모형은 미농무성에서 개발된 모형으로 폭우사상에 대한 단기 모의 발생과 일강우량 자료로부터 장기 모의발생을 실시할 수 있으며, 수문, 토양 침식 및 화학물질 등의 성분으로 구성되어 있다 (Knisel, 1980). CREAMS 모형은 포장규모에서의 장기간의 유출 및 유사량을 추정하기 위한 모형이다. 여기서의 포장이란 1) 한 가지의 토지이용 형태, 2) 비교적 균일한 토양, 3) 공간적으로 균일한 경우, 4) 균일한 영농형태 등을 갖는 관리 단위를 말한다. CREAMS 모형을 수정하여 유역

에 적용할 수 있게한 SWRRB 모형과 지하수 부분을 보완한 GLEAMS 모형 등이 개발되어 사용되고 있다. CREAMS 모형은 농경지로부터 비료물질 배출량을 모의할 수 있는 수질관리 모형의 시초로서, 영농방법에 따른 비점 오염의 변화를 추정할 수 있다.

CREAMS 모형은 기상수문자료, 토양, 경종, 시비량 등 영농관리자료를 바탕으로 포장에서의 유출, 토양유실, 비료물질의 부하량을 계산한다. 일별 유출과 비료물질 배출량의 추정에서는 깊이 1cm의 얇은 지표층과의 상호관계를 고려하며 작물의 근근역은 포함하지 않으며 지표면 이하의 침투수에 따른 물질이동은 고려하지 않는다.

### 2. CREAMS-PADDY 모형의 개요

CREAMS 모형의 수문과정은 관개 논에서의 경우에 적용이 어렵고, 또한 농업화학물질에 있어서도 담수상태의 기작을 표현하는데 한계가 있다. 따라서, 논 수문과정과 물질순환 기작을 고려한 비점오염 배출량 추정모형의 개발이 필요하며, 본 연구에서는 포장단위의 농업비점오염 모형인 CREAMS 모형을 기반으로 하여 논 물수지 및 물질수지를 고려한 CREAMS-PADDY 모형을 개발하였다.

본 연구에서는 CREAMS 모형의 수문모형을 논의 조건에 맞도록 수정하고, 담수상태에서의 물질운송기작을 포함하도록 하였으며, 그 밖의 입력과 출력 등의 기능은 그대로 보전하도록 하였다. 이와 같은 수정은 CREAMS 모형의 입력자료를 최소한으로 보완하도록 하여 CREAMS 모형과 호환되도록 하기 위함이다.

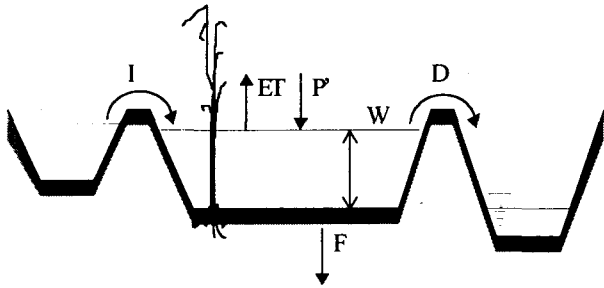
#### 가. 논에서의 물수지

논에서의 일별 담수심은 강우량, 증발산량, 관개량, 유출량, 침투량 등에 의해 좌우된다. <그림 1>은 관개수로, 포장, 배수로에서의 수문과정을 도식화한 것으로서, 담수심  $W$ 는 다음 식 (1)과 같은 물수지식으로 표시할 수 있다.

$$W_{j+1} = W_j + I_j + P_j - (D_j + ET_j + F_j) \quad (1)$$

여기서,  $I$  = 관개량,  $P$  = 일강우량,  $D$  = 유출량,  $ET$  = 증발산량,  $F$  = 침투량,  $W$  = 담수심이다. 첨자  $j$ 는  $j$ 일을 나타낸다.

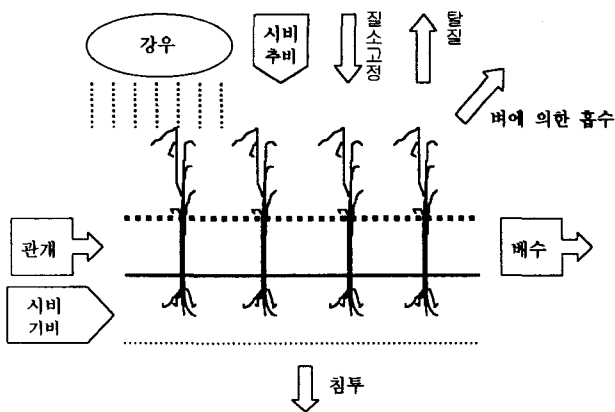
#### 나. 논에서의 질소수지



〈그림 1〉 논에서의 물수지

논에서의 질소 순환은 강우나 관개수에 용해되어 유입되거나, 비료 등에 의해 투입되고 침투, 탈질, 작물의 섭취등에 의해 유실되며, 담수에 용해되어 유출과 함께 하류로 흘러나온다. 이 중 관개량, 강우량의 농도는 실측치나 문헌 등에서 나타난 평균값을 적용할 수 있으므로, 논 물수지 요소 중 담수심과 침투, 유출 등의 기작에 따른 물질순환기작을 고려하도록 하였다.

위에서 설명한 기작들의 입출력을 그림으로 나타내면 〈그림 2〉와 같다. 〈그림 2〉에서와 같이 단위 논으로 들어오는 질소의 입력값은 시비량, 강우량, 관개량, 질소고정 등이며 출력값은 작물의 흡수, 탈질, 침투, 지표배출 등이다. 이 중 질소고정량은 상대적으로 적은 값으로 생각되어 기작에 포함되지 않았다. 질소의 영양물질 순환기작은 담수농도의 변화, 토양의 유기질소량, 탈질량, 작물의 질소흡수량, 질소 침투량등을 포함하고 있다.



〈그림 2〉 논에서의 질소 입출력

강우와 관개에 의해 유입된 물에 의해 수용성 영양물질은 토양 속으로 침투, 담수 혹은 배출되게 된다. 이 중 토양표면의 약 1 cm 정도가 근근역으로의 침투나 담수로의 영양물질 추출등의 영양물질 기작이 일어나는 활성 구역이다.

담수로 추출되는 수용성 질소량 (RON)과 근근역으로의 질소침투량 (DWN)은 다음과 같이 계산된다.

$$RON = \overline{C_n} \times EXKN \times PDEPTH \times 0.01 \quad (2)$$

$$DWN = \overline{C_{n1}} \times EXKN_1 \times F \times 0.01 \quad (3)$$

여기서,  $\overline{C_n}$ ,  $\overline{C_{n1}}$  = 담수중의 평균농도, 침투중의 평균농도, EXKN, EXKN1 = 추출계수, PDEPTH = 담수심, F = 유효 침투량이다.

토층에서 담수로 이동하는 질소량을 예측하기 위해서는 추출계수와 초기농도의 두 가지 입력값이 필요하다. 질소의 경우에는 이 외에 광물질화, 작물흡수, 질소 침투, 탈질 등의 질소기작을 위한 변수가 필요로 하게 된다.

광물질화 (mineralization)는 유기태질소를 질산염으로 변화시키는 기작을 뜻하며, 온도와 토양수분 조건에 좌우되며 광물질화 되는 질소량은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$MN = POTM * WK * (1 - \exp(-TK * DAYS)) \quad (4)$$

여기서, MN = 광물질화 질소량 (kg/ha), POTM = 토층속의 광물화가능 질소량으로 온수상수 TK와 수분상수 WK는 다음 식으로 계산된다.

$$TK = \exp(15.807 - 6350/TA) \quad (5)$$

$$WK = AWC/FC \quad (6)$$

여기서, TK = 온도상수, TA = Kelvin 온도, WK = 수분상수, FC = 포장용수량 (mm<sup>3</sup>/mm<sup>3</sup>), AWC = 평균수분체적함량이다.

작물성장은 근근역에서 질산염을 제거하는 가장 중요한 기작이다. 좋은 기상조건과 경작조건에서는, 대부분의 근근역내 질산염은 작물에 의해 흡수된다. 작물흡수량은 수분장력을 감소시키는 평균확률곡선 (S shaped)을 따른다고 가정하였다. 식 (7) ~ 식 (9)에서 계산된 매개변수를 이용하여 식 (10)과 같이 작물흡수량을 산정한다.

$$PUN = 1 - 1/2(S)^{-4} \quad (7)$$

$$S = 1.0 + 0.196854X + 0.115194X^2 + 0.000344X^3 + 0.01957X^4 \quad (8)$$

$$X = (T - M)/SD \quad (9)$$

여기서, PUN = T일동안 작물의 잠재질소흡수량, M = 연흡수량의 50% 흡수에 필요한 일수, SD = 50% ~ 84% 까지의 흡수에 필요한 일수이다.

$$UN = (PUN - PPUN) * PU * TR \quad (10)$$

여기서, PU = 작물의 연간 잠재질소흡수량 (kg/ha), TR = 실제증산량과 잠재증산량의 비, PPUN = 이전단계의 질소흡수량, UN = 작물질소흡수량 (kg/ha) 이다.

근근역 이하로의 질소침투량은 근근역으로부터의 침투수량에 근근역내의 질소량을 곱한 값이다.

$$NL = NO3 * PERC / (PERC + RZC) \quad (11)$$

여기서 NL = 질소침투량 (kg/ha), RZC = 근근역내의 잔류수량, NO3 = 근근역내의 질소량 (kg/ha), PERC = 침투수량 (mm)이다.

토양의 혐기성상태에서는, 질산염이 질소가스로 변화한다. 이 기작은 유기탄소, 온도 그리고 수분의 일차반응식으로 나타난다.

토양내의 탄소량은 유기질량으로부터 계산되며 다음식과 같다.

$$SC = OM / 0.1724 \quad (12)$$

여기서, SC = 토양 1g당 탄소량 (mg), OM = 유기

질량 (%)이다.

35℃에서의 비례상수 DK는 다음 식과 같이 계산된다

$$DK = 24 * (0.011 * SC + 0.0025) \quad (13)$$

여기서, DK = 비례상수 (day<sup>-1</sup>)이다.

온도에 대해 보정한 비례상수 (DKT)는 다음과 같다.

$$DKT = \exp(0.0693 * ATP + DB) \quad (14)$$

$$DB = \ln DK - 2.4255 \quad (15)$$

여기서, ATP = 평균온도이다.

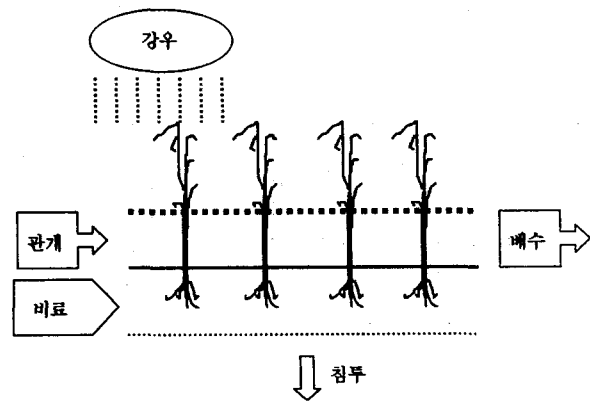
탈질량 (DNI)는 다음과 같이 계산된다.

$$DNI = NO3 * (1.0 - \exp(-DKT * (DT - 0.5))) \quad (16)$$

여기서, NO3 = 근근역내의 질산염량 (kg/ha), DT = 계산일수이다.

#### 다. 논에서의 인수지

논에서의 인 순환은 특별한 순환기작을 가지지 않고 토양에 흡착되거나 유출수와 함께 배출되기 때문에, 질소와는 달리 담수농도의 변화에 대해서만 고려하고 있다. <그림 3>에서와 같이 단위논으로 들어오는 인의 입력값은 시비량, 강우량, 관개량 등이며 출력값은 침투, 지표배출 등이다.



<그림 3> 논에서의 인 입출력

질소와 마찬가지로, 수용성 인량 (ROP)와 침투 인량 (DWP)는 다음과 같이 계산된다.

$$ROP = \overline{C_p} \times EXKP \times PDEPTH \times 0.01 \quad (17)$$

$$DWP = \overline{C_{pl}} \times EXKP_1 \times F \times 0.01 \quad (18)$$

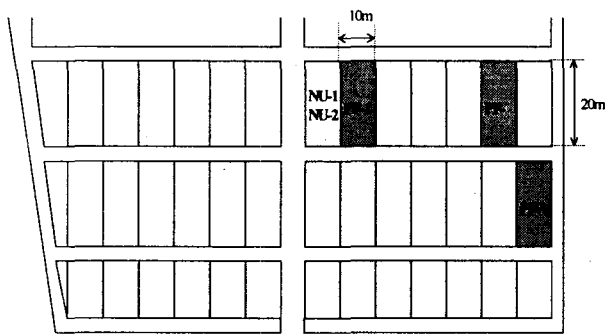
여기서,  $\overline{C_p}$ ,  $\overline{C_{pl}}$  = 담수층의 평균농도, 침투층의 평균농도, EXKP, EXKP1 = 추출계수  
인의 경우에는 추출계수 (EXKP, EXKP1), 초기토양속의 인량 (SOLP), 그리고 시비등만으로 기작이 표현된다.

### III. CREAMS-PADDY 모형의 적용

개발된 모형은 시험포장에서의 모니터링 결과와 비교 검토하여 검증하고, 다양한 수질관리 대안에 대한 배출량의 변화를 비교하도록 하였다. 즉, 수도의 생육기간 동안 논에서의 물질순환을 모니터링하여 각 요소가 갖는 시기별 농도를 조사하여 유출부하 특성을 살펴보고, 모니터링 결과를 통해 CREAMS-PADDY 모형을 검증하며, 개발된 모형을 이용해 단위면적당 총질소 및 총인의 배출부하량을 산정하였다.

#### 1. 시범지구

본 연구의 대상지구는 경기도 수원시에 위치한 서울대학교 농업생명과학대학 시험포장으로 각 단위답의 면적은 200m<sup>2</sup>이다. 용수원은 지하수를 이용하고 있으며 토양은 사양토로 이루어져 있다. 물질순환을 구명하기 위해 못자리 2개 시험구 (NU-1, NU-2), 본답기 3개 시험구 (PF-1, PF-2, PF-3)를 선정하였



(그림 4) 시험포장 구성도

으며 그 구성은 (그림 4)와 같다.

포장에 대한 조사기간은 1996년 4월 25일부터 9월 10일까지 약 120일간이었다. 공시품종인 화성벼의 종자를 최야시키고 이앙상자에 파종한 후 4월 25일에 못자리에 내었고, 5월 26일에 이앙하였으며, 9월 10일에 출수하였다. 수질분석을 위해 못자리 기간에 2개의 포장과 이앙후에 3개의 포장을 선정하여 주 3회에 걸쳐 현장모니터링을 실시하였다.

#### 2. 모형의 적용결과

CREAMS-PADDY 모형에 사용된 입력자료는 시험포장에서의 모니터링 자료와 수원지방 기상자료를 사용하였다. 유출량과 담수상태의 질소와 인 농도, 배출량의 모의결과는 다음과 같다.

##### 가. 유출량

유출량은 담수심이 물고높이 이상이 될 때 배수되는 양으로서, 1996년의 자료에 대해서 계산된 값은 543 mm였다. 같은 기간에 대해, 관개량이 863 mm이었고, 강우량이 607 mm의 값을 보였으므로 유입량의 약 37%가 유출된 것으로 나타났다.

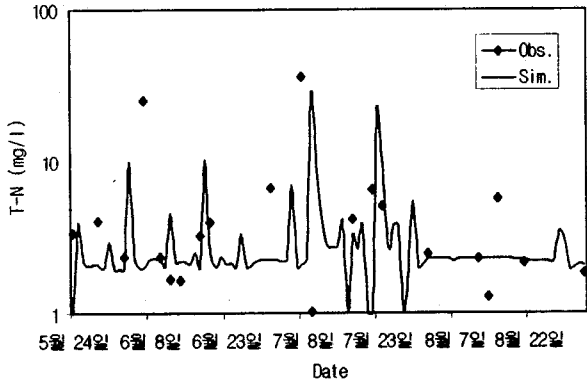
##### 나. 담수상태의 질소, 인

배수에 의한 배출부하량은 인양시기와 장마시기에 배출된 양이 대부분을 차지한다. 이 중 이양시기에 배출되는 양은 고농도의 적은 유량이 배출되며 장마 시기에는 농도는 높지 않으나 많은 유량이 배출되므로 총배출량에 기여하는 양이 크다.

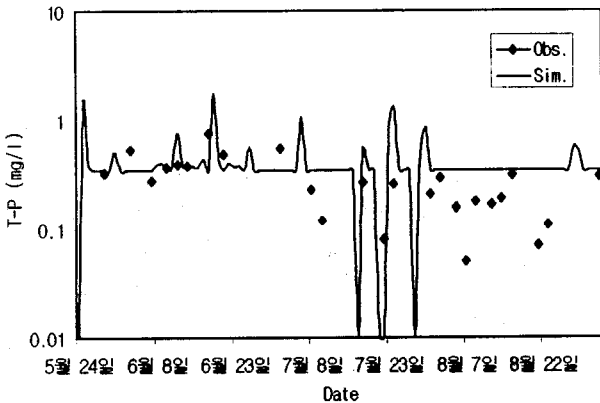
(그림 4)는 담수 질소농도의 실측치와 모의발생치를 비교한 것이다. 실측치와 모의발생치가 평상시에는 거의 비슷한 경향을 나타내나 시비를 하였을 때는 시비시기 및 시비량에 따라 차이를 나타내며 평상시에는 거의 일정한 값을 나타내었다.

(그림 5)는 담수 인농도의 실측치와 모의발생치를 비교한 것이다. 총인은 기비로만 시비되었으므로 투입된 영양물질 부하량은 기비와 관개량, 강우량에서 기인하였다. 초기에는 기비로 인해 높은 농도를 나타내나 이후에는 비교적 낮은 값을 유지하였다.

본 연구에서는 총질소, 총인의 실측치와 모의발생치의 일치 정도와 모형의 정확성을 판별하기 위해서 3가지의 통계변량을 이용하였다. 통계적인 연관성과 유의성을 판단하기 위한 기준으로는 실측치와 모



〈그림 4〉 담수상태의 질소농도 비교



〈그림 5〉 담수상태의 인농도 비교

의 발생치의 회귀분석에 의해 계산되는 결정계수 ( $R^2$ )를 사용하였고, 모형의 정확성을 파악하기 위한 기준으로는 모형의 효율 ( $E^2$ )을 이용하였으며, 절대적인 오차 정도를 계산하기 위해서 RMSE를 이용하였다.

Nash 와 Sutcliffe (1970) 가 제안한 모형의 효율을 계산하는 방법은 식 (19)와 같다.

$$E^2 = \frac{\sum(\overline{Q_0} - Q_0)^2 - \sum(Q_c - Q_0)^2}{\sum(Q_0 - Q_0)^2} \quad (19)$$

여기서,  $Q_0$  = 측정치,  $\overline{Q_0}$  = 측정치의 평균,  $Q_c$  = 계산치이다.

총질소의 경우,  $R^2$ 는 0.95,  $E^2$ 는 0.87로 높은 상관성

과 정확도를 나타냈으며, RMSE 는 2.59로 나타났다. 총인의 경우,  $R^2$ 는 0.38,  $E^2$ 는 -0.58로 낮은 상관성과 정확도를 나타냈으며, RMSE는 0.18로 나타났다.

다. 총배출량

CREAMS-PADDY 모형의 적용 결과, 생육기간중에 배출되는 영양물질의 양은 총질소 10.78 kg/ha, 총인이 1.68 kg/ha로 나타났다. 배출된 총질소, 총인의 전체량 중에서 시비가 행해진 6월, 7월에 배출된 양이 대부분을 차지하였는데, 이것은 고농도의 적은 유량이 이 시기에 배출되고 평상시에는 저농도의 많은 유량이 총배출량에 기여한 것으로 생각된다.

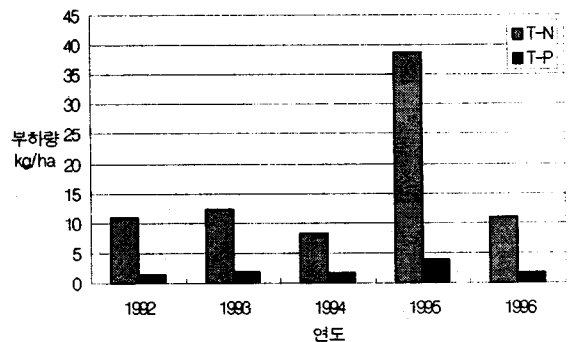
3. 연도별 배출부하량

CREAMS-PADDY 모형을 적용하여 논에서의 연도별 총질소, 총인 배출부하량을 살펴보고, 관개량과 관개 방식, 관개수 농도, 시비량 등에 따른 총질소, 총인 배출부하량의 변화를 고찰하였다.

연도별 배출부하량의 계산은 1992~1996년의 기상자료를 이용하여 모형을 구동하여, 모의발생된 총질소, 총인의 배출부하량을 비교하였다.

〈그림 6〉은 모형에서 채택하고 있는 적정담수심의 경우에 대해 연도별 배출부하량을 나타낸 것이다. 총인의 경우는 강우량이나 관개량에 크게 좌우되지 않지만 총질소의 경우는 큰 변화를 보였다. 이는 유입되는 관개수와 강우의 양에 따라 총질소 부하량이 변화됨을 알 수 있다.

연도별 단위면적당 배출부하량을 생육기간에 걸쳐 산



〈그림 6〉 연도별 영양물질 배출부하량 (적정담수심의 경우)

〈표 1〉 연도별 영양물질 배출부하량 비교

Year	Rainfall (mm)	Categories	Runoff (mm)	Runoff / Rainfall	Total N loading (kg/ha)	Total P loading (kg/ha)
1992 ~ 1996 평균		무관개시	428.58	0.49	9.12	0.65
		담수심 30 mm	596.24	0.72	13.61	1.80
		담수심 60 mm	723.78	0.89	14.79	2.28
		적정담수심	686.70	0.85	16.12	2.09

정한 값은 〈표 1〉과 같으며, 각 연도별로 무관개시, 담수심 30mm, 담수심 60mm, 적정담수심이라는 조건을 나누어 배출부하량을 계산하였다.

총질소의 경우, 95년도에 38.68 kg/ha로 가장 높은 값을 나타내었으며, 94년도에 8.11 kg/ha로 가장 낮은 값을 보였다. 95년도의 강우량이 최대이고, 94년도의 강우량이 최소임을 고려하면, 총질소의 배출부하량은 강우량 및 관개량의 유입수량에 좌우됨을 알 수 있다.

총인의 경우, 95년도에 3.89 kg/ha로 비교적 큰 값을 나타내었으나, 다른 연도에서는 1.4~1.9 kg/ha 정도의 일정한 경향을 나타내었다.

네가지 조건 중에서는 총질소의 경우 적정담수심을 유지할 때가 평균이 16.12 kg/ha로 가장 크게 나타났으며, 총인의 경우는 담수심 60 mm인 경우가 2.28 kg/ha로 가장 크게 나타났다. 전체적으로 관개를 하지 않는 무관개시와 관개량을 적게 사용하는 담수심 30 mm의 경우가 총질소, 총인의 부하량이 적게 나타났다. 또한, 유입수량에 대한 유출량 비가 높을수록 논에의 배출부하량이 크게 나타남을 알 수 있었다.

## V. 요약 및 결론

본 연구는 수도의 생육기간 동안 논에서의 물질순환을 모니터링하여 각 요소가 갖는 시기별 농도를 조사하여 유출부하 특성을 살펴보고, 모니터링을 통해 얻은 실측치와 CREAMS-PADDY 모형의 모의발생치를 비교하여 모형을 검증하며, 모형을 이용해 단위면적당 총질소 및 총인의 배출부하량을 산정하였다. 논으로부터의 영양물질 부하량을 예측하기 위하여 CREAMS 모형을 수정한 CREAMS-PADDY 모형을 구성하였다. 개

발된 모형을 검증하기 위해 모형에 의해 모의발생된 값을 1996년 4월 25일부터 9월 10일까지 벼의 생육기간에 모니터링한 결과와 비교, 분석하였다.

본 연구의 내용을 요약하면 다음과 같다.

- ① 기존의 CREAMS 모형에 논에서의 담수상태를 재현하기 위해 물수지모형을 추가하였고 담수와 토층간의 영양물질이동을 고려하기 위해 물질수지모형을 수정하였으며 영양물질의 생화학적 변환기작 등을 고려한 CREAMS-PADDY 모형을 구성하였다.
- ② 개발된 모형의 보정과 검증을 위해 서울대학교 시험포장을 대상으로 1996년 4월 25일부터 9월 10일까지 벼의 생육기간동안 수문, 수질 모니터링을 실시하였다.
- ③ 1996년 기상자료를 이용하여 시험포장을 대상으로 모형을 적용한 결과, 총질소의 경우,  $R^2$ 는 0.95,  $E^2$ 는 0.87로 높은 상관성과 정확도를 나타냈으며, RMSE는 2.59로 나타났다. 총인의 경우,  $R^2$ 는 0.38,  $E^2$ 는 -0.58로 낮은 상관성과 정확도를 나타냈으며, RMSE는 0.18로 나타났다.
- ④ 1992년부터 1996년까지의 영양물질 배출부하량을 모의한 결과 총질소의 경우, 95년도에 38.68 kg/ha로 가장 높은 값을 나타내었으며, 94년도에 8.11 kg/ha로 가장 낮은 값을 보였다. 95년도의 강우량이 최대이고, 94년도의 강우량이 최소임을 고려하면, 총질소의 배출부하량은 강우량 및 관개량의 유입수량에 좌우됨을 알 수 있다.
- ⑤ 무관개시, 담수심 30mm, 60mm, 적정담수심의 네가지 조건을 대상으로 모의한 결과 총질소의 경우 적정담수심을 유지할 때가 평균이 16.12 kg/ha로 가장 크게 나타났으며, 총인의 경우는 담수심 60 mm

인 경우가 2.28 kg/ha로 가장 크게 나타났으며, 전체적으로 관개를 하지 않는 무관개지와 관개량을 적게 사용하는 답수심 30 mm의 경우가 총질소, 총인, 총유출량 비가 높을수록 논에 배출부하량이 크게 나타남을 알 수 있었다.

본 연구는 1999년도 교육부 학술연구조성비 지원사업(농업과학분야) 중 농업과학공동기기센터(NICEM)의 대학간 공동연구지원사업으로 수행되었음

### 參考文獻

1. 김복영, 조재규, 1995. 벼 재배에서 방류수에 의한 영양염류의 유실, 한국관개배수지 2 (2) : 150-156.
2. 김진수, 오승영, 김규성, 1999. 광역논에서의 질소·인의 농도와 오염부하량 특성, 한국농공학회지, 제41권 4호, pp. 47-56.
3. 김한태, 권순국, 1993. 농촌유역에서의 수질오염 특성에 관한 연구, 한국환경농학회지 12 (2) : 129-143.
4. 박승우, 윤광식, 진영민, 이변우, 1997. 논에의 물질순환 모니터링, 서울대농학연구지 22 (1) : 19-27
5. 신동석, 1990. 논에서의 질소 및 인의 농도와 유출입, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
6. 이상모, 류순호, 김계훈, 1995. 수도재배 포장에서 침투수의 Urea-N, NH<sub>4</sub>-N 및 NO<sub>3</sub>-N의 농도 변화, 한국토양비료학회지 제28권 2호, pp. 160-164.
7. 임상준, 박승우, 1997. 논에의 유출곡선변호 추정, 한국수자원학회지 제30권 4호, pp. 379-387.
8. 정상옥, 1995. 농업용 화학물질 이동 추정 모형의 발달 : GLEAMS 모형을 중심으로, 한국관개배수지 제2권 1호, pp. 10-19.
9. 진영민, 1998. 논에의 비점오염물질 배출량 추정을 위한 CREAMS-PADDY 모형의 개발, 서울대학교 석사학위 논문.
10. 홍성구, 권순국, 1989. 농경지로부터의 오염물질 유출부하특성, 한국농공학회지 31 (3) : 92-102.
11. 홍성구, 권순국, 1999. 부하합수를 이용한 비점원오염 부하량의 예측, 한국관개배수, 제6권 2호, pp. 176-184.
12. 國松孝男 外, 1989. 河川汚濁の モデル解析, 技報堂出版
13. 森保文, 1990. 水田表面水窒素濃度變化の モデル化, 日本農業土木學會論文集 146 : 15-25.
14. 森保文, 1991. 水田にばけるリン浸透排出推定のためのモデル化, 日本農業土木學會論文集 152 : 39-46.
15. 森保文, 1991. 水田表面水リン濃度變化の モデル化, 日本農業土木學會論文集 153, pp. 45-53.
16. Beasley, D.B., W.G. Knisel and A.P. Rice, 1989. Proceedings of the CREAMS/GLEAMS symposium. Publication No.4, Agricultural Engineering Department, University of Georgia-Coastal Plain Experiment Station, Tifton, GA.
17. Cabon, F., G. Girard and E. Ledoux, 1991. Modelling of the nitrogen cycle in farm land areas. In Groot, J. J. R., P. de Willigen, E. L. K. Verberne (eds.), Nitrogen turnover in the soil-crop system. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 161-169.
18. Cooper, G. S., and R. L. Smith, 1963. Sequence of products formed during denitrification in some diverse western soils, Soil Sci. Soc. Am. J, 27, pp. 659-662.
19. De Datta, S. K. 1987. Nitrogen transformation process in relation to improved cultural practices for lowland rice, Plant Soil, 100, pp. 47-69.
20. Genshichi Wada, Sadao Shoji and Tadahiko Mae, 1986. Relationship between Nitrogen Absorption and Growth and Yield of Rice Plants, JARQ 20 (2) : 135-145
21. Heatwole, C. D., K. L. Campbell, and A. B. Bottcher, 1987. Modified CREAMS hydrology model for Coastal Plain flatwood. Trans. of ASAE, 30, pp. 1014-1022.
22. Heatwole, C. D., K. L. Campbell, and A. B. Bottcher, 1988. Modified CREAMS nutrient model for Coastal Plain flatwood. Trans. of



- ASAE 31 : 154-160.
23. Knisel, W. G., 1980. CREAMS : A field-scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems, Conservation Report No. 26, USDA-SEA, Washington, D.C.
  24. Martin, J. P. and H. D. Chapman, 1951. Volatilization of ammonia from surface-fertilized soils. Soil Sci. 71: 25-34.
  25. Reddy, K. R., and W. H. Patrick, Jr., 1986, Fate of fertilizer nitrogen nitrogen in the rice root zone, Soil Sci, Soc. Am. J, 50, pp. 649-651.
  26. Sadao Shoji, Ho Ando and Genshichi Wada, 1986. Fate of Nitrogen in Paddy Fields and Nitrogen Absorption by Rice Plants, JARQ 20 (2) : 127-134.
  27. Shoichiro Nakagawa, 1983. Advanced Rice Cultivation, Irrigation and Drainage Technology in Japan, Fuji Marketing Research.
  28. Sigekazu Yamamuro, 1986. Behavior of Nitrogen in Paddy Soils, JARQ 20 (2) : 100-107.
  29. Sohn, B., 1998. Effects of carbon, nitrate, and moisture on denitrification in riparian soil of Yangjae Stream. M. S. Thesis. Seoul National University.
  30. Stanford, G. and S. J. Smith. 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. Soil Science Society of America Proceedings 36, pp. 465-472.
  31. Sweeten, J. M. and D. L. Reddell, 1978. Nonpoint sources : State-of-art Overview, Trans. of ASAE 21 (3) : 474-483.
  32. Vladimir Novotony, Harvey Olem, 1994. Water Quality, Van Nostrand Reinhold.
  33. Yasuhumi Mori, 1990. A Model for Changes in the Surface Water Nitrogen Concentration in Paddy Fields, Trans. JSIDRE, pp. 15-25. (in Japanese).
  34. Williams, J. R., C. A. Jones and P.T. Dyke, 1988. The EPIC model. In EPIC, The Erosion Productivity Index Calculator, Vol. 1, Model Document, Temple, TX: USDA-ARS.