

Research Paper

DNDC 모형을 이용한 시비와 영농관리에 따른 밭포장의 토양유기탄소 변동 평가

이경숙* · 윤광식* · 최동호* · 정재운** · 최우정* · 임상선*

전남대학교 지역·바이오시스템공학과*, 국립환경과학원 영산강물환경연구소**

Evaluation of Soil Organic Carbon of Upland Soil According to Fertilization and Agricultural Management Using DNDC Model

Lee, Kyoungsook* · Kwangsik Yoon* · Dongho Choi*
Jaewoon Jung** · Woojung Choi* · Sangsun Lim*

Dept. of Rural & Bio-systems Engineering, Chonnam National University*
Yeongsan River Environment Research Center**

요약 : 농업생태계에 대한 기후변화의 영향을 경감시키기 위해 토양탄소저류를 증대시키기 위한 영농관리기법 개발이 요구되고 있다. 본 연구에서는 토양유기탄소에 대한 비종(화학비료와 퇴비), 작부체계, 작물잔사관리의 영향을 조사하였다. 화학비료와 퇴비 시험포를 조성하여 자연 강우 조건에서 옥수수-보리를 2년동안 재배하고 토양내 SOC의 분석을 위해 토양샘플링을 실시하였다. 영농관리에 따른 SOC의 장기변화 패턴을 추정하기 위해 DNDC모형을 1981년부터 2010년까지 기상자료와 실험자료 기반 매개변수로 모의하였다.

DNDC 모의에 의하면 화학비료 처리구에서는 작물잔사 환원이 없으면 SOC가 감소하는 것으로 나타났다. 반면 퇴비 처리구에서는 같은 조건에서 SOC가 증가하였고, SOC의 증가는 퇴비의 시비율에 비례하였다. 또한 SOC는 투입된 퇴비량의 증가로 인해 옥수수 단작보다 옥수수-보리 작부체계에서 더 증가하였다. 비중에 관계없이 작물잔사의 토양환원은 SOC 증가를 가져왔지만, 퇴비시용의 경우 잔사환원 효과는 작은 것으로 나타났다.

주요어 : 기후변화, SOC, 화학비료, 퇴비, DNDC

Abstract : To mitigate the impacts of climate change on agricultural ecosystems, development of agricultural management for enhanced soil carbon sequestration is required. In this study, the effects of fertilizer types (chemical fertilizer and manure compost), cropping systems, and crop residue management on SOC(Soil Organic Carbon) sequestration were investigated. Summer corn and winter barley were cultivated on experimental plots under natural rainfall conditions for two years

with chemical fertilizer and manure compost. Soil samples were collected and analyzed for SOC for soil. To estimate long-term variation patterns of SOC, DNDC was run with the experimental data and the weather input parameters from 1981 to 2010.

DNDC simulation demonstrated SOC reduction by chemical fertilizer treatment unless plant residues are returned; whereas compost treatments increased SOC under the same conditions and SOC increment was proportional to compost application rate. In addition, SOC further increased under corn-barley cropping system over single corn cropping due to more compost application. Regardless of nutrient input type, residue return increased SOC; however, the magnitude of SOC increase by residue return was lower than by compost application.

Keywords : climate change, SOC, chemical fertilizer, compost, DNDC

I. 서론

지구상 여러 곳에서 장기적인 비료 시용에 대한 연구들은 무기비료와 가축분뇨의 균형 잡힌 이용을 통해 토양내 영양물질 상태를 개선시키고 높은 작물 생산성을 유지시키며, 토양에 높은 수준의 작물잔사 환원은 토양유기탄소(Soil Organic Carbon: SOC) 농도 증가를 가져오는 것으로 나타났다(Holeplass *et al.*, 2004). Karlen *et al.*(1997)에 의하면 토양유기탄소는 영양물질 공급, 보수력, 미생물의 활동을 증가시켜 토양비옥도와 생산성을 개선한다고 하였고, Young(2003)은 농경지 토양의 탄소고정은 온실가스 증가를 완화시키고 토양은 CO₂의 저장고 역할을 한다고 하였다. 토양은 CO₂ 저장고 역할을 하고 농경지 토양의 탄소 격리는 온실가스 증가를 완화시킬 수 있다(Young, 2003). 토양 탄소 축적량은 기후나 토양 등 환경특성과 토지이용, 작물종류와 작부체계, 시비, 경운, 배수와 관개방법, 경작관리의 종류, 식물체 잔사관리, 유기개량제 시용 등에 따라 크게 영향을 받으며(Paustian *et al.*, 1997; Bruce *et al.*, 1999; Ogle *et al.*, 2005), 변화된 토양탄소축적량이 새로운 평형상태에 도달하려면 수년 또는 수십년이 소요된다.

일반적으로 장기적인 무기비료 시용은 수확량 증가를 가져오고 작물 잔사를 토양에 환원하게 되면 시비하지 않는 경우보다 더 높은 SOC 함량을 유지하게 된다(Haynes and Naidu, 1998). 하지만, 여러 실험에서 시비량, 윤작, 관리관행과 같은 여러 인자가

SOC 함량 유지에 영향을 줄 수 있다. Raun *et al.*(1998)에 의하면 질소비료 시비에 따른 SOC 증가가 크지 않았고, Halvorson *et al.*(2002)은 미국 대평원 북쪽 지역에서 질소비료 시비와 작물잔사를 환원시켰지만 일반적으로 SOC 격리가 일어나지 않았다고 보고하고 있다. 심지어 Russell *et al.*(2005)은 질소비료가 SOC 격리에 부정적 영향을 미친다고도 하였다.

Chang *et al.*(2013)은 42년간 지속적으로 벼를 단작한 논토양에서 시비처리가 탄소와 질소축적에 기여하여 대조구와 비교했을 때 화학비료, 퇴비, 화학비료+퇴비의 SOC와 TN의 농도는 각각 24.1과 31.0%, 57.6과 49.7%, 72.2와 54.5% 증가하는 것으로 나타났다고 하였고, 장기간 가축분뇨 시용했을 때 토양탄소가 증가하여 이에 따른 토양탄소고정 효과가 나타나는 것을 여러 연구자들이 보고하였다(Kapkiyai *et al.*, 1999; Agbenin and Goladi, 1997; Kingery *et al.*, 1994; Govi *et al.*, 1992).

정원교와 김선관(2007)은 1999년 이후 우리나라 논토양의 토양 유기탄소가 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 온실가스 흡수원으로서 역할을 농경지 토양이 수행하고 있는 것으로 보고한 바 있다. 고흥 간척지 내 인공습지의 이산화탄소와 토양 유기탄소 변화를 살펴본 결과 토양 유기탄소량이 여름철에 증가하는 것을 관측하였다(강동환 등, 2008). 또한 정원교 등(2007)은 토양 유기탄소 함량이 인산, 칼리 및 석회를 장기간 사용한 농경지에서 높게 나왔으며, 퇴비 사용구에서 토양 유기탄소 함량이 지속적으로 증

가하는 것으로 나타났다고 보고하였고, 농경지에서 유기탄소 축적을 위하여 퇴비의 지속적인 사용을 제안하였다. 정기열 등(2008)은 벼 단작 보다 벼-보리 이모작 작부체계가 토양 유기물 관리에 유리한 방법으로 평가하였다.

DNDC(Denitrification-Decomposition) 모형은 기후, 토양종류, 영농관리조건에 따른 온실가스 배출이나 토양유기탄소 변화 연구에 적용되어 왔다(Cai *et al.*, 2003; Pathak *et al.*, 2005; Smith *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2003). 또한 DNDC 모형의 장점은 발작물뿐만 아니라 논벼와 같은 담수 작물에도 적용이 가능하기 때문에 아시아 지역의 농업조건에도 적용성이 있다는 점이다.

Wang *et al.*(2001)은 중국 주요 농업지역의 SOC 거동을 분석하기 위해 10~20년 사이 최소 4개에서 11개의 SOC 자료가 있는 중국 6개 지역을 대상으로 DNDC 검증을 실시하였다. 대상 지역은 대조구, 화학비료구, 가축분뇨구 등을 포함하고 있으며, DNDC 모형은 모든 지역의 SOC 시계열 변화를 잘 재현하는 것으로 나타났다. 보정된 매개변수를 이용하여 관행과 대안 농경지 관리방안 적용 효과를 20년(1984~2004)을 대상으로 모의 발생하여 분석하였다. 모의 결과 밭 지역인 북쪽이 논이 많은 남쪽보다 SOC 변화가 큰 것으로 나타났다. 토양 50cm 두께의 토양층을 대상으로 북쪽은 증감이 -1000에서 200 kg C ha⁻¹yr⁻¹인데 비해 남쪽은 변화 폭이 -70에서 26 kg

C ha⁻¹yr⁻¹이었다. 또한 지상부 잔사의 토양환원과 가축분뇨 이용은 대부분 지역에서 SOC 증가에 효과적인 것으로 나타났다.

본 연구에서는 화학비료와 퇴비의 장기적인 사용시 토양유기탄소(SOC) 격리에 미치는 영향을 파악하기 위해 현장실험 결과를 이용 DNDC 모형을 보정하고, 장기간 기상조건(30년)을 대상으로 모의 발생하여 SOC의 경시적 변화와 처리간 장기-평균적 효과를 분석한다. 또한, 투입량을 1배구부터 3배구까지 변화시켜 시비량 차이의 장기적 영향과 동절기 보리 재배와 수확 후 지상부 토양환원 효과를 모의발생하고 평가한다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지역

포장실험은 전남대학교 부속농장에 밭 포장(경도 126° 53' 52", 위도 36° 10' 25")을 조성하여 2011년 4월부터 2012년 10월까지 옥수수(*Zea mays* L., 일미찰)와 보리(*Hordeum vulgare* L., 겉보리-혜강)을 대상으로 수행하였으며, 공시토양의 토양통은 석전통(石泉統: SEOGCHON SERIES)으로 미 농무성 Soil Taxonomy에 의하면 Coarse Loamy, Mixed, Nonacid, Mesic Family of Fluvaquetic Endoaquepts로 구성되었으며 토성은 양토(Loam)였다. 조성된 시험포는 각각 가로 세로를 18×40m, 경사를 2°로하고

Table 1. Physico-chemical properties of the experimental soils and compost

Properties	Soil			Compost
	CTL	CF	OF	
Soil texture	Loam	Loam	Loam	NA
Bulk density(g cm ⁻³)	1.01	1.03	1.08	NA
pH(1:5 to soil, 1:10 to compost)	7.5	6.7	7.6	7.9
EC(dS m ⁻¹)	0.10	0.17	0.09	6.1
Total C(g C kg ⁻¹)	1.09	1.15	1.74	349.4
Total N(g N kg ⁻¹)	0.22	0.38	0.24	30.4
C/N	5	3	7	11
Total P(g P kg ⁻¹)	0.67	0.70	0.92	10
Avail-P(mg P ₂ O ₅ kg ⁻¹)	27.0	21.4	55.6	22.9

CTL: Control CF: Chemical Fertilizer OF: Organic Fertilizer

시험포간 교차오염을 방지하기 위해 1m의 간격을 두고 플라스틱(썬라이트)으로 분리하였다.

연구대상지역의 초기토양과 퇴비의 이화학성은 Table 1과 같으며, 토양의 총탄소는 1.09~1.74 g C kg⁻¹, 총질소는 0.22~0.38 g N kg⁻¹, 총인은 0.67~0.95 g P kg⁻¹로 서로 상이하였는데, 이는 이 연구를 시작하기 전 2010년에 동일한 시비조건으로 무(*Raphanus sativus*)를 대상으로 연구를 진행한 후 포장을 해체하지 않고 그대로 연구를 수행하였기 때문이다. 퇴비의 성분비는 T-N 3.04%, T-P 1.0%, T-C 34.9% 그리고 C/N비는 11이었다.

작물재배조건에서 시비에 따른 물수지 및 물질수지 변화를 살펴보기 위해서 무처리구(Control, CTL), 화학비료구(Chemical Fertilizer, CF)를 질소 기준 1수준(옥수수, 180 kg N ha⁻¹; 보리, 94 kg N ha⁻¹), 가축분퇴비 (Organic Fertilizer, OF)를 관행(OF)으로한 3개 처리구를 두었다.

2. 작물 재배

하계작물로 옥수수를 동계피복 작물인 보리를 재배하였으며, 시비조건에 따른 물수지 및 물질수지 변화를 살펴보기 위해서 대조구, 화학비료구, 퇴비구에

처리구별 적정량을 시비하기 위해서 농촌진흥청 품목별 관리메뉴얼을 참고하였고, 퇴비의 시비량은 화학비료의 질소를 기준으로 시비한 후 파종하였다.

3. 토양분석

토양의 토성 및 구조 등은 물수지에 많은 영향을 미치며, 또한 작물생육에 필요한 유기물 및 탄소 저장 기능이 있으므로 물질순환을 해석함에 있어 매우 중요하다. 토양 샘플링은 2011년 6회, 2012년 8회를 3개 처리구 동시에 실시하였고, 환경부(2011.6.16) 수질오염공정시험방법에 의해 분석하였다. 시험지구 토양의 물리적 특성을 조사하기 위해서 표토(0~10cm)를 채취하여 미국 농무성 삼각좌표분류법에 의해 입경분석을 실시하였다. 또한 이화학성 특성을 파악하기 위해서 pH, EC, OM(Organic Matter), T-N, T-P, T-C 등을 식재하기 전과 수확 후에 토양을 채취하여 분석하였다.

4. DNDC 모형 개요

DNDC(Denitrification-Decomposition)는 토양 탄소와 질소의 생화학 과정을 시뮬레이션하는 모형

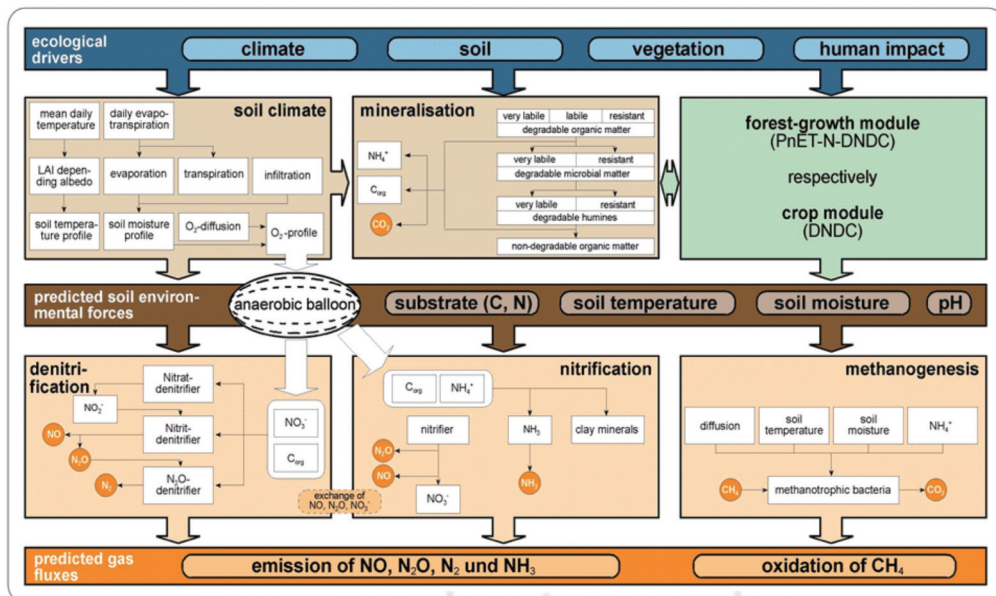


Fig. 1. Structure of the DNDC Model

으로 크게 두 가지 부분으로 구성되어 있다. 첫째, 토양, 기후, 작물 생장과 분해 모형들, 토양 온도, 수분 함량, pH, 산화 환원 전위(Eh) 예측과 기후, 토양, 식생 그리고 인위적인 활동과 같은 생태학적인 요소들을 토대로 구동되는 드라이버들로 구성되어 있다. 둘째, 질산화작용, 탈질소작용과 발효작용 모형, 토양 환경 요인들을 토대로 일산화질소(NO), 아산화질소(N₂O), 질소가스(N₂), 메탄(CH₄)과 암모니아(NH₃) 유동들을 예측하는 모형들로 구성되어 있다. 또한 이 모델은 지구화학적 또는 생화학적인 반응에 대한 각기 특정 매개변수를 적용하는 방법으로 물리, 화학, 생물 등 실험실 연구들에 의해 만들어진 실험식에 고전적인 규칙을 사용했다. Fig. 1은 탄소와 질소의 생화학적인 주기와 기본적인 생태계 드라이버들에 대한 전체적인 구조를 보여주고 있다.

DNDC 모형은 크게 3가지 입력자료에 의해 구동

된다. 첫 번째, 기후자료는 강수량, 일사량, 최저/최고 기온, 풍속 등으로, 시험 지구내 근접한 거리에 위치한 광주지방기상청 자료를 이용하였다. 두 번째는 토양 특성자료는 토양 샘플링을 실시하여 토성 분석을 하였으며 용적밀도, 포장용수량, 토양 투과성, 토양 유기탄소, 토양경사, 토양 pH 등을 확보하였다. 세 번째는 작물정보 입력으로서 영농활동기간동안 이루어지는 경운, 비료 및 유기비료 사용시기, 관개량, 잡초제거 등이 입력된다.

5. 영농관리에 의한 SOC변화 평가

영농관리에 의한 30년간 SOC 격리효과를 평가하기 위해 다음의 포장실험조건을 시나리오로 구성하고 30년간(1981~2010) 기상자료를 이용하여 모의발생을 실시하였다.

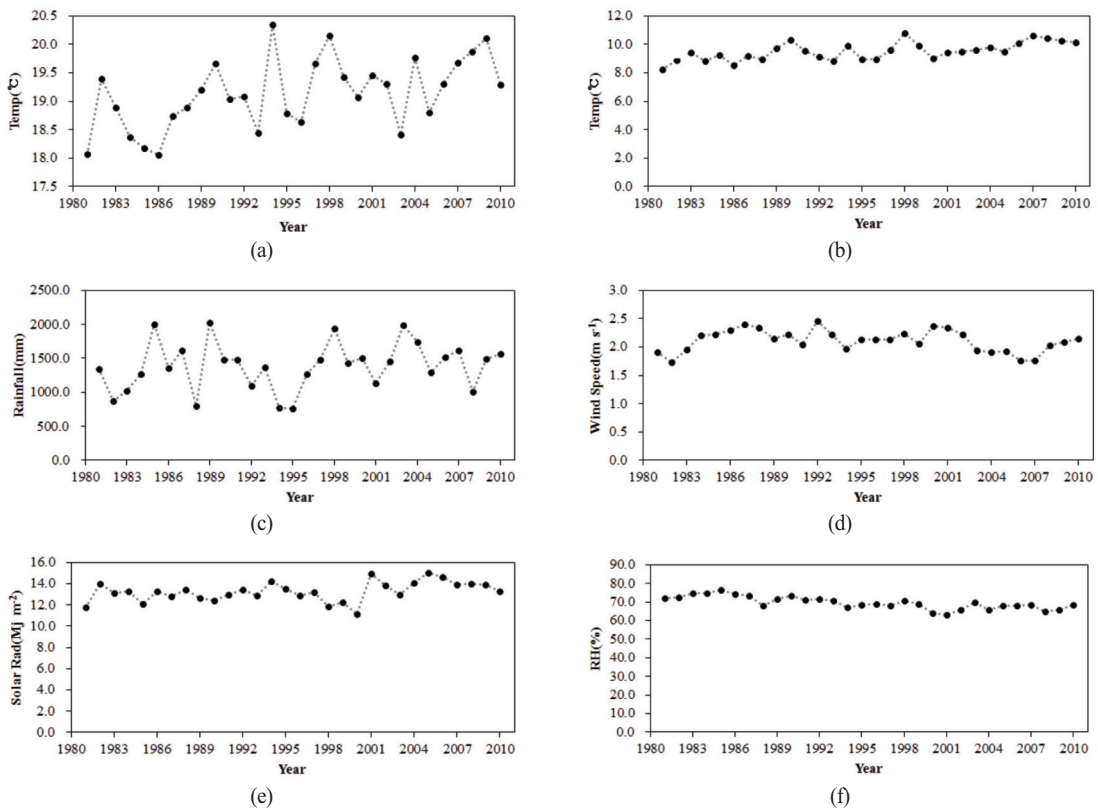


Fig. 2. (a)Annual mean maximum air temperature, (b)annual mean minimum air temperature, (c)annual precipitation, (d)annual mean wind speed, (e)annual mean radiation, (f)annual mean humidity of 1981~2010

- (a) 옥수수단작 (추수 후 지상부제거: CH(Corn Harvest))
- (b) 옥수수-보리 (추수 후 지상부제거: CHBH(Corn Harvest Barley Harvest))
- (c) 옥수수 단작 (추수 후 지상부 토양환원: CR(Corn Return))
- (d) 옥수수-보리 (추수 후 지상부 토양환원: CRBR(Corn Return Barley Return))

이를 위하여 30년 장기모의 발생을 위한 DNDC 기상자료를 구축하였다. 1981년부터 2010년까지 기상 자료를 살펴보면 연평균 최고온도는 18.1~20.3(평균: 19.1)℃, 연평균 최저온도는 8.2~10.8(평균: 9.5)℃였다. 대상기간 동안 큰 편차를 보인 연강수량은 764.4~2,020.4(평균: 1,391.0)mm였다. 풍속은 1.7~2.5(평균: 2.1) m s⁻¹, 일사량은 11.1~15.0(평균: 13.3) MJ m⁻², 습도는 63.2~76.3(평균: 69.6)%였다(Fig. 2).

III. 결과 및 고찰

1. DNDC 모형 보정

1) DNDC 모형 보정

모형 적용을 위해 2011년 기상자료, 포장에서 얻어진 토양 특성 자료, 경운 날짜, 비료 살포 시기와 살포량 자료 등을 입력하여 모형을 구동하고, 관측된 SOC 함량을 바탕으로 시행착오 방법을 통해 관측치에 근사하도록 보정하였다. 모형 보정을 위해 조사된 자료를 바탕으로 점토비율, 용적밀도, 포장용수량, 위조점, 투수도 등의 매개변수 값을 조정하였는데 토

Table 2. Amounts of N-fertilization and amended carbon for DNDC model

Treatment	Crops	N (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	C (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)
CF	Corn	180	-
	Barley	94	-
OF	Corn	180	1,980
	Barley	94	1,034

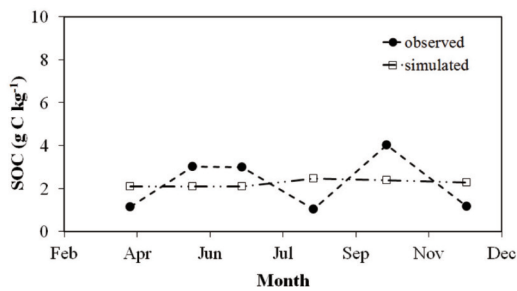
Table 3. Calibrated parameters of the treatments

Parameters	CF	OF
Initial SOC (kg C kg ⁻¹ soil)	0.002	0.004
Clay fraction	0.19	0.19
Bulk density (g cm ⁻³)	1.3	1.3
Field capacity	0.49	0.49
Hydro-conductivity (m hr ⁻¹)	0.025	0.025
Soil pH	7.12	7.12
Wilting point	0.22	0.22
porosity	0.451	0.451
Depth of water-retention layer	9.99	9.99
Drainage efficiency	1	1
Microbial activity index	1	1
Soil salinity index	0	0

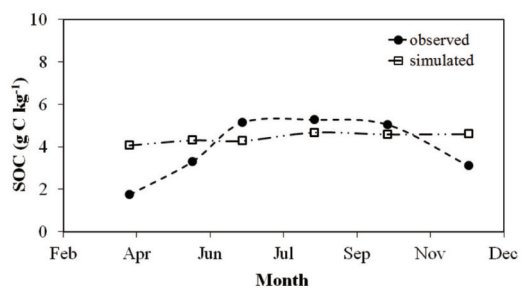
양유기탄소 보정에 가장 많은 영향을 미친 매개변수는 초기 SOC인 것으로 나타났다. Table 2는 화학비료구, 퇴비구의 질소 시비량과 퇴비에 의한 탄소 투입량을 보여주고 있다. 옥수수 단작의 경우 탄소 투입량이 1,980kg ha⁻¹yr⁻¹, 옥수수-보리인 경우 탄소 투입량이 3,014kg ha⁻¹yr⁻¹였다. Table 3은 보정에 사용된 각 처리구 별 매개변수 값을 나타내고 있다.

2) SOC 보정 평가

DNDC 모형의 SOC를 보정하기 위해 조정된 주요



(a) CF



(b) OF

Fig. 3. Observed and simulated SOC for calibration(2011)

매개변수는 Table 3과 같고, Fig. 3는 각 처리구에 대한 실측과 DNDC 모형의 SOC 결과값을 비교하여 보여주고 있다. CF, OF의 실측 평균 SOC는 각각 평균 2.23, 3.93 g C kg⁻¹, DNDC 모의 평균 SOC는 각각 2.23, 4.41 g C kg⁻¹로 조사되었다.

2011년 각 처리구의 SOC 관측값과 DNDC 모의치를 살펴보면 SOC농도가 CF<OF순으로 이 경향을 잘 나타내고 있다. 2011년 자료를 사용하여 보정된 매개변수를 적용하고, 2012년 기상과 영농활동 자료를 이용하여 SOC를 모의 발생하였다. 모의 결과 모형은 처리간 SOC의 상대적 차이를 잘 나타내었다.

3) SOC 검증 평가

Fig. 4는 각 처리구에 대한 2012년 실측 SOC와 DNDC 모형의 결과값을 비교하여 보여주고 있다. CF, OF의 실측 평균 SOC는 각각 2.82, 5.63 g C kg⁻¹, DNDC 모의 평균 SOC는 각각 2.61, 4.89 g C kg⁻¹로 조사되었다.

2. 시비수준과 영농관리에 따른 SOC 격리효과 평가

Fig. 5~Fig. 8과 Table 6은 화학비료 및 퇴비 시비수준과 영농관리에 따른 SOC의 장기변화를 보여주고 있다. 화학비료의 경우 시비량을 3배까지 증가시켜도 수확 후 지상부 토양환원이 없으면 SOC가 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 시비량이 증가하면 감소비율이 다소 완화되는 것으로 나타났다. 또한 화학 비료의 경우 옥수수와 보리재배시 지상부가 환원되는 경우가 옥수수 단작에서 지상부가 환원되는 경우보다 SOC가 더 증가하는 것으로 모의 발생되었다. 옥수수-보리재배시는 시비수준을 달리하여도 SOC 평균증가가 150~170kg C ha⁻¹yr⁻¹ 범위로 큰 차이를 보이지 않았다.

퇴비의 경우 전체적으로 SOC가 증가하였으며 시비량이 증가할수록 모든 처리에서 SOC가 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 퇴비사용과 더불어 추수 후 지상부 토양 환원시 SOC의 증가 폭이 더 커지는 것으로 나타났다. 1배구의 경우, 옥수수 단작-지상

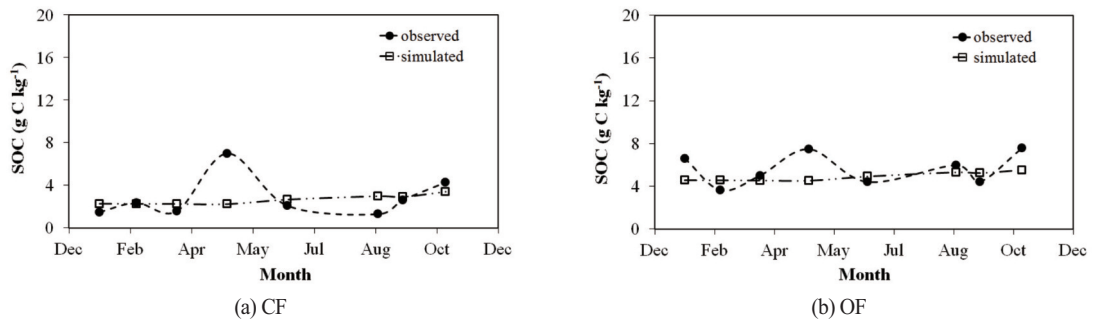


Fig. 4. Observed and simulated SOC for validation(2012)

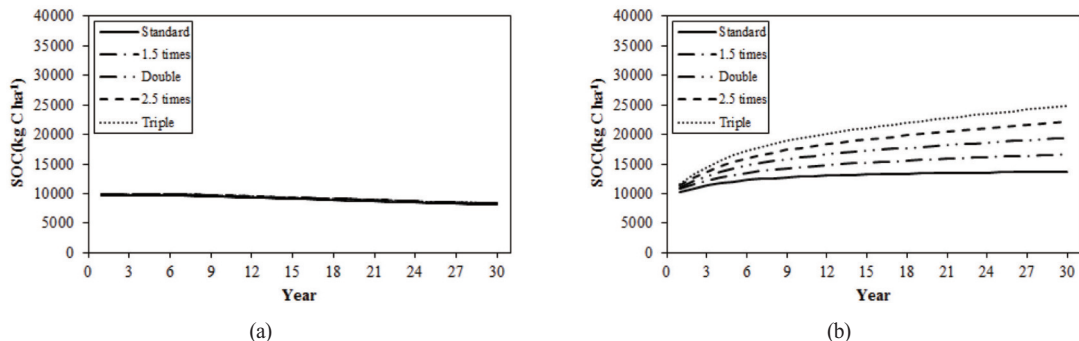
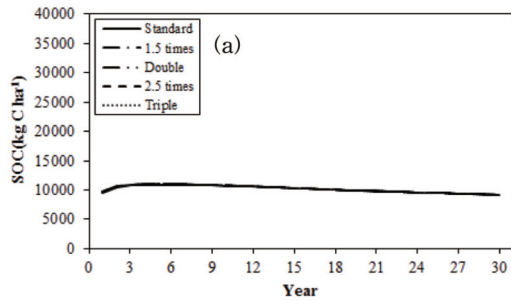
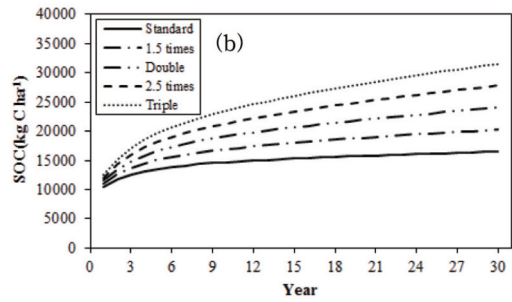


Fig. 5. SOC variation according to fertilizer application rate of (a)chemical (b)compost for corn cultivation with removal of above-ground biomass after harvest

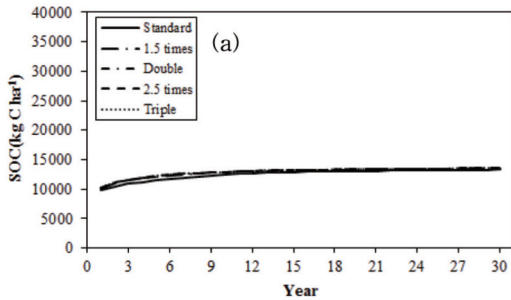


(a)

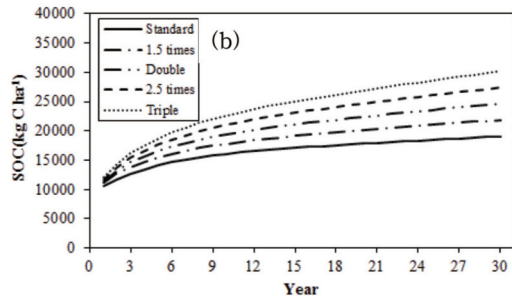


(b)

Fig. 6. SOC variation according to fertilizer application rate of (a)chemical (b)compost for corn-barley cultivation with removal of above-ground biomass after harvest

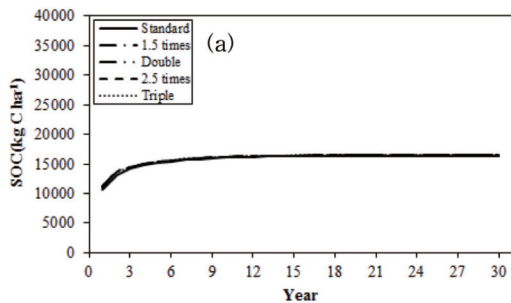


(a)

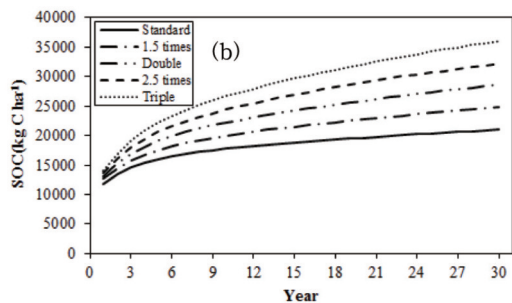


(b)

Fig. 7. SOC variation according to fertilizer application rate of (a)chemical (b)compost for corn cultivation with return of above-ground biomass after harvest



(a)



(b)

Fig. 8. SOC variation according to fertilizer application rate of (a)chemical (b)compost for corn-barley cultivation with return of above-ground biomass after harvest

부 제거, 옥수수-보리-지상부 제거, 옥수수 단작-지상부 환원, 옥수수-보리-지상부 환원의 경우, 각각 증가량이 115.4, 137.0, 282.0, 278.3 kg C ha⁻¹yr⁻¹, 증가율은 33.6, 39.0, 79.8, 71.0%였다. 1.5배구의 경우는 증가량이 196.8, 243.0, 358.5, 375.2 kg C ha⁻¹yr⁻¹, 증가율은 54.9, 65.7, 96.7, 89.1%였다. 2 배구의 경우는 증가량이 278.5, 353.2, 440.8,

486.4 kg C ha⁻¹yr⁻¹, 증가율은 75.6, 91.5, 115.8, 111.3%였다. 2.5배구의 경우는 증가량이 359.3, 463.5, 522.4, 591.3 kg C ha⁻¹yr⁻¹, 증감량은 94.9, 115.4, 133.7, 130.6%였다. 3배구의 경우는 증가량이 439.8, 573.0, 604.4, 702.6 kg C ha⁻¹yr⁻¹, 증가율은 113.1, 137.3, 150.7, 149.9%였다.

전체적으로 옥수수 단작 지상부 제거보다는 옥수

Table 4. Long-term SOC variation according to fertilization rate of chemical and compost and agricultural management

Fertilization	Agricultural management	CF		OF	
		Average SOC variation (kg C ha ⁻¹ yr ⁻¹)	Final SOC variation(%)	Average SOC variation (kg C ha ⁻¹ yr ⁻¹)	Final SOC variation(%)
Standard	CH	-50.1	-15.6	115.4	33.6
	CHBH	-68.8	-21.7	137.0	39.0
	CR	114.7	34.9	282.0	79.8
	CRBR	169.1	47.7	278.3	71.0
1.5times	CH	-48.0	-14.7	196.8	54.9
	CHBH	-72.6	-22.6	243.0	65.7
	CR	113.2	33.6	358.5	96.7
	CRBR	155.2	41.9	375.2	89.1
Double	CH	-49.6	-15.1	278.5	75.6
	CHBH	-74.1	-22.9	353.2	91.5
	CR	111.3	32.7	440.8	115.8
	CRBR	150.1	39.9	486.4	111.3
2.5times	CH	-49.5	-15.1	359.3	94.9
	CHBH	-74.1	-23.0	463.5	115.4
	CR	111.6	32.8	522.4	133.7
	CRBR	150.3	40.0	591.3	130.6
Triple	CH	-49.5	-15.1	439.8	113.1
	CHBH	-74.1	-22.9	573.0	137.3
	CR	112.0	32.9	604.4	150.7
	CRBR	150.6	40.0	702.6	149.9

※ CH: Com Harvest CHB120H: Com Harvest Barley Harvest CR: Com Return CRBR: Com Return Barley Return

수-보리 이모작 지상부 제거가 화학비료의 경우 SOC 감소량이 크고 퇴비의 경우는 증가량이 큰 것으로 나타났다. 퇴비 2배구이상인 경우 옥수수-보리 지상부 제거(CHBH), 옥수수-지상부 토양환원(CR), 옥수수-보리 지상부 토양 환원(CRBR) 간 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 퇴비 투입량이 많아지면 영농처리 효과를 상쇄하고도 남아 SOC가 증가하는 것으로 보인다.

장기적인 포장실험 결과에 의하면 토양탄소 격리는 토지이용 변화나 관리방법 도입시 변화가 즉각적으로 나타나며 이후 비선형적 증가를 보인다. 이후 새로운 평형상태에 도달하면 변화율은 감소하며 20~100년경과 후 새로운 평형에 이르면 더 이상 격리 증가가 일어나지 않는다. 이를 저장포화(Sink Saturation)라고 하는데, 대개 20년 후 증가폭은 미미하다(Watson *et al.*, 2000). 토양탄소 격리가 CO₂

방출을 상쇄하는 무한정한 잠재력을 가지고 있지 않으며 효과는 20~50년도 지속한다(Freibauer *et al.*, 2004). 이 연구결과도 선행 연구결과와 같이 SOC의 비선형적 증가를 보여주고 있다.

Morari *et al.*(2006)은 강수량 800mm, 북위 45°인 이탈리아의 북동부 지역에서 포장과 라이시미터 실험을 통해 작물 잔사 제거와 토양 환원 차이, 화학비료 시비량 증가, 가축분뇨 사용에 의한 SOC 격리의 장기적 영향을 평가하였다. 투입되는 탄소량이 작을 경우 순저장량이 음의 값을 나타내기도 하였고, 투입 탄소량 증가에 비례하여 탄소 격리가 증가하는 경향을 보였다. 평균적으로 단작에 비해 윤작이 20 kg C ha⁻¹yr⁻¹ 증가를 나타내어 증가율은 크지 않음을 알 수 있었다. 수확 후 작물 잔사를 토양에 환원하는 경우 제거하는 것에 비해 100 kg C ha⁻¹yr⁻¹의 증가율을 보였다. 화학비료구는 N과 P₂O₅를 각각 100,

50 kg ha⁻¹yr⁻¹에서 200, 100 kg ha⁻¹yr⁻¹로 증가시켜도 38 kg C ha⁻¹yr⁻¹ 증가하는 것으로 나타나는 것에 비해 가축분뇨 사용은 580 kg C ha⁻¹yr⁻¹ 슬러리를 이용했을 때 270 kg C ha⁻¹yr⁻¹의 탄소가 격리되는 것으로 나타났다.

Freibauer *et al.*(2004)은 단작에 비해 윤작 효과는 미미하며 유럽 경작지에서 잔사 환원을 통해 SOC가 200~700 kg C ha⁻¹yr⁻¹ 증가될 수 있음을 제시하였다. 화학비료 사용만으로는 SOC 증가가 없고 가축분뇨를 사용했을 때는 평균 380 kg C ha⁻¹yr⁻¹의 탄소가 격리된다고 주장하였는데, 전체적으로 이 연구의 DNDC 모의발생 결과는 Morari *et al.*(2006)과 Freibauer *et al.*(2004)의 결과 범위와 유사함을 알 수 있다.

IV. 결론

화학비료와 퇴비의 장기적 사용시 영농관리가 토양탄소에 미치는 영향을 파악하기 위해 현장실험 결과를 이용 DNDC 모형을 보정하였다. 보정된 매개변수를 적용하여 장기간 기상조건(1981~2010)을 대상으로 모의 발생을 실시하여 영농관리에 따른 처리 간 장기-평균적 효과를 분석하였다. 화학비료만 시비하는 경우, 추수 후 지상부 토양 환원이 없으면 SOC가 감소하는 것으로 나타났다. 퇴비의 경우, 모든 처리구에서 SOC 증가를 보였으며 옥수수과 함께 동절기 보리 재배시 추가되는 퇴비로 인해 SOC 증감이 단작보다 큰 것으로 나타났다.

퇴비 1배구에서 수확 후 지상부를 제거한 경우에 비해 지상부 잔사를 토양에 환원할 경우 SOC 증가율은 옥수수 단작의 경우 33.6%에서 79.8%, 옥수수-보리 경우 39.0%에서 71.0%로 커지는 것으로 나타났다. 퇴비의 투입량을 1배구부터 3배구까지 변화시켜 시비량 차이의 장기적 영향을 모의발생하고, SOC 변화를 고찰하였다. 투입된 퇴비량이 증가함에 따라 SOC 역시 증가하여 3배구의 경우 처리구에 따라 439.8~702.6 kg C ha⁻¹yr⁻¹까지 증가하였으며 증가율은 113.1~150.7%이었다. 퇴비 처리구에서 작물 잔사의 토양 환원에 따른 SOC 증가 효과는 2배구 이

상에서는 별로 크지 않은 것으로 나타났는데, 이는 퇴비에 의해 공급되는 SOC에 비해 작물 잔사에 의한 공급량이 상대적으로 크지 않기 때문인 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: NRF-2010-0008311).

인용문헌

- 강동환, 김성수, 권병혁, 김일규. 2008. 고품만 인공습지의 토양 유기탄소와 이산화탄소 변동 관측, 수산해양교육연구지 20(1), 58-67.
- 김건엽, 서상욱, 고병구, 정현철, 노기안, 심교문. 2008. 보리-고추와 보리-콩 작부체계에서 이산화 탄소수지 평가, 한국토양비료학회지 41(6), 408-414.
- 김상민. 2004. 비점오염 모형을 이용한 하수처리수 재이용에 따른 유역 오염총량 영향분석.
- 정기열, 이창훈, 이재생, 고지연, 최영대, 윤을수. 2008. 벼-보리 이모작 작부체계가 토양 탄소 함량에 미치는 영향, 한국환경농학회 학술발표논문집 1, 130-130.
- 정원교, 김선관. 2007. 우리나라 논토양의 토양 유기탄소 변동 특성, 한국토양비료학회지 40(1), 36-42.
- 정원교, 김선관, 연병열, 노재승. 2007. 동일 비료 장기연용 논에서 토양유기탄소의 변동, 한국토양비료학회지, 40(4), 292-297.
- Agbenin JO, Goladi JT. 1997. Carbon, nitrogen and phosphorus dynamics under continuous cultivation as influenced by farmyard manure and inorganic fertilizers in the savanna of northern Nigeria, Agriculture, Ecosystems and Environment 63, 17-24.

- Al-Kaisi MM, Yin X. 2005. Tillage and crop residue effects on soil carbon and carbon dioxide emission in corn-soybean rotation, *J. Environ. Qual.* 34, 437-445.
- Beare MH, Cabrera ML, Hendrix PF, Coleman DC. 1994. Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional- and no-tillage soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 787-795.
- Bruce JP, Frome M, Haites E, Janzen H, Lal R, Paustian K. 1999. Carbon sequestration in soils, *Journal of Soil and Water Conservation* 54, 382-389.
- Cai Z, Sawamoto T, Li C, Kang G, Boonjawat J, Mosier A, Wassmann R, Tsuruta H. 2003. Field validation of the DNDC model for greenhouse gas emission in East Asian cropping systems, *Global Biogeochem. Cycles* 17(4), 1-10.
- Chang HL, Jung KY, Kang SS, Kim MS, Kim YH, Kim PJ. 2013. Effect of long term fertilization on soil carbon and nitrogen pools in paddy soil, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 46(3), 216-222.
- Curtin D, Wang H, Selles F, McConkey BG, Campbell CA. 2000. Tillage effects on carbon fluxes in continuous wheat and fallow-wheat rotations, *Soil Science Society of America Journal* 64, 2080-2086.
- Freibauer A, Rounsevell MDA, Smith P, Verhagen J. 2004. Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe, *Geoderma* 122, 1-23.
- Govi M, Francioso O, Ciavatta C, Sequi P. 1992. Influence of long-term residue and fertilizer applications on soil humic substances: A case study by electro focusing, *Soil Science* 154, 8-13.
- Halvorson AD, Wienhold BJ, Black AL. 2002. Tillage, nitrogen and cropping system effects on soil carbon sequestration, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 906-912.
- Haynes RJ, Naidu R. 1998. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review, *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 51, 123-137.
- Holehoss H, Singh BR, Lal R. 2004. Carbon sequestration in soil aggregates under different crop rotations and nitrogen fertilization in an Inceptisol in southeastern Norway, *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 70, 167-177.
- Jackson LE, Calderon FJ, Steenwerth KL, Scow KM, Rolston DE. 2003. Responses of soil microbial processes and community structure to tillage events and implications for soil quality, *Geoderma*, 114, 305-317.
- Jastrow JD, Boulton TW, Miller RM. 1996. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, 801-807.
- Kapkiyai JJ, Karanja NK, Qureshi JN, Smithson PC, Womer PL. 1999. Soil organic matter and nutrient dynamics in a Kenyan nitisol under long-term fertilizer and organic input management, *Soil Biology and Biochemistry* 31(13), 1773-1782.
- Karlen DL, Mausbach MJ, Doran JW, Cline RG, Harris RF, Schuman GE. 1997. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 4-10.
- Kingery WL, Wood CW, Delaney DP, Williams JC, Mullins GL. 1994. Impact of long-term land application of broiler litter on

- environmentally related soil properties, *J. Environ. Qual.* 23, 139-147.
- Lal R, Kimble JM. 1997. Conservation tillage for carbon sequestration, *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 49, 243-253.
- Morari F, Lugato E, Berti A, Giardini L. 2006. Long-term effects of recommended management practices on soil carbon changes and sequestration in north-eastern Italy, *Soil Use and Management* 22, 71-81.
- Nash JE, Sutcliffe JV. 1970. River Flow Forecasting Through Conceptual Models: 1. A Discussion of Principles, *Journal of Hydrology* 10, 282-290.
- Ogle SM, Breidt FJ, Paustian K. 2005. Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions, *Biogeochemistry* 72, 87-121.
- Pathak H, Li CS, Wassmann R. 2005. Greenhouse gas emissions from Indian rice fields: calibration and upscaling using the DNDC model, *Biogeosciences* 2, 113-123.
- Paustian K, Andren O, Janzen HH, Lal R, Smith P, Tian G, Tiessen H, Van Noorwijk M, Woomer PL. 1997. Agricultural soils as a sink to mitigate CO₂ emissions, *Soil Use and Management* 13, 230-244.
- Raun WR, Johnson GV, Phillips SB, Westerman RL. 1998. Effect of long-term N fertilization on soil organic C and total N in continuous wheat under conventional tillage in Oklahoma, *Soil Tillage Res* 47, 323-330.
- Roberts WP, Chan KY. 1990. Tillage-induced increases in carbon dioxide loss from soil, *Soil Tillage Res.* 17, 143-151.
- Rudrappa L, Purakayastha TJ, Dhyam S, Bhadraray S. 2005. Long-term manuring and fertilization effects on soil organic carbon pools in a Typic Haplustept of semi-arid sub-tropical India, *Soil Tillage Res* 88, 180-192.
- Russell AE, Laid DA, Parkin TB, Mallarino AP. 2005. Impact of nitrogen fertilization and cropping system on carbon sequestration in Midwestern Mollisols, *Soil Sci Soc Am J* 69, 413-422.
- Smith WN, Grant B, Desjardins RL, Lemke R, Li C. 2004. Estimates of the inter annual variations of N₂O emissions from agricultural soils in Canada, *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 68(1), 37-45.
- Wang L, Qiu J, Tang H, Li H, Li C, Van Ranst E. 2001. Modelling soil organic carbon dynamics in the major agricultural regions of China, *Geoderma* 147, 47-55.
- Watson RT, Noble IR, Bolin B, Ravindranath NH, Verardo DJ, Dokken DJ(Eds.). 2000. Land use, land use change, and forestry. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.
- Xu R, Wang M, Wang Y. 2003. Using a modified DNDC model to estimate N₂O fluxes from semi-arid grassland in China, *Soil Biology and Biochemistry* 35, 615-620.
- Young LM. 2003. Carbon sequestration in agriculture: the U.S. policy in context, *Am. J. Agric. Econ.* 85, 1164-1170.

References

- Agbenin JO, Goladi JT. 1997. Carbon, nitrogen and phosphorus dynamics under continuous cultivation as influenced by farmyard manure and inorganic fertilizers

- in the savanna of northern Nigeria, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 63, 17-24.
- Al-Kaisi MM, Yin X. 2005. Tillage and crop residue effects on soil carbon and carbon dioxide emission in corn-soybean rotation, *J. Environ. Qual.* 34, 437-445.
- Beare MH, Cabrera ML, Hendrix PF, Coleman DC. 1994. Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional- and no-tillage soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 787-795.
- Bruce JP, Frome M, Haites E, Janzen H, Lal R, Paustian K. 1999. Carbon sequestration in soils, *Journal of Soil and Water Conservation* 54, 382-389.
- Cai Z, Sawamoto T, Li C, Kang G, Boonjawat J, Mosier A, Wassmann R, Tsuruta H. 2003. Field validation of the DNDC model for greenhouse gas emission in East Asian cropping systems, *Global Biogeochem. Cycles* 17(4), 1-10.
- Chang HL, Jung KY, Kang SS, Kim MS, Kim YH, Kim PJ. 2013. Effect of long term fertilization on soil carbon and nitrogen pools in paddy soil, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 46(3), 216-222.
- Curtin D, Wang H, Selles F, McConkey BG, Campbell CA. 2000. Tillage effects on carbon fluxes in continuous wheat and fallow-wheat rotations, *Soil Science Society of America Journal* 64, 2080-2086.
- Freibauer A, Rounsevell MDA, Smith P, Verhagen J. 2004. Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe, *Geoderma* 122, 1-23.
- Govi M, Francioso O, Ciavatta C, Sequi P. 1992. Influence of long-term residue and fertilizer applications on soil humic substances: A case study by electro focusing, *Soil Science* 154, 8-13.
- Halvorson AD, Wienhold BJ, Black AL. 2002. Tillage, nitrogen and cropping system effects on soil carbon sequestration, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 906-912.
- Haynes RJ, Naidu R. 1998. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review, *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 51, 123-137.
- Holeclass H, Singh BR, Lal R. 2004. Carbon sequestration in soil aggregates under different crop rotations and nitrogen fertilization in an Inceptisol in southeastern Norway, *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 70, 167-177.
- Jackson LE, Calderon FJ, Steenwerth KL, Scow KM, Rolston DE. 2003. Responses of soil microbial processes and community structure to tillage events and implications for soil quality, *Geoderma*, 114, 305-317.
- Jastrow JD, Boulton TW, Miller RM. 1996. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, 801-807.
- Jung KY, Lee CH, Lee JS, Ko JY, Choi YD, Yun ES. 2008. Effects of rice-barely cropping systems on soil carbon concentration in rice paddy, *Proceedings of the 1st symposium: Korean J Environ Agric.* 1, 222-223.
- Jung WK, Kim SK. 2007. Soil organic carbon dynamics in Korean paddy soils, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40(1), 36-42.
- Jung WK, Kim SK, Yeon BY, Noh JS. 2007. Long-term impact of single rice cropping

- system on SOC dynamics, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40(4), 292-297.
- Kang DH, Kim SS, Kwon BH, Kim IK. 2008. Observations of variations in soil organic carbon and carbon dioxide in the constructed wetland at Goheung bay, *Jour. Fish. Mar. Sci. Edu.* 20(1), 58-67.
- Kapkiyai JJ, Karanja NK, Qureshi JN, Smithson PC, Womer PL. 1999. Soil organic matter and nutrient dynamics in a Kenyan nitisol under long-term fertilizer and organic input management, *Soil Biology and Biochemistry* 31(13), 1773-1782.
- Karlen DL, Mausbach MJ, Doran JW, Cline RG, Harris RF, Schuman GE. 1997. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 4-10.
- Kim GY, Suh SU, Ko BG, Jeong HC, Roh KA, Shim KM. 2008. Evaluation of CO₂ balance in the barley-red pepper and barley-soybean cropping system, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 41(6), 408-414.
- Kim SM. 2004. Analysis of wastewater reuse effects on TMDL using nonpoint source pollution models, Ph.D dissertation, Seoul national university, Korea.
- Kingery WL, Wood CW, Delaney DP, Williams JC, Mullins GL. 1994. Impact of long-term land application of broiler litter on environmentally related soil properties, *J. Environ. Qual.* 23, 139-147.
- Lal R, Kimble, JM. 1997. Conservation tillage for carbon sequestration, *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 49, 243-253.
- Morari F, Lugato E, Berti A, Giardini L. 2006. Long-term effects of recommended management practices on soil carbon changes and sequestration in north-eastern Italy, *Soil Use and Management* 22, 71-81.
- Nash JE, Sutcliffe JV. 1970. River Flow Forecasting Through Conceptual Models: 1. A Discussion of Principles, *Journal of Hydrology* 10, 282-290.
- Ogle SM, Breidt FJ, Paustian K. 2005. Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions, *Biogeochemistry* 72, 87-121.
- Pathak H, Li CS, Wassmann R. 2005. Greenhouse gas emissions from Indian rice fields: calibration and upscaling using the DNDC model, *Biogeosciences* 2, 113-123.
- Paustian K, Andren O, Janzen HH, Lal R, Smith P, Tian G, Tiessen H, Van Noorwijk M, Woomer PL. 1997. Agricultural soils as a sink to mitigate CO₂ emissions, *Soil Use and Management* 13, 230-244.
- Raun WR, Johnson GV, Phillips SB, Westerman RL. 1998. Effect of long-term N fertilization on soil organic C and total N in continuous wheat under conventional tillage in Oklahoma, *Soil Tillage Res* 47, 323-330.
- Roberts WP, Chan KY. 1990. Tillage-induced increases in carbon dioxide loss from soil, *Soil Tillage Res.* 17, 143-151.
- Rudrappa L, Purakayastha TJ, Dhyan S, Bhadrarary S. 2005. Long-term manuring and fertilization effects on soil organic carbon pools in a Typic Haplustept of semi-arid sub-tropical India, *Soil Tillage Res* 88, 180-192.
- Russell AE, Laid DA, Parkin TB, Mallarino AP. 2005. Impact of nitrogen fertilization and

- cropping system on carbon sequestration in Midwestern Mollisols, *Soil Sci Soc Am J* 69, 413-422.
- Smith WN, Grant B, Desjardins RL, Lemke R, Li C. 2004. Estimates of the inter annual variations of N₂O emissions from agricultural soils in Canada, *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 68(1), 37-45.
- Wang L, Qiu J, Tang H, Li H, Li C, Van Ranst E. 2001. Modelling soil organic carbon dynamics in the major agricultural regions of China, *Geoderma* 147, 47-55.
- Watson RT, Noble IR, Bolin B, Ravindranath NH, Verardo DJ, Dokken DJ (Eds.). 2000. Land use, land use change, and forestry. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.
- Xu R, Wang M, Wang Y. 2003. Using a modified DNDC model to estimate N₂O fluxes from semi-arid grassland in China, *Soil Biology and Biochemistry* 35, 615-620.
- Young LM. 2003. Carbon sequestration in agriculture: the U.S. policy in context, *Am. J. Agric. Econ.* 85, 1164-1170.