

ORYZA2000을 이용한 유기 벼 재배 시스템의 질소 동태 및 벼 생육 모의*

신재훈*** · 이상민** · 옥정훈** · 남홍식** · 조정래** · 안난희** · 김광수***

Modelling N Dynamics and Crop Growth in Organic Rice Production Systems using ORYZA2000

Shin, Jae-Hoon · Lee, Sang-Min · Ok, Jung-Hun · Nam, Hong-Sik ·
Cho, Jung-Lai · An, Nan-Hee · Kim, Kwang-Su

The study was carried out to develop a mathematical model for evaluating the effect of organic fertilizers in organic rice production systems. A function to simulate the nitrogen mineralization process in the paddy soil has been developed and integrated into ORYZA2000 crop growth model. Inorganic nitrogen in the soil was estimated by single exponential models, given temperature and C:N ratio of organic amendments. Data collected from the two-year field experiment were used to evaluate the performance of the model. The revised version of ORYZA2000 provided reasonable estimates of key variables for nitrogen dynamics and crop growth in the organic rice production systems. Coefficient of determination between the measured value and simulated value were 0.6613, 0.8938, and 0.8092, respectively for soil inorganic nitrogen, total dry matter production, and rice yield. This means that the model could be used to quantify nitrogen supplying capacity of organic fertilizers relative to chemical fertilizer. Nitrogen dynamics and rice growth simulated by the model would be useful information to make decision for organic fertilization in organic rice production systems.

Key words : *model, nitrogen supply, organic amendment, organic rice production, ORYZA2000*

* 본 연구는 농촌진흥청 연구개발사업(과제번호: PJ01086503)의 연구비 지원으로 수행되었음.

** 농촌진흥청 국립농업과학원 유기농업과

*** 서울대학교 농업생명과학대학

**** Corresponding author, 농촌진흥청 국립농업과학원 기획조정과(shinj@korea.kr)

I. 서 론

유기농업에서는 합성농약, 화학비료 등 화학자재를 사용하지 않고 농어업 부산물을 재활용을 통해 농작물을 재배하는 것을 기본으로 한다. 따라서 퇴비나 풋거름 작물과 같은 유기질 비료는 유기농 작물의 양분관리를 위한 주된 수단이 된다. 유기질 비료는 자원의 특성별로 분해 양상이 다를 뿐 아니라 환경의 영향을 크게 받기 때문에 양분의 공급 측면에서 불확실성이 상대적으로 크다. 그러므로 유기농경지에서 양분의 투입은 유기물의 분해과정에서 일어나는 질소 동태를 정밀하게 예측하고 이를 바탕으로 결정하는 것이 바람직하다.

작물은 요구하는 양분량이나 가장 많이 필요로 하는 시기가 각각 다르기 때문에 유기자재에 의한 양분공급이 적절히 이루어지기 위해서는 각 유기자재의 양분함량에 대한 특성 및 무기화속도에 대한 정보가 필수적이다(Lee et al., 2012b). 재배여건과 작물종류를 고려한 합리적 유기물 추천 모델의 구성을 위해서는 기초 데이터 구축과 토양의 질소공급량을 평가할 수 있는 방법의 개발이 선행되어야 한다(Lee et al., 2015). 한편, 가축분퇴비의 과도한 사용은 염류집적 등 토양오염을 초래할 수 있으므로 퇴비 사용의 제한이 필요하며(Kim and Jung, 2000), 유기자원 사용은 토양관리 자재에 대한 토양환경에 미치는 영향 평가 등을 고려하여 결정하여야 한다(Kang et al., 2011). 이와 같이 합리적인 유기자원의 사용은 친환경 농업 실천을 위해 우선적으로 해결해야 할 과제로 인식되고 있으나, 구체적인 사용 기준에 대한 과학적 근거는 미비한 실정이다.

토양 중 질소의 동태는 수학적 모형(mathematical model)에 의해 모의할 수 있다. 대표적인 토양 질소동태 모형으로는 SOILN, ANIMO, DAISY, SUNDIAL 등이 있다. 이들 모형들은 유기물을 분해 특성이 다른 몇 개의 분획으로 구분한 뒤 각 분획 별 질소 무기화(mineralization) 또는 불용화(immobilization)를 고려하여 퇴비나 식물 잔사와 같은 다양한 유기질 비료에서 유래한 질소의 공급량을 추정한다(Wu and McGechan, 1998). DSSAT (Jones et al., 2003)이나 ORYZA2000 (Bouman et al., 2001)과 같은 작물생육모형에도 토양유기물 분해 과정이 포함되어 있어서 유기질 비료 사용에 따른 질소의 공급과 작물의 생육까지 모의할 수 있다.

수학적 모형의 이용은 사용하는 유기자원의 분해특성과 환경조건의 영향을 정량적으로 파악할 수 있다는 장점이 있다. 특히 다양한 유기질 비료가 사용되는 유기농업에서 질소의 공급량을 최대한 정확히 추정할 수 있기 때문에, 유기농 비료사용 처방 등 실용적 목적에도 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 수학적 모형을 영농관리에 대한 의사결정을 위해 사용하기 위해서는 사용 자원이나 환경조건에 대해 검증과정이 선행되어야 한다. 그러나, 현재까지 국내 실험 결과를 바탕으로 한 모형의 검증 연구는 미흡한 실정으로 실용적인 활용에는 한계가 있다.

유기물 분해 속도와 잠재적 질소공급량에 대해서는 다수의 연구결과를 찾아볼 수 있다.

계분, 돈분, 우분퇴비 등 가축분 퇴비는 조성에 따라 분해율이 달라지며(Yun et al., 2007), 온도, 수분, 토심, 토성 등에 따라서도 질소의 무기화가 영향을 받는다(Cho and Chang, 2007). 발토양 조건에서 유박과 아미노산의 질소 무기화량에 대한 평가결과 유박과 아미노산 비료에 포함된 질소의 1/2은 3주 이내에 모두 무기화된다고 하였다(Im et al., 2015). 논 토양조건에서 다양한 유기자원의 질소무기화 양상에 대한 비교연구에서 질소무기화는 C:N 율과 온도를 인자로 하는 모형에 의해 추정할 수 있다고 보고된 바 있다(Shin et al., 2016). 질소 무기화에 대한 연구는 대부분 실내 항온배양시험이나 컬럼시험을 통해 이루어졌는데, 이러한 결과를 실제에 적용하기 위해서는 포장시험을 통해 검증하는 과정이 필요하며, 토양과 식물체를 포함하는 재배시스템의 질소동태에 대한 경시적인 측정과 비교연구가 반드시 필요하다.

본 연구는 수학적 모형을 이용하여 유기질 비료로부터 유래한 질소의 공급량과 벼의 질소 이용량을 경시적으로 파악함으로써 유기농 벼에서 합리적인 양분관리의 기준을 설정하기 위해 수행하였다. 벼 생육모형인 ORYZA2000에 유기질 비료 분해식을 추가하여 유기자원 유래 질소의 동태를 추정할 수 있도록 개선하고, 질소 동태와 수량에 대한 모형의 추정치를 포장시험을 통해 얻은 실측치와 비교 검증하여 모형의 이용 가능성을 검토하였다.

II. 재료 및 방법

1. 시험토양 및 기상환경

질소동태 모형의 검증을 위한 시험은 전라북도 완주군 이서면 소재 국립농업과학원 유기농업격리시험포장에서 수행하였다. 시험 토양은 성토형 인위토인 인청토으로서, 토성은 식양토이고 토양 화학성은 Table 1과 같다.

Table 1. Soil texture and chemical properties of soil used in the experiment

Soil texture	pH (1:5)	EC (dS/m)	T-C (g kg ⁻¹)	T-N (g kg ⁻¹)	Avail. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Inorganic N (mg kg ⁻¹)	Exch. Cations (cmol _c kg ⁻¹)		
							K	Ca	Mg
CL	6.2	0.4	10.5	1.1	204	1.7	0.14	2.06	0.77

재배기간 중 기상환경은 Table 2와 같다. 2015년도에는 일사량이 많고 강우량이 적어 벼 수량 확보에 매우 유리한 조건이었다. ORYZA2000 모델에는 완주군 이서면 소재 국립농업

과학원 기상측정장치에서 측정한 평균기온, 최저기온, 일사량, 수증기압포차(vapor pressure deficit)를 일별로 정리하여 입력하였다.

Table 2. Weather information during crop growing periods (from transplanting to harvest)

Year	Irradiation (MJ m ⁻²)	Minimum Temperature (°C)	Maximum Temperature (°C)	Mean vapor pressure deficit (kPa)	Mean wind speed (m s ⁻¹)	Precipitation (mm)
2015	2,163	7.6	34.7	1.38	1.41	397.5
2016	2,112	8.6	34.7	1.97	1.38	585.5

2. 재료처리

처리재료로 사용된 유기자원의 질소함량은 2015년에 가축분퇴비 1.4%, 유박 6.2%, 헤어리벳치 2.7%, 호밀 1.4%였으며, 2016년에는 가축분퇴비 2.1%, 유박 4.6%, 헤어리벳치 2.9%, 호밀 0.5%인 재료를 사용하였다. 재료의 C:N율은 6.2에서 65.3의 범위에 분포하였다(Table 3).

Table 3. N content, C:N ratio, and Water content of the organic amendment used in this experiment

Organic Amendment	2015			2016		
	N content (%)	C:N ratio	Water content (%)	N content (%)	C:N ratio	Water content (%)
Pig manure compost	1.4	24.0	49.3	2.1	15.8	45.6
Rapeseed oil cake	6.2	6.2	16.2	4.6	9.0	8.2
Hairy vetch	2.7	16.5	77.0	2.9	8.4	76.3
Rye	1.4	32.5	72.7	0.5	65.3	68.4

공시 작물로 신동진벼를 4월 상순에 파종하여 35일간 육묘한 뒤 6월 상순에 성묘이양 하였고, 재식 거리는 22 cm × 30 cm로 하였다. 이양 일주일 후, 왕우렁이를 방사하여 잡초를 방제하였고 흑명나방 방제를 위해 Bt제를 1회 살포하였다. 시험은 2015년부터 2016년까지 2년에 걸쳐 수행하였으며, 양분공급원을 달리한 6개의 처리를 2년간 동일하게 처리하였다. 모든 처리에 대해 표준시비량 11 kg 10 a⁻¹에 해당하는 질소 성분량을 기준으로 유기자원의 사용량을 계산하여 투입하였다. 처리내용은 다음 Table 4와 같다.

Table 4. Treatment details in 2015 and 2016 field experiments

Treatment	Treatment details	Application rate	
		2015	2016
CON	No fertilizer	-	-
CHM	Urea	24 kg 10 a ⁻¹	24 kg 10 a ⁻¹
PMC	Pig manure compost	1,150 kg 10 a ⁻¹	952 kg 10 a ⁻¹
OC	Rapeseed oil cake	212 kg 10 a ⁻¹	263 kg 10 a ⁻¹
HV	Hairy vetch	1,772 kg 10 a ⁻¹	1,609 kg 10 a ⁻¹
RYE	rye	2,878 kg 10 a ⁻¹	7,723 kg 10 a ⁻¹

* Rice straw was returned after harvest for all plots

* N application rate was 11 kg 10 a⁻¹ equivalent for all treatments

3. 생육조사 및 분석

이앙기, 최고분얼기, 유수형성기, 출수기, 생리적 성숙기 등 5회에 걸쳐 생육을 조사하였다. 각 조사시기별로 엽면적과 잎, 줄기, 이삭으로 구분하여 건물중을 측정하였으며, 수확기에는 수량구성요소를 추가로 조사하였다. 같은 시기에 토양 시료를 채취하여 무기태질소를 측정하였다. 분산분석을 통해 처리별 수량에 대한 차이를 검증하였다. 분석은 SAS 통계 패키지의 Proc GLM procedure를 사용하였다(SAS Institute Inc., 2004).

4. 식물체 및 토양분석

토양의 무기태질소(NO₃⁻-N과 NH₄⁺-N)는 토양시료 5 g을 젖은 상태에서 2 M KCl 25 mL 용액에서 30분간 진탕하여 침출한 여과액을 Flow Injection Analyzer (QC8000, Lachat, USA)을 이용하여 측정하였다. 토양 및 식물체의 총 질소와 탄소함량은 C/N Analyzer (VarioMAX CN, Elementar, Germany)로 분석하였다. 토양유기물, 유효인산, 양이온 치환용량 등 토양화학성과 식물체 분석은 농촌진흥청 농업과학기술원 분석법(NIAST, 2000)에 준하여 분석하였다.

5. ORYZA2000 모형의 수정

ORYZA2000 모형은 국제미작연구소와 Wageningen University에서 개발하였으며, 잠재수량 생산 조건과 수분 및 양분제한 조건에서 비의 생육과 발달을 모의하는 프로세스 기반 모형이다(Bouman et al., 2001). ORYZA2000 모형은 우리나라 환경조건 및 품종을 대상으로

검증시험을 통해 품종별 파라미터가 재설정되었으며 등숙기 예측 등 부분적 개선을 통해 생육단계 및 수량예측을 정확하게 예측할 수 있음이 보고된바 있다(Lee et al., 2012a). 최근에는 토양 탄소 및 질소동태에 대한 모의 모듈이 추가된 ORYZA2000 모형을 개선한 ORYZA (v3)이 발표되어 토양 중 질소동태를 보다 정밀하게 추정할 수 있다(Li et al., 2017). 그럼에도 불구하고 ORYZA (v3)은 그 내부구조가 공개되어 있지 않고, 모의에 필요한 필수적인 파라미터에 대한 수집 등 문제로 인해 국내조건에서 바로 적용하기에는 무리가 따른다. 따라서 본 연구에서는 ORYZA2000에 국내 선행연구에서 도출된 유기물 분해식을 추가하여 유기질 비료원 투입 시 질소 동태와 이에 따른 벼의 생육을 추정할 수 있도록 ORYZA2000 모형을 수정하였다.

ORYZA2000 모형에서 토양으로부터의 질소의 공급은 지력질소 공급과 투입된 화학비료에서 유래한 질소의 합으로 계산된다. 질소의 흡수는 벼의 생육단계에 따른 질소요구량과 벼 생육단계에 따른 질소 회수율을 감안하여 결정된다. 지력 질소는 유기물의 무기화 과정과 생물적 질소고정에 의해 결정된다(Cassman et al., 1994). 본 연구에서는 ORYZA2000 모형을 수정하여 유기자원 분해식으로부터 산출된 무기태 질소를 지력질소와 합산하여 벼가 흡수할 수 있는 총 토양 무기태질소량을 계산하도록 하였다.

유기물 분해식에서 질소의 무기화는 Eq. 1의 속도방정식에 따라 추정되는데, 잠재적 질소 무기화량 N_p 는 C:N율의 함수이며, 분해속도 k 는 기온의 변화에 따라 계산되도록 하였다. 모형의 파라미터 값은 Shin 등(2016)의 시험결과를 기준으로 설정하였다.

$$\frac{dN}{dt} = k(N_p - N) \quad (\text{Eq. 1})$$

N : 무기태질소, N_p : 잠재적 질소 무기화량, k : 무기화속도상수, t : 시간

유기질 비료의 잠재적 질소 무기화량은 C:N율에 따라 결정되는데 요소비료가 100% 무기화된다고 가정하고 Table 5를 기준으로 C:N율에 따른 잠재적 무기화량을 산출하였다. 모의에서 사용한 유기질 비료에 대한 잠재적 무기화량은 내삽하여 계산하였다. k 값은 항온 배양시험이 이루어진 20~30°C 범위에서 모형의 적합도가 낮았던 C:N율 40 이상을 제외한 나머지 재료들에 대한 온도별 평균값을 적용하였으며, 무기화량과 마찬가지로 중간 값은 내삽을 하여 산출된다(Table 6). ORYZA2000 모형의 주요 수정 부분은 Fig. 1과 같으며, 주요 변수에 대한 설명은 Table 7과 같다.

Table 5. Mineralization potential of organic amendment with different C:N ratio and their relative value to Urea

C:N ratio	Mineralization potential, N _p	Relative value
Urea	76.7	1.000
12	69.1	0.900
15	66.9	0.873
20	60.6	0.790
25	58.2	0.759
30	55.3	0.721
40	43.6	0.569
78	20.3	0.264

* Mineralization potential N_p values are the average of 25°C and 30°C in original paper (Shin et al., 2016)

Table 6. Average value of mineralization rate constant of the organic amendment used in the model

Temperature (°C)	Mineralization rate constant, k
20	0.031
25	0.034
30	0.051

```

!----- Rate calculations
!       Daily supply of N by N mineralization released from Organic matter
NP = LINT2('NPARRAY', NPARRAY, ILNP, CNRATIO)
NP = NP * NAMEND;
K = LINT2('KARRAY', KARRAY, ILK, TAVR)
RINORGN = K * (NP - INORGN)
XORG = RINORGN * RECOV
END IF
!----- State updates/integration
!       Total N pool present in the soil
NFERTP = INTGRL(NFERTP, XORG + XFERT - MAX(0.,(NACR-SOILSP)), DELT)
INORGN = INTGRL(INORGN, RINORGN, DELT)
!       Amount of N available for uptake each day
TNSOIL = SOILSP + NFERTP
    
```

Fig. 1. Modified source code of NSOIL subroutine in ORYZA2000 model.

Table 7. Notation of variables

Variable	Description	Used in Subroutine	Units	Values
NPARRAY	Table of potentially mineralizable N as function of C:N ratio	NSOIL	kg N ha ⁻¹	[CNRATIO, NP] 12, 0.900; 15, 0.873; 20, 0.790; 25, 0.759; 30, 0.721; 40, 0.569; 78, 0.264
CNRATIO	C:N ratio	NSOIL	-	Input parameter
NP	Potentially mineralizable N	NSOIL	kg N ha ⁻¹	Interpolated from NPARRAY table
RECOV	Recovery fraction of fertilizer N (inorganic N) in the soil	NSOIL	-	Interpolated from RECNIT table [DVS, RECOV] 0.0, 0.30; 0.2, 0.35; 0.4, 0.50; 0.8, 0.75; 2.5, 0.75
NAMEND	Actual nitrogen fertilization	NSOIL	kg N ha ⁻¹	Input parameter
KARRAY	Table of mineralization rate as function of temperature	NSOIL	-	[TEMP, K] 20, 0.031; 25, 0.034 30, 0.051
K	N mineralization rate constant	NSOIL	d ⁻¹	Interpolated from KARRAY table
INORGN	Inorganic N in the soil	NSOIL	kg N ha ⁻¹	State variable
RINORGN	N mineralization rate from organic amendment	NSOIL	kg N ha ⁻¹ d ⁻¹	State variable
SOILSP	Indigenous N supply from soil	NSOIL	kg N ha ⁻¹ d ⁻¹	0.8
XFERT	Net fertilizer N rate that can be taken up by crop	NSOIL	kg N ha ⁻¹ d ⁻¹	State variable
NACR	Actual nitrogen uptake rate by crop	MODELS, NCROP, NSOIL	kg N ha ⁻¹ d ⁻¹	State variable
NFERTP	Total fertilizer N (inorganic N) pool in soil	NSOIL	kg N ha ⁻¹	State variable
XORG	Net mineralized inorganic N rate that can be taken up by crop	NSOIL	kg N ha ⁻¹ d ⁻¹	State variable
TNSOIL	Daily amount of N available for uptake from soil	MODELS, NCROP, NSOIL	kg N ha ⁻¹ d ⁻¹	State variable

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 유기자원 처리별 비 수량

처리별 비 수량에 대한 분산분석 결과 유기자원 재료에 따른 차이는 통계적으로 유의하였다(Table 8). 따라서 본 시험의 결과를 유기자원 재료별 질소공급과 수량에 대한 검증자료로 사용할 수 있을 것으로 판단되었다. 유기자원 투입구의 수량은 유박, 헤어리벤티치가 높았고 그 다음으로 가축분퇴비가 높았으며, 호밀의 수량이 가장 낮았다. 화학비료구와 비교할 때 유박, 헤어리벤티치구의 수량은 2년간 모두 통계적으로 차이가 없었다(Table 9). 무처리구의 수량은 화학비료구의 59~79% 수준으로 나타났다.

Table 8. Analysis of variance for rice yields

Year	Source	Df	Mean Square	F-value	Prob>F
2015	Treatment	5	7,748,141.1	11.37	0.0001**
	Block	3	412,908.9	0.61	0.6212
	Error	15	681,334.4		
2016	Treatment	5	1,923,735.6	4.65	0.0284*
	Block	2	908,232.5	2.19	0.1676
	Error	9	414,144.4		

Table 9. Rice grain yield by different fertilizer treatments

Treatment	2015		2016	
	Yield polished rice kg/ha	Yield index	Yield polished rice Kg/ha	Yield index
CON	5,487.1 ^c	59.4	6,800.3 ^b	78.9
CHM	9,233.0 ^a	100.0	8,619.9 ^a	100.0
PMC	6,983.3 ^b	75.6	7,944.6 ^{ab}	92.2
OC	8,586.0 ^a	93.0	8,087.6 ^{ab}	93.8
HV	8,664.8 ^a	93.8	8,096.4 ^{ab}	93.9
RYE	7,242.8 ^b	78.4	6,911.3 ^b	80.2

* The same letters in the table indicate no difference at 0.05 significance level.

2. ORYZA2000 모형의 검증

2015년과 2016년 포장시험과 동일한 기상조건에서 ORYZA2000 모형을 실행하여 벼의 생육과 질소 동태를 모의하였다. 벼 생육 모의 조건은 수분 또는 양분의 결핍이나 병해충에 의한 피해가 없는 잠재수량 생산 조건을 가정하였다. 토양 중 무기태질소, 건물중의 변화와 최종 수량에 대한 2년간 실측 값과 예측 값을 비교한 결과는 다음 Fig. 2~4에서 보는 바와 같다. 5회의 생육 조사 시기 전체에 대하여 실측 값과 모형에서 예측한 추정 값 사이에 정의 상관성이 존재하였다. 결정계수는 무기태 질소의 경우 0.6613, 건물중은 0.8938, 최종 수량은 2015년과 2016년에 각각 0.7436, 0.8092로 계산되었다. 모형 추정결과는 시험 포장 내 변이가 상대적으로 큰 무기태질소보다 생육 또는 최종수량에서 상대적으로 양호하였다.

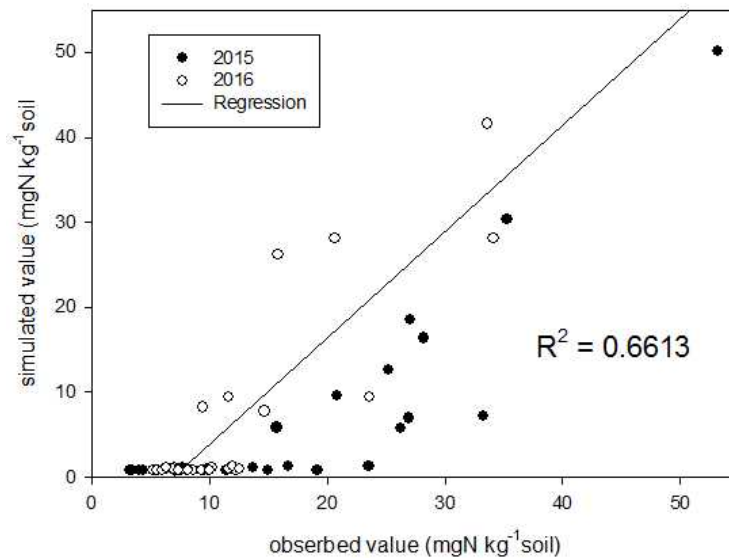


Fig. 2. Correlation between observed and simulated inorganic nitrogen in the soil during the experiment in 2015 (solid symbol) and 2016 (open symbol). Line is the regression line for all dataset.

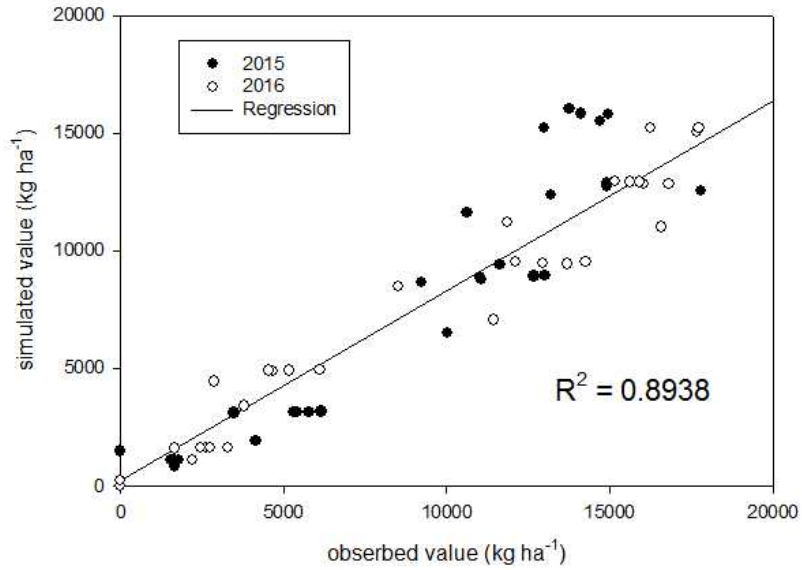


Fig. 3. Correlation between observed and simulated total above ground dry matter during the experiment in 2015 (solid symbol) and 2016 (open symbol). Line is the regression line for all dataset.

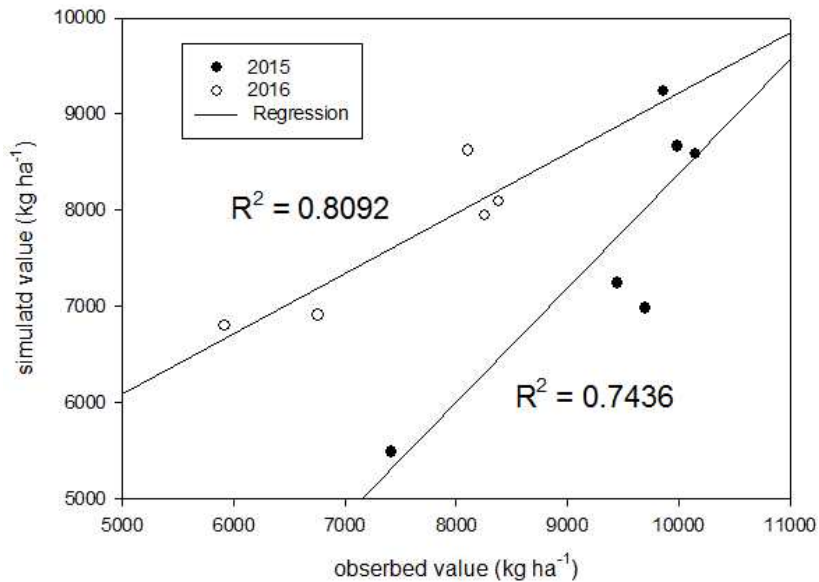


Fig. 4. Correlation between observed and simulated rice grain yield in 2015 (solid symbol) and 2016 (open symbol). Line is the regression line for each year.

3. 토양 중 무기태 질소 동태

포장시험 기간 중 토양의 무기태질소 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 토양 무기태질소는 이앙 후 15~35일(재료처리 후 30~50일)에 가장 높았고, 이후 빠르게 감소하였다. 처리 재료에 따라서는 헤어리벳치, 화학비료, 유박 처리구에서 높은 값을 나타냈으며, 무처리구와 가축 분처리구, 호밀처리구는 상대적으로 낮은 값이 유지되었다. 각 투입재료별 무기태질소 수준은 전 생육기간에 걸쳐 재료간의 차이를 잘 반영하고 있는 것으로 판단되었다.

재료 처리 후 40일이 경과하면 선으로 표시한 모형의 추정 값에서는 토양 무기태질소가 모두 소진되는 것으로 추정되었으나, 표식으로 표시한 관측 값은 일정 수준 무기태질소가 측정되어 생육 후기에 과소 추정하는 결과를 나타냈다.

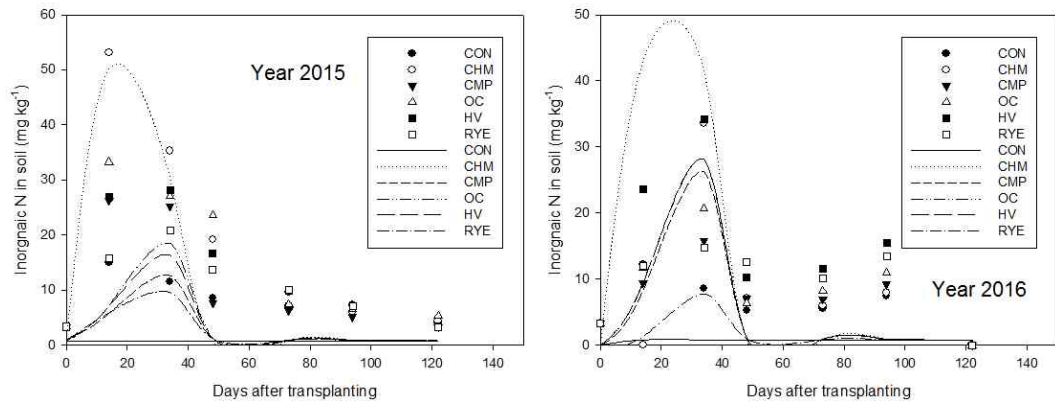


Fig. 5. Time courses of soil inorganic nitrogen in different organic amendment input condition (symbols are measured value, and lines are simulated value).

4. 벼 생육 변화 추정

Fig. 6은 처리에 따른 시기별 벼 건물중의 변화이다. 벼의 건물중 생산량은 화학비료구가 가장 높았으며, 유박, 헤어리벳치 등도 높았다. 호밀 처리구는 무처리보다 낮게 나타났다. 선으로 표시된 모형의 추정결과를 보면 다소 과소 추정되는 경향을 보이고 있으나 처리간의 차이는 유사한 패턴을 보이고 있다. 따라서 화학비료에 대한 상대적인 시비효과에 대한 의사결정의 기준으로 사용하는 데에 무리가 없을 것으로 판단된다. 이와 같이 모형을 실행 결과는 재료별 차이를 분명히 구분해 주고 있으며, 수량에 대한 모형의 설명력도 0.74~0.81 수준으로 높게 나타났다.

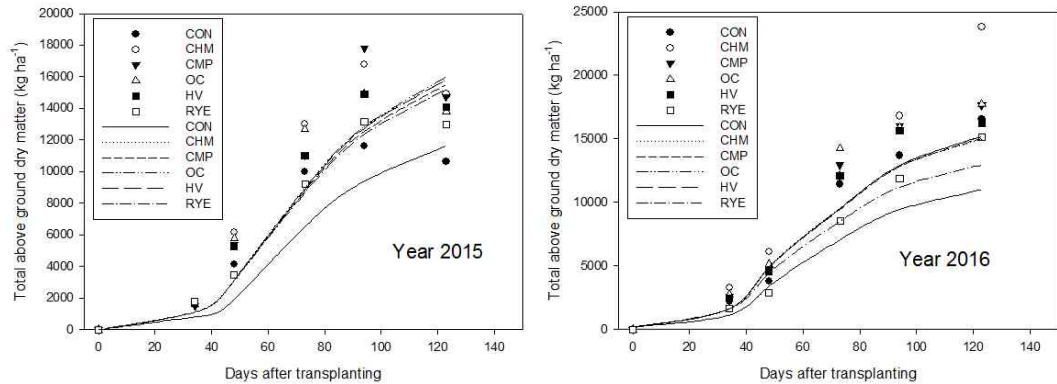


Fig. 6. Time courses of total above ground dry matter by different organic amendment input condition (symbols are measured value, and lines are simulated value).

IV. 결 론

양분관리를 위해 전적으로 유기질 비료에 의존해야 하는 유기농업에서 토양으로부터 작물에게 공급되는 무기태질소량의 추정과 이에 따른 합리적 사용기준의 설정이 필요하다. 그러나 현재까지 유기자원 유래 질소의 공급과 합리적 사용량 설정에 대한 정량적 접근의 연구는 미진한 실정이다. 유기농업의 양분관리는 단지 화학비료 대비 상대적인 수량을 기준으로 이루어지고 있으며, 작물의 질소 이용 효율이나 용탈로 인한 환경부하 등 측면은 간과되고 있다. 따라서 유기자원의 특성을 반영하기 위한 일반화된 방법의 적용을 통한 유기자원 비료사용처방 기준의 설정이 요구되었다.

토양 유기물 분해식을 비 생육모형인 ORYZA2000에 추가하여 포장조건에서 토양 중 무기태질소의 변화와 비의 질소흡수이용, 생육과 수량을 추정할 수 있도록 하였다. 유기물 분해식을 포함하는 ORYZA2000 모형은 투입 유기자원 재료 종류에 따른 토양 중 무기태질소를 비교적 정확하게 예측하였으며, 생육이나 수량추정결과에도 유기자원별 차이가 잘 반영되고 있음 확인하였다. 다만, 본 연구에서의 토양 중 질소 동태의 모의에는 암모니아 휘산, 탈질 등으로 인한 질소의 손실은 고려하지 않고 있다는 점에 유념하여야 하며, 유기물의 분해 이후 무기태질소의 거동에 대해서는 후속 연구를 통해 보완되어야 할 것이다.

본 연구에서 제시한 ORYZA2000 모형은 재료의 C:N율을 기준으로 실제 포장의 온도변화를 반영한 질소무기화와 이에 따른 유기 비 재배시스템에서 질소의 동태를 비교적 정확하게 추정할 수 있는 것으로 분석되었으며, 향후 유기농 비료사용 처방에 참고할 수 있을 것으로 판단된다.

[Submitted, August. 28, 2017 ; Revised, October. 20, 2017 ; Accepted, October. 23, 2017]

References

1. Bouman, B. A. M., M. J. Kropff, T. P. Tuong, M. C. S. Wopereis, H. F. M. t. Berge, and H. H. v. Laar. 2001. *Oryza2000: Modeling Lowland Rice*. International Rice Research Institute, and Wageningen University and Research Centre, Los Banos (Philippines), p. 235.
2. Cassman, K. G., M. J. Kropff, and Y. Zhende. 1994. A Conceptual Framework for Nitrogen Management of Irrigated Rice in High Yield Environments. In: Virmani, S. S. (Editor), *Hybrid Rice Technology: New Developments and Future Prospects*, Los Banos (Philippines): International Rice Research Institute. pp. 81-96.
3. Cho, S. H. and K. W. Chang. 2007. Nitrogen Mineralization of Oil Cakes According to Changes in Temperature, Moisture, Soil Depth and Soil Texture. *J Korea Org Resour Recyc Assoc.* 15(1): 149-158.
4. Im, J. U., S. Y. Kim, Y. E. Yoon, J. H. Kim, S. B. Lee, and Y. B. Lee. 2015. Nitrogen Mineralization in Soil Amended with Oil-Cake and Amino Acid Fertilizer under a Upland Condition. *Korean J Org Agr.* 23(4): 867-873.
5. Jones, J. W., G. Hoogenboom, C. H. Porter, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, P. W. Wilkens, U. Singh, A. J. Gijsman, and J. T. Ritchie. 2003. The Dssat Cropping System Model. *Eur J Agron.* 18(3-4): 235-265.
6. Kang, B. G., S. Y. Lee, S. C. Lim, Y. S. Kim, S. D. Hong, K. Y. Chung, and D. Y. Chung. 2011. Establishment of Application Level for the Proper Use of Organic Materials as the Carbonaceous Amendments in the Greenhouse Soil. *KOREAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE AND FERTILIZER.* 44(2): 248-255.
7. Kim, J. G. and K. Y. Jung. 2000. Amount of Maximum Compost Application on the Long - Term Application with Different Organic Material Sources in Upland Soil. *Korean J Soil Fert.* 33(3): 182-192.
8. Lee, C. K., J. Kim, J. Shon, W. H. Yang, Y. H. Yoon, K. J. Choi, and K. S. Kim. 2012a. Impacts of Climate Change on Rice Production and Adaptation Method in Korea as Evaluated by Simulation Study. *Korean J Agr Forest Meteorol.* 14(4): 207-221.
9. Lee, Y., H. S. Choi, and S. M. Lee. 2012b. Estimation of N- and P-Mineralization of Organic Materials under a Paddy Condition. *The Korean Society Of International Agriculture.* 24(3): 299-302.

10. Lee, Y. J., H. B. Yun, Y. S. Song, C. H. Lee, J. K. Sung, and S. K. Ha. 2015. Effects of Organic Matter Sources on Nitrogen Supply Potential in Arable Land. *Korean J Agr Sci.* 42(4): 431-437.
11. Li, T., O. Angeles, M. Marcaida, E. Manalo, M. P. Manalili, A. Radanielson, and S. Mohanty. 2017. From Oryza2000 to Oryza (V3): An Improved Simulation Model for Rice in Drought and Nitrogen-Deficient Environments. *Agr Forest Meteorol.* 237: 246-256.
12. NIAST. 2000. Method of Soil and Plant Analysis, Suwon, Korea.
13. SAS Institute Inc. 2004. *Sas/Stat User's Guide 9.1*, Cary, NC, USA.
14. Shin, J. H., N. H. An, S. M. Lee, J. H. Ok, and B. W. Lee. 2016. Estimation of N Mineralization Potential and N Mineralization Rate of Organic Amendments as Affected by C:N Ratio and Temperature in Paddy Soil. *Korean J Soil Sci Fert.* 49(6): 712-719.
15. Wu, L. and M. B. McGechan. 1998. A Review of Carbon and Nitrogen Processes in Four Soil Nitrogen Dynamics Models. *J Agr Eng Res.* 69(4): 279-305.
16. Yun, H. B., Y. Lee, C. Y. Yu, S. M. Lee, B. K. Hyun, and Y. B. Lee. 2007. Effect of Crude Carbohydrate Content in Livestock Manure Compost on Organic Matter Decomposition Rate in Upland Soil. *Korean J Soil Sci Fert.* 40(5): 364-368.