

연구논문

수질 환경을 고려한 농경지 토양 탄소 관리 방안

이경숙* · 윤광식* · 최동호* · 정재운** · 최우정* · 임상선*
전남대학교 지역·바이오시스템공학과*, 국립환경과학원 영산강물환경연구소**
(2012년 10월 10일 접수, 2012년 12월 10일 승인)

Agricultural Soil Carbon Management Considering Water Environment

Kyoungsook Lee* · Kwangsik Yoon* · Dongho Choi* ·
Jaewoon Jung** · Woojung Choi* · Sangsun Lim*
Dept. of Rural & Bio-systems Engineering, Chonnam National University*
Yeongsan River Environment Research Center**
(Manuscript received 10 October 2012; accepted 10 December 2012)

Abstract

Carbon sequestration on soil is one of the counter measurements against climate change in agricultural sector. Increasing incorporation of organic fertilizer would increase soil organic carbon (SOC) but it could bring high potential of nutrient losses which would result in water quality degradation. In this paper, literature review on soil organic carbon behavior according to agricultural management is presented. The results of field experiment to identify the effect of organic and commercial fertilizer applications on SOC and runoff water quality were also presented. Field experiment confirmed increased SOC and nutrient concentrations in runoff water as application rate of organic fertilizer increase. The potential use of simulation model to develop best agricultural management practice considering carbon sequestration and water quality conservation at the same time is discussed and monitoring and modeling strategies are also suggested to achieve the goal.

Keywords : Carbon sequestration, SOC, Organic and commercial fertilizer, Runoff water quality

1. 서론

지금까지 환경관리를 위한 농경지의 물질수지에 관한 많은 연구(김진수 등, 2000; 오승영 등, 2002;

윤춘경 등, 1999; 전지홍 등, 2003; 최진규 등, 2001)는 수질지표인 유기물과 부영양화를 일으키는 질소와 인의 계량화 및 제어에 초점을 맞추어 왔다. 한편 이산화탄소와 같은 온실가스의 농도 증가에

따른 지구 온난화 문제는 현재 전 지구적으로 가장 큰 현안이다. 토양은 대기중으로 CO₂의 배출원이 되기도 하고 저장고가 되기도 하는데, 광합성을 통해 식물체에 고정된 CO₂는 식물체 잔재물이 토양으로 환원되면 토양 유기물로 전환되어 유기탄소 형태로 토양에 저장된다. 농업은 인간 활동에 의해 발생한 CO₂ 배출의 25%를 차지하는 것으로 추정되고 있고(Duxbury, 1994, 1995), 일반적으로 영농 활동에 의해 온실가스를 배출하지만 반대로 이산화탄소를 흡수하여 biomass나 토양 중에 저장할 수 있다. Biomass나 토양에 의한 탄소저장은 농업분야의 기후변화 대응 수단으로 중요시되고 있다. 미국에서는 '탄소를 작물과 토양에 저장하는 하나의 수단'으로 탄소고정을 정의하고, "저장되는 탄소의 양은 양호한 토양관리와 적절한 토지이용에 달려있다"고 밝혔다.

토양유기탄소(SOC; Soil Organic Carbon)는 토양유기물의 주요 성분이며(Cambardella and Doran, 1996), 농경지로부터 토양유기탄소 손실은 주로 토양유실을 발생시키는 경운 등에 기인한다(Lal *et al.*, 1997). 추수후 작물의 잔재물을 지표에 남기는 것은 토양유실을 억제하고 SOC양을 증가시키지만, 만일 경운을 하게 되면 미생물이 탄소를 CO₂로 빠르게 전환시켜 그 효과를 상쇄시킨다(Weil and Magdoff, 2004). 농경지 탄소고정은 토성(Lal, 2004), 경사특성(Guo *et al.*, 2006) 기후(Frenzluebbers and Steiner, 2002)에 크게 영향을 받으며, 온난하고 건조한 지역에서 0~150 kg C ha⁻¹ yr⁻¹, 습하고 찬 기후 조건에서는 100~1,000 kg C ha⁻¹ yr⁻¹ 범위를 보이며, 토지관리 정도에 따라 토양에서 대기로 온실가스가 방출되는 정도가 다름을 암시하고 있다.

농촌진흥청은 지난 10년간 유기농업 연구포장에서 화학비료 대신 퇴비, 녹비 등 유기물을 지속적으로 투입한 결과, 상당량의 탄소가 토양에 축적되는 것을 확인하였다고 밝혔다. 볏짚퇴비는 화학비료 투입에 비해 투입 3년 후 1ha 당 16.9톤의 탄소를 더 저장하는 효과를 가져왔다. 반면, 화학비료만 주

었을 때는 탄소축적효과가 거의 없었으며, 비료를 주지 않았을 때는 토양의 탄소가 줄어드는 것으로 나타났다.

하지만 토양 탄소를 늘리기 위한 장기적 유기물 사용 등은 수질 측면에서 부정적인 영향을 끼칠 수 있어 영양물질과 탄소의 동시 관리 필요성이 대두되고 있다. 탄소의 저장고로 토양을 이용하면서 수권으로 유기물질 및 영양물질이 배출되는 것을 최소화 하여야 한다. 따라서 농경지 내 질소와 인과 함께 탄소의 거동을 살피고 이들 간의 관계를 밝히는 연구가 필요하지만 아직까지 농경지를 대상으로 유기물 투입에 의한 탄소 고정과 수질오염을 일으키는 영양물질 손실간의 관계를 규명한 연구는 살펴보기 어렵다.

한편, 실내실험에서 조사된 유기물의 변환과 순환체계는 포장실험의 결과와 상이한 경우가 많다. 이는 수문순환의 영향이 고려되지 않았기 때문이다. 실내 실험에서 조사된 중요 인자들인 작물, C/N비, pH, DOC 농도들의 영향이 포장실험에서는 종종 확인되지 않고, 토양흡착능력에 의한 수용성 토양유기물의 이동성 차이는 대공극 흐름이 있는 곳에서는 그 영향이 확실치 않으며, 실험실에서 결정된 수용성 유기물의 생분해도 역시 포장조건과 상이할 수가 있다(Kalbitz *et al.*, 2000). 최근까지 국내의 많은 연구가 실내실험 수준에서 요인분석이 이루어지고 있으며, 포장실험 수준에서 이루어진 연구결과가 많지 않다.

다양한 기상과 토양 조건하에서 토양 및 농경관리, 예를 들어 경운, 시비, 물 관리, 추수 후 잔류물 관리, 동절기 피복 및 사료 작물 재배 등이 토양유기탄소 저장에 미치는 영향을 정확히 파악하기 위해서는 포장 실험이 필요하다. 하지만 그 효과를 살펴보기 위해서는 장기간이 소요되고 인력과 비용이 과대해지는 문제점이 있다. 또한 하나의 요인이 아닌 여러 가지요인의 복합적인 효과를 포장 실험에서 규명하기는 어려움이 있다. 이를 해결하기 위해 외국의 경우 자연 현상을 모의발생 할 수 있는 모형을 개발하여 적용해오고 있다. 더욱이 수질 관리 측

면을 고려하면서 기후변화 대책으로 탄소를 저장할 수 있는 농경지 관리기법 마련을 위해서는 모델링 연구가 시급하지만 국내에서는 모니터링과 모델링을 함께 이용하는 관리기술을 연구하는 사례는 매우 드물다. 영농관행에 따른 토양 내 탄소와 질소, 인의 거동별 장기적인 영향에 관한 모델링 연구는 실측자료 부재로 모형의 default 값을 이용해 수행되고 있어 모델링 결과의 신뢰성 확보를 위해서는 포장규모 이상의 현장모니터링이 선행되어야 한다.

본 논문에서는 국내외 문헌 고찰을 통하여 농경지 토양 탄소 고정에 대한 연구 동향을 소개하고, 퇴비 사용에 따른 토양탄소와 수질영향을 조사한 현장 실험 결과를 제시하여 향후 수질 환경을 고려한 농경지 토양 탄소 관리 방안과 농경지 관리기법 마련을 위한 기초 자료를 제공하고자한다.

II. 농경지 탄소와 영양물질 거동

1. 유기물 투입에 따른 영양물질 거동에 관한 연구

비료로 인한 환경 문제로는 작물생산에 사용되고 남은 질소, 인산으로 인한 하천수와 지하수 오염문제가 제기될 수 있다. 국내에서는 유기비료 사용시 수질과 오염부하에 대한 연구가 많지 않은 편이다. 이는 흔히 유기비료 사용은 친환경 농업으로 여겨지고 있는데, 시비량, 시비시기, 유기비료 종류 및 물관리 관행 등의 변수에 의해 오염부하가 큰 것으로 조사결과가 도출될 경우 친환경 농산업을 미치는 파급효과를 고려하여 그 결과를 제시하는데 어려운 점이 있을 것으로 판단된다.

외국의 사례를 살펴보면 Wood *et al.*(1999)은 미국 알라바마지역에서 화학비료, 계분 9 t ha⁻¹와 계분 18 t ha⁻¹을 살포하여 옥수수를 키우면서 강우 유출수에 의한 질소와 인 등의 영양물질 유출을 조사하였다. 화학비료와 계분 9 t ha⁻¹은 질소와 인 손실에 두 처리간 큰 차이는 없었지만, 계분 18 t ha⁻¹ 경우는 두 처리에 비해 월등히 많은 질소와 인의 유출을 보였다. 계분 9 t ha⁻¹의 경우 수질환경에 미치는 영향을 화학비료에 비해 크지 않았으나, 수확량이

다소 떨어지는 것으로 나타났다. 따라서 유기비료를 이용한 농업도 제대로 관리가 이루어지지 않으면 환경적 오염부하가 크다는 것을 알 수 있다.

국내 연구 사례를 살펴보면 노기안 등(1999)은 상수원 보호지역 내 하상충적토 사력질의 비 재배논에서 관행시비와 유기물 시용에 따른 비료성분의 지하용탈 특성을 조사 분석하였다. 퇴비+화학비료 감비나 우분이나 우분퇴비로 대체한 처리는 표준시비에 비해 지하용탈을 50%나 줄일 수 있었으며 비 재배기간 동안 기존의 화학비료 위주의 시비 체계에서 축산분뇨를 효율적으로 이용함으로써 화학비료 사용량을 줄이거나, 볏짚 등의 유기자원 환원을 통해 양분의 지하용탈에 의한 수계오염 가능성을 크게 줄일 수 있다고 제안하였다. 하지만 본 연구는 지표수 유출에 대한 손실을 함께 살펴지 못한 점이 있다. 최용훈 등(2009)은 강원도 평지밭과 고랭지밭에서 강우시 발생하는 강우 유출수와 수질농도를 측정하여 SS, COD_{Cr}, COD_{Mn}, BOD, TOC, TP, TN의 유출 특성과 오염부하를 계산하였다. 고랭지밭은 화학비료의 사용량이 많기 때문에 TP와 TN의 오염부하 총량이 높았으며, 평지밭은 퇴비의 사용량이 많기 때문에 유기물의 오염부하 총량이 높은 것으로 조사되었다.

전북 완주군 고산면 유기농업단지에서 유기비료 사용에 따른 토양과 물에서의 질소와 인의 함량조사가 이루어졌다(Lee *et al.*, 2011). 시비 후 즉각 반응을 나타내는 화학비료 논과 달리 유기비료 논에서의 T-P와 T-N 농도는 이양 후 2~3주 후에 최고 농도를 보였다.

장기간 유기비료를 투입한 농경지의 유효인산 집적 효과를 살펴보기 위해 15년간 가축분뇨(N:88 kg ha⁻¹, P₂O₅: 125 kg ha⁻¹)를 사용한 전북 완주 고산면과 10년간 유박(N: 166 kg ha⁻¹, P₂O₅: 55.4 kg ha⁻¹)을 사용한 한국농어촌공사 대호 친환경지구를 비교해 보면, 장기간 가축분뇨를 사용한 논인 경우 토양 내 유효인산 농도가 적정치인 100 mg kg⁻¹보다 클 뿐만 아니라 Shin *et al.*(1988)이 제안한 토양의 인유출 한계인 P₂O₅ 232 mg kg⁻¹

를 초과하였다. 하지만, 대호 친환경지구의 유박 사 용지구는 100 mg kg^{-1} 이하의 유효인산 값을 보여 유기농업지역의 유효인산의 토양 집적 정도는 비종 과 시비량, 시비 년수에 따라 크게 다른 것으로 나 타났다.

2. 농경관리와 탄소거동

1) 가축분뇨 시용에 따른 토양 탄소 고정

축분을 18년간 장기 시용하고 옥수수-콩을 재배 한 케냐의 경우 SOC가 해년마다 $10\sim 23 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 비율로 증가 하였으며, 총 투입량의 $5\sim 12\%$ 탄소가 저장된 것으로 조사되었다(Kapkiyai *et al.*, 1999). 이와 비슷하게 축분을 45년간 목화-기니아콩 재배 에 시용한 나이지리아 경우 탄소 저장은 투입량 10% 연간 $20\sim 22 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 비율로 나타났다 (Agbenin and Goladi, 1997). 미국 조지아 주에서 버뮤다 그래스 목초지에 계분을 5년간 시용한 토양 속의 탄소 저장량은 $26\pm 55 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이었고, 이 것은 투입량의 $14\pm 30\%$ 이었다(Franzluebbers *et al.*, 2001). Tall Fascue 목초지에 21년간 계분을 시용한 미국 알라바마의 경우 저장량은 $30 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로 투입량의 8%가 저장되었다(Kingery *et al.*, 1994). 22년간 축분을 사용한 이탈리아의 경우 표 층 10cm 토양의 SOC가 $53\sim 66\%$ 증가 하였으며 증가율은 $20 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 라고 보고되었다(Govi *et al.*, 1992).

축고 습한 지역인 캐나다 퀘벡의 경우 10년간 옥 수수 밭에 축분을 시용 했을 때 $7\sim 10\%$ 의 투입 탄소가 저장되었으며, 사용량이 $8 \text{ kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 인 처리 구에서의 탄소 고정량은 $223 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이었다. 역 시 축고 건조한 캐나다 앨버타의 경작지에 11년간 축분을 이용 했을 때 $0\sim 15\text{cm}$ 토양층의 SOC가 건 조지역의 경우 약 두 배 관개조건에서는 두 배 이상 의 증가를 보였다(Sommerfeldt *et al.*, 1988). Chang *et al.*(1991)은 물관리에 상관없이 탄소 고 정량은 투입량에 영향을 받으며 $32\pm 4\%$ 까지 고정 되었다고 보고하였다. 일반적으로 분뇨 시용량이 많아지면 탄소 고정이 증가 하는 것으로 나타났다

(Sommerfeldt *et al.*, 1988; Gupta *et al.*, 1992). 하지만 기후에 따라 저장되는 정도가 차이가 있는 것으로 나타났으며 열대지역은 $7\pm 5\%$ 이었고 한냉 한 지역은 $23\pm 15\%$ 로 저장능이 열대지역보다 더 큰 것으로 보고되었다. 이는 높은 온도에서는 토양 미생물의 활동이 활발하여 유기물 분해를 촉진하 며, 토양수분에 따라 분해가 촉진되고 가속되었기 때문이다.

2) 농경관리와 탄소거동

경운과 같은 토양 관리는 토양 입단을 교란시키 고 식물 잔재물을 토양에 섞이게 하며 토양 유기탄 소를 산화시켜 CO_2 방출을 증가시키기도 한다 (Beare *et al.*, 1994; Jastrow *et al.*, 1996). 저경 운은 CO_2 방출을 줄이고 대기 중의 탄소를 토양에 고립시키는 관리 방안으로 알려져 있다(Lal and Kimble, 1997; Curtin *et al.*, 2000; Al-Kaisi and Yin, 2005). 이는 토양 교란과 미생물 활동을 줄여서 CO_2 방출을 저감시키는 것이다. 무경운을 하면서 작물 잔류물을 지표면에 남기는 경우가 탄 소 방출을 더욱 저감시킨다(Al-Kaisi and Yin, 2005). 이와는 대조적으로 경운 강도를 증가시키면 통기성이 증가하여 CO_2 방출이 증가하고(Roberts and Chan, 1990), 토양 용액 속에 용해되어 있던 CO_2 가 나오기 때문에 방출량이 증가한다(Jackson *et al.*, 2003).

작물 뿌리의 호흡은 토양으로부터 CO_2 방출의 절반을 차지하기도 한다(Rochette and Flanagan, 1997; Cutin *et al.*, 2000). 또한 토양으로부터 대 기로 CO_2 방출은 토양 탄소 손실의 주요 기작이며 (Parkin and Kapar, 2003), 단기간에 토양 관리 에 따른 유기탄소 변화를 감지할 수 없을 때 토양 탄소 수준을 나타내는 지표가 된다(Fortin *et al.*, 1996; Grant, 1997). 건조한 토양에 강수나 관개에 의해 수분이 공급되면 미생물 활동, 탄소의 무기화 와 호흡이 촉진되어 CO_2 플럭스를 증가시킨다(Van Gestel *et al.*, 1993; Calderon and Jackson, 2002). 작물재배 형태도 토양으로 환원되는 잔재물 의 양과 질에 영향을 주어 CO_2 방출에 영향을 미친

다(Curtin *et al.*, 2000; Al-Kaisi and Yin, 2005; Amos *et al.*, 2005). 작물의 지상부와 지하부 생체량 증가도 토양으로 환원되는 잔재물량을 늘려서 CO₂ 플럭스 늘리기도 하는데(Sainju *et al.*, 2006), 지하부 생체량 증가는 뿌리와 근근역의 호흡량을 늘리기도 해서 CO₂ 플럭스에 영향을 주고(Amos *et al.*, 2005), 이와 유사하게 잔재물의 성질, 예를 들어 C/N비는 잔류물 분해 속도에 영향을 주고 결과적으로 CO₂ 방출에 영향을 끼친다(Al-Kaisi and Yin, 2005). 작물재배 밀도를 늘리면 CO₂ 방출을 키우기도 하지만, 더 많은 잔류물을 토양으로 보내 탄소 저장량을 늘리기도 한다(Curtin *et al.*, 2000). 질소 시비는 작물 생산에 중요한 요소이나 토양 표면으로부터 CO₂ 방출에는 큰 영향이 없는 것으로 보고되었다(Rochette and Gregorich, 1998; Amos *et al.*, 2005). 농경지 관리는 토양 온도와 수분에 영향을 미치며 CO₂ 플럭스에 직접적 영향을 준다(Bajracharya *et al.*, 2000; Pakin and Kasper, 2003). 예를 들어 무경운의 경우에는 보다 많은 토양 수분을 함유할 수 있고, 건조 토양의 경우 수분 스트레스 때문에 미생물 호흡이 제한받는데, 이것이 해결되면 보다 많은 CO₂를 방출하기도 한다. 이와 비슷하게 작물재배 형태나 종류는 그들과 증발산에 영향을 미쳐 토양 온도와 수분에 영향을 주기도 한다(Amos *et al.*, 2005).

SOC 변화에 대한 연구는 주로 작물시스템, 시비, 토양특성, 기후조건의 장기적인 영향을 다루고 있다(Hooker *et al.*, 2005; Jung and Kim, 2006; Sainju *et al.*, 2006). 환경조절인자(온도, 강수량 등)는 잠재적인 토양탄소고정을 제한하고(Wall *et al.*, 2006) 토양탄소 순변화의 예측에 가장 유용한 지표이다(Parkin and Kaspar, 2003). 토양유기물의 무기화에 영향을 미치는 5가지 무생물 인자는 점토함량, 토양 pH, 토양용적밀도, 강우, 온도이며(Frenzluebbers and Steiner, 2002), 이들 중 온도가 가장 영향이 크다. 30°C 이상이거나 9°C 이하에서는 미생물의 활동에 크게 영향을 받지 않지만, 9°C~30°C 사이에서는 조그만 온도변화에도 생물학

적 호흡에 큰 영향을 미친다(Lal, 2004).

국내의 토양 유기탄소(SOC)에 관한 연구를 살펴보면 강동환 등(2008)은 고흥 간척지 내 인공습지의 토양 유기탄소와 이산화탄소 변화를 살펴본 결과 여름철에 토양 유기탄소량이 증가 하는 것을 관측하였다. 정원교와 김선관(2007)은 우리나라 논토양의 토양 유기탄소가 1999년 이후 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 농경지 토양이 온실가스 흡수원으로서 역할을 수행하고 있는 것으로 보고 한 바 있다. 또한 정원교 등(2007)은 인산, 칼리 및 석회를 장기간 사용한 농경지에서 토양 유기탄소 함량이 높게 나왔으며, 퇴비 사용구에서 토양 유기탄소 함량이 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다고 보고하였으며, 농경지에서 유기탄소 축적을 위하여 퇴비의 지속적인 사용을 제안하였다. 김건엽 등(2008)은 보리-고추와 보리-콩 작부체계에서 이산화탄소의 수지를 평가하여 농경지가 탄소의 저장원의 역할을 하는 것으로 보고하였다. 정기열 등(2008)은 벼-보리 이모작 작부체계가 벼 단작 보다 토양 유기물 관리에 유리한 토양관리 방법으로 평가하였다. 김건엽 등(2008)은 지금까지 탄소수지 연구는 국내의 경우 대부분 산림에 국한되어 진행되어 왔으며, 농경지의 토양의 탄소배출과 작물의 탄소고정 및 토양의 탄소저장의 종합적인 탄소순환 연구를 찾아보기 어려워 이의 필요성을 주장하였다.

3 농경지의 영양물질과 탄소 거동 모델링 연구동향

EPIC 같은 농업생태계 모형은 농경지의 강우·유출에 의한 토양 유실, 질소와 인의 유실과 작물 생산성과의 관계를 모의 발생하기 위해 개발되었다(Williams *et al.*, 1984). 적용사례를 살펴보면 경운과 작물 윤작 시비량의 차이 등으로 인한 토사와 영양물질 손실(Phillips *et al.*, 1993), 가축분뇨 농경지 살포로 인한 영양물질 손실(Edwards *et al.*, 1994; Pierson *et al.*, 2001), 지표하 질산태 질소 이동(Chung *et al.*, 2001; Chung *et al.*, 2002), 작부시스템에 따른 영양물질 순환(Bernardos *et al.*, 2001), 기후변화에 따른 토사유실과 작물생산량 영

향(Favis-Mortlock *et al.*, 1991; Brown and Rosenberg, 1999), 작물생산에 미치는 관계효과(Rinaldi, 2001), 토양온도 예측(Potter and Williams, 1994; Roloff *et al.*, 1998) 등으로 다양한 환경요인 평가에 적용성이 있음을 보여주고 있다.

EPIC 모형은 발전을 거듭하여 농경관리 외에도 초지, 산림, 바이오매스 작물의 영향을 모의 발생할 수 있게 되었으며, 최근에는 생지화학적 부모형(Biogeochemical Submodel)을 개선하여 탄소와 질소 동역학을 상세히 모의발생 가능하게 되었다(Izaurrealde *et al.*, 2006). 작물성장은 작물이 이용하여 광합성을 통해 생체로 전환될 수 있는 유효 태양 복사에너지 개념을 사용한다. 모형에서 생체량 증가는 증기압 부족과 대기 CO₂ 농도에 영향을 받고, 제한인자로는 토양수분, 온도, 영양물질(N, P, K), 통기성, 토양강도 등이 있으며 이중 최악의 조건이 작물 성장을 저해하는 것으로 개발되었다. 모형은 실제 기상자료를 입력 받을 수 있고, 자료가 없는 경우 장기간의 강우, 대기온도, 태양복사에너지, 풍속, 상대습도 등을 모의발생 할 수 있다. 모델링에 필요한 토양 정보로는 토층깊이, 토성, 용적밀도, 탄소농도 등이다. 토양 내 부식질은 이분해, 난분해 등 전환 기간이 다른 3개 Pool을 구성한다. 여기에 작물잔류물, 뿌리, 퇴비로 토양에 들어오는 탄소원은 2개 Pool로 나누어 다룬다. 질소와 인의 손실은 용탈(용해성 C, NO₃⁻), 가스화(CO₂, N₂O, N₂), 토양유실(입자태 유기탄소, 입자태 N)과 지표수 유출(용해성 C, NH₄⁺, NO₃⁻) 등으로 이루어진다. 토양 용적밀도는 경운, 강수량, 유기물의 함수로 모의 발생한다.

Apezteguia *et al.*(2009)은 EPIC 모형과 토양 샘플링이 지상조건, 토양, 농경지 관리에 따른 토양 유기탄소(SOC) 변화 추적에 효과적으로 이용될 수 있음을 보여주었다. 임야지역을 농경지로 전환하여 40년간 경작이 이루어진 곳을 대상으로 EPIC 모형이 적용되었다. 40년 기간 동안 총 5회의 토양 유기탄소 관측 자료가 있었다. 이 자료를 바탕으로 장기적인 영농관리 이력을 재구성하여 모의발생을 하였

으며 자료 결측기간의 SOC를 EPIC을 이용 추정할 수 있음을 보여주었다. EPIC 모형을 이용하여 토양속 TOC 이동성을 예측한 결과 TOC 손실량은 각각 38.4 Mg ha⁻¹, 44.1 Mg ha⁻¹로 나타났다. TOC 함량의 손실률은 44%, 45%로 나타났으며, 경운을 하지 않고 작물을 키울 경우 토양은 대기 중 이산화탄소를 저장시킬 수 있을 것으로 나타났다.

EPIC 모형 이용의 또 하나의 사례는 독일 남서부 지역의 적용 예이다(Norbert *et al.*, 2009). 토양 탄소고정에 무경운과 전통경운의 장기적인 영향을 파악하기 위해 토양과 경운 방법과 기간이 다른 13 지역의 토양유기탄소(SOC)를 조사 한 뒤, 설문조사를 통해 과거 농업관리이력을 재구성하고 과거의 장기 기상자료를 적용하여, 현재의 토양유기탄소 수준을 모의 발생 하는지 연구하였으며, EPIC이 유의성 있게 이를 모의 발생 할 수 있는 것으로 보고 하였다. 이를 통해 과거의 토양탄소 함량에 대한 자료가 부족하여도 모델링을 통해 서로 다른 경운, 시비수준 등 농경관리의 영향을 추정해 낼 수 있음을 보여주었다.

또 다른 대표적인 모형은 DNDC이다. DNDC 모형은 논과 밭에서의 작물성장, 탄소고립, 온실가스 방출, 질산용탈 등을 모두 다룰 수 있는 모형이다(Li *et al.*, 1994). DNDC는 6개의 부모형으로 이루어져 있으며 이는 토양기상, 작물성장, 분해, 질산화, 탈질 및 발효 부모형이다. 토양기상 부모형은 토양의 물리적 성질, 일별 기상과 작물수분 이용을 기초로 토양온도, 습도를 계산한다. 작물성장 부모형은 작물성장과 알곡, 몸체, 뿌리 부분 생체량을 계산한다. 분해 부모형은 토양미생물 호흡에 의한 토양 유기물 분해를 다룬다. 질산화 부모형은 질산화 미생물 성장을 계산하고 암모늄의 질산화를 모의 발생 한다. 탈질 부모형은 시간 간격으로 탈질을 모의발생하며 N₂O, NO 등을 계산하고, 발효 부모형은 혐기성조건에서 메탄생성을 모의 발생한다. DNDC에서 토양유기탄소(SOC)는 작물 잔재물, 미생물생체, 빠른 부식질, 느린 부식질의 4개의 Pool로 이루어져 있는데 각 Pool은 2내지 3개의 subpool로

구성된다. 각 subpool의 분해속도는 토양내 온도, 수분, Redox 포텐셜과 질소 가용 정도에 따라 결정된다. 새로운 작물 잔류물이 토양에 섞이게 되면 DNDC 모형은 C/N 비에 따라 이분해, 난분해 성분으로 나누고 미생물이 사멸하면 사체는 느린 부식질로 환원되며 이는 미생물에 의해 이용되며 느린 부식질로 전환된다. 더 반응이 진행되면 유기탄소가 CO₂로 바뀐다. 토양관리, 윤작, 경운, 시비, 퇴비, 관개, 제초 등을 매개 변수화하여 생지화학과정에 영향을 주도록 DNDC에서 처리하고 있다 (Li *et al.*, 2004).

DNDC 모형은 기후대, 토양종류, 관리조건에 따른 토양유기탄소 변화나 온실가스 배출 연구에 적용되어 왔다(Cai *et al.*, 2003; Pathak *et al.*, 2005; Smith *et al.*, 2004; Xuri *et al.*, 2003). DNDC 모형의 장점은 밭 조건뿐 아니라 논벼와 같은 담수 작물에도 적용이 가능하다는 것이다. 때문에 아시아 지역의 조건에도 적용성이 있다는 장점이 있다. Zhang *et al.*(2006) 중국의 북서 지방을 대상으로 농경지 관리대안에 따른 토양탄소 저장에 관한 연구를 위해 DNDC를 적용하였다. 전통적으로 퇴비를 쓰던 지역에서 화학비료의 도입으로 토양유기탄소가 손실되고 이는 CO₂방출로 이어진다. 이를 계량화하기 위해 5개의 농업 지구를 대상으로 토양유기탄소 거동을 모의 발생 하였으며, DNDC 모형이 중국의 기후조건, 토양 및 농업관리에 따른 토양유기탄소(SOC) 거동을 성공적으로 모의 발생 할 수 있는 것으로 보고하였다. DNDC 모형을 이용한 연구결과 현재 농업관리하의 농경지는 CO₂를 방출하는 발생원으로 작용하는 것으로 나타났다. 농경지가 작물 잔류물을 15%에서 50%이상 토양에 환원시 탄소의 발생원에서 저장원이 됨을 밝혔다. 또한 퇴비의 이용도 이보다는 약한 저장효과가 있다고 보고하고 있으며, 탄소저장을 위해 전통적인 농업관리(추수 후 작물 잔류물 토양에 환원, 퇴비이용)를 회복해야 한다고 주장하고 있다.

모델링 기술은 과거 자료가 없거나 장기간 관측이 어려운 경우 현장실험의 대안이 될 수 있다. 농

경지 관리에 따른 토양 탄소고정 효과를 모델링하기 위해 EPIC, DNDC와 같은 모형선정, 현장조사, 모델링, 관리 시나리오별 매개변수 산정, 모형 예민도 분석, 기후변화 시나리오 개발 및 모형 입력자료 도출을 통해 수질환경보전과 기후 변화 대비 토양탄소 고정 모델링 기법 확립이 필요하다. 수질환경보전과 탄소저감을 위한 농업생태계 최적의 물질관리 방안 모델링 기법이 개발되면, 향후 우리나라의 농업생태계 관리방안 도출 및 정책수립에 이용될 수 있다. 이를 위해서는 강우시 유출수에 의한 토사, 질소, 인 및 탄소의 손실을 동시에 계측하고 토양 내 유기탄소의 경시적 변화를 조사하기 위한 모니터링 연구가 선행 되어야 한다. 또한 농경 관리 효과는 강우 및 기상 조건에 따라 영양물질 및 탄소의 손실의 변이가 심하므로 이를 정량적으로 파악하고 모델링의 불확실성을 완화하고 최적의 매개변수를 도출하기 위해서도 다양한 현장실험 자료가 필요하다. 현장 실험 자료를 이용하여 모형을 검증 후 다양한 최적관리 기법의 효과를 모의 발생하여 분석하고 예측할 수 있다.

농경관리에 따른 장기적인 효과를 예측하기 위해서는 단기간 관측 자료로부터 일반적인 매개변수를 산정하고, 과거 농업관리 이력과 기상자료를 이용하여 장기간의 토양 내 탄소 거동을 살핀다. 만일 장기적인 토양 유기탄소 거동이 현재 관측치와 현격히 상이할 경우 매개변수를 조정하고 농경관리 이력을 보완하기 위해 국내 보고서, 논문, 현지주민 설문 등을 통해 이를 보정하도록 한다. 이를 기반으로 미래의 기후변화 시나리오를 이용하여 장기적인 토양 탄소와 유기물, 영양물질 거동을 예측하고 수질오염 저감과 탄소 저감을 동시에 달성하기 위한 대책이 필요하다.

III. 퇴비와 화학비료 시용에 따른 토양 탄소와 수질 현장실험

1. 연구 대상 지역 모니터링 방법

전남대학교 농장에 대조구(CTL), 화학비료 처리

Table 1. 초기 토양과 퇴비의 이화학적 특성

	Soil				Compost
	CTL	CF	OF1	OF2	
Soil texture	Loam	Loam	Loam	Loam	NA
Bulk density (g cm^{-3})	1.01	1.03	1.08	1.13	NA
pH (1:5 to soil, 1:10 to compost)	7.5	6.7	7.6	7.8	7.9
EC(dS m^{-1})	0.10	0.17	0.09	0.15	6.1
Total C (g C kg^{-1})	1.09	1.15	1.74	3.43	349.4
Total N (g N kg^{-1})	0.22	0.38	0.24	0.35	30.4
C/N	5	3	7	10	11
Total P (g P kg^{-1})	0.67	0.70	0.92	0.95	10
Avail-P ($\text{mg P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$)	27.0	21.4	55.6	81.3	22.9
Slope (%)	2.07	2.07	2.07	2.07	NA

구(CF), 퇴비 1배구(OF1)와 퇴비 2배구(OF2)의 4개 시험포장을 조성하여 2011년 4월부터 8월까지 옥수수를 재배하였다. 화학비료는 4월13일 기비를 하고 6월 17일에 추비를 하였고, 퇴비는 4월 13일에 전량을 시비하였다. 화학비료 처리구의 시비량은 질소 180 kg N ha^{-1} , 인산 $150 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, 칼륨 150 kg K ha^{-1} 이었고, 퇴비는 질소는 화학비료의 시비량(180 kg ha^{-1})을 기준으로 하였으며, 질소기준 퇴비에 포함된 인산 시비량은 $136 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ 이었고, 2배구의 경우 시비량은 질소 360 kg N ha^{-1} , 인산 $272 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ 이었다. 퇴비의 성분비는 T-N 3.04%, T-C 34.9% 그리고 C/N비는 11이었다. 옥수수 재배기간 동안 강우 유출수의 수질 조사와 토양 유기탄소의 경시적인 변화를 현장 측정하였다. 기상자료는 본 시험지구에서 0.6 km 떨어진 광주지방기상청의 강우량 자료를 사용하였다. 유출수가 시험포 밖으로 나가지 않고 한곳에 집수 되도록 집수구역을 설치하였고, 유출량을 조사하기 위해 독일 OTT사의 부자식 자동 수위계인 Thalimedes를 설치하여 수위를 실측하였다. 유량은 수위-유량관계곡선식을 이용하여 수위를 유량으로 환산하였다.

수질조사 모니터링 방법은 강우시작 후 밭에서 탈착 및 세척되어 유출되는 시간을 기준으로 수질 시료를 채취하여 분석하였다. 수질공정시험법에 의해 BOD, TOC, T-N, T-P, Avail-P 농도를 분석

하였으며, 유량과 농도를 곱하여 강우시의 지표유출 부하량을 산정하였다. 4개 처리구의 각각 강우사상 평균 농도를 통계처리(SPSS Statistics 20)하여 유의수준 0.05에서 처리간 전체 평균값의 유의성을 검사하였다.

토양 샘플링은 작물재배기간 중 4회 실시하였고 공정시험법에 의해 분석하였다. 시험지구 토양의 물리적 특성을 조사하기 위해서 표토(0~10 cm)를 채취하여 미국 농무성 삼각좌표분류법에 의해 입경 분석을 실시하였다. 또한 이화학적 특성을 파악하기 위해서 pH, EC, OM(Organic Matter), T-N, T-P, TOC 등을 식재하기 전과 수확 후에 토양을 채취하여 분석하였다. Table 1은 작물 식재전 초기 토양과 퇴비의 이화학적 특성을 나타내고 있다.

2. 시험포장 모니터링 결과

1) 기상분석

Fig. 1은 2011년 기상변화를 나타내는 것으로 강우가 7, 8월에 집중되어 있음을 알 수 있었고 월별 강수량은 8월에 383mm로 가장 많았다. 옥수수 재배기간인 4월 21일부터 8월 16일까지의 총 강수량은 901mm이었다. 연평균 상대습도는 68.5%이며 6월 평균 상대습도가 81.3%로 가장 높았다. 2011년 최저기온은 $-11.7 \sim 26.5^\circ\text{C}$ (평균 9.6°C), 최고기온은 $-4.4 \sim 35.3^\circ\text{C}$ (평균 19.1°C), 평균기온은 $-7.7 \sim 30.3^\circ\text{C}$ (평균 13.8°C)이었으며, 옥수수 재배기간 동안의 일

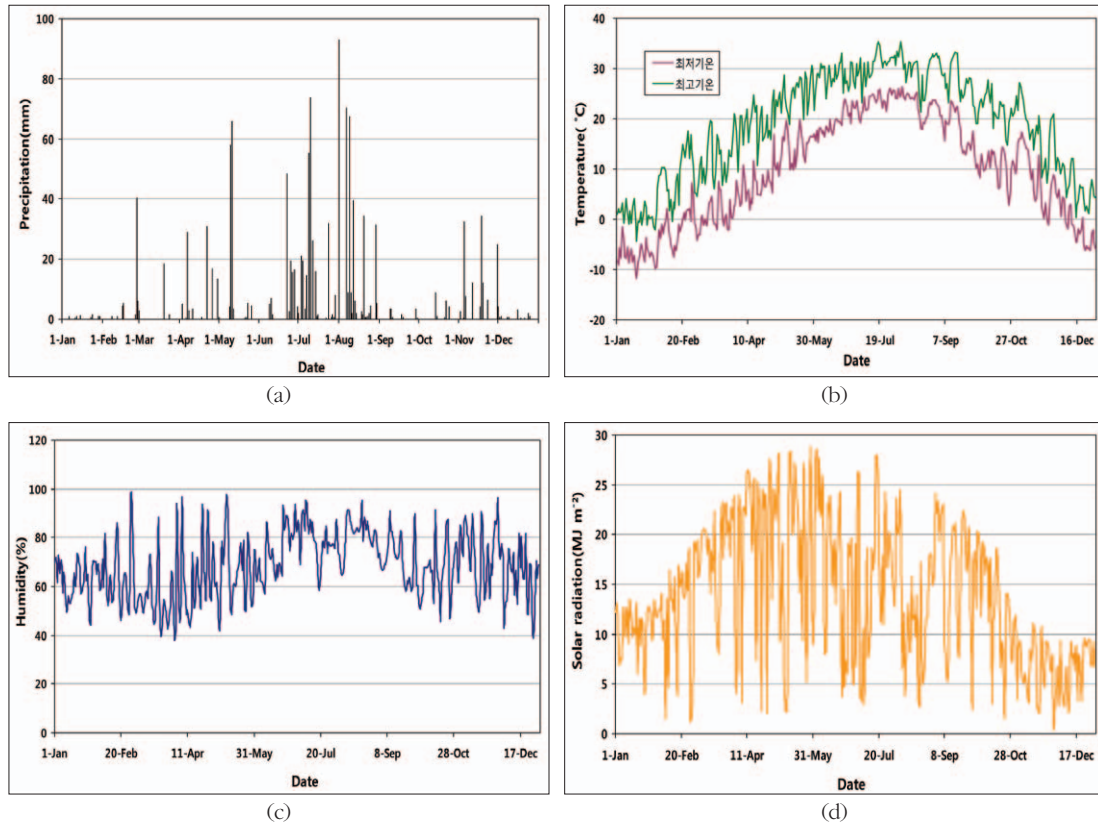


Fig. 1. 2011년 강수량(a), 기온(b), 상대습도(c), 일사량(d)의 변화

평균기온은 22.7℃이었다. 연평균 일사량은 13.9 MJ m⁻²이었고, 옥수수 재배기간 동안의 일평균 일사량은 16.8 MJ m⁻²으로 연평균 일사량보다는 많았다.

2) 토양분석

옥수수 파종전 초기토양의 이화화학성을 분석하기 위해 대조구, 화학비료 시비구, 퇴비 1배구, 퇴비 2배구의 토양을 시비전인 3월 22일 샘플링하였고, 작물 성장에 따른 토양의 이화학성 변화를 알아보기 위해서 옥수수 파종 후 1차(5월 25일), 2차(6월 28일), 3차(8월 16일)에 걸쳐 0~20cm 깊이의 토양을 샘플링 하였으며 분석결과는 Table 2와 같다.

최종토양의 총유기탄소 농도는 대조구에서 2.73 g C kg⁻¹이었고 유기물이 투입된 퇴비 1, 2배구에서는 대조구에 비해 각각 193%, 277% 증가하였다. 반면 화학비료 처리구에서는 1.03 g C kg⁻¹으로 낮

았는데 이는 탄소의 투입량이 적고 토양 속 미생물이 이용하기 쉬운 고농도의 무기질소 때문에 무기화가 촉진되었기 때문으로 판단된다.

질소농도는 대조구 0.29 g N kg⁻¹에 비해 퇴비 처리구가 각각 0.43, 0.80 g N kg⁻¹으로 높았는데, 이는 퇴비의 난분해성 유기물에 의해 무기화가 느리게 일어나기 때문에 질소의 작물흡수정도를 나타내는 질소 유효도가 낮고 상대적으로 질소 유효도가 높은 화학비료의 경우 0.16 g N kg⁻¹으로 낮게 나타났다.

토양내 T-P 값은 처리간 큰 차이를 보이지 않았지만 유효인산농도는 퇴비 1배구와 화학비료 처리구에서 유사한 결과를 얻었으며 퇴비 2배구에서 가장 높게 나타났다. 이는 퇴비의 투입량이 많은 2배구에서 인의 투입량도 많아져서 토양속 유효인산농도가 높게 나타난 것으로 보인다.

Table 2. 시기별 토양의 이화학적 변화

분석항목	날짜	대조구(CTL)	화학비료(CF)	퇴비 1배구(OF1)	퇴비 2배구(OF2)
T-C (g C kg ⁻¹)	2011-5-25	2.89	3.01	3.30	4.00
	2011-6-28	4.07	2.99	5.14	7.51
	2011-8-16	2.73	1.03	5.27	7.56
T-N (g N kg ⁻¹)	2011-5-25	0.55	0.34	0.21	0.34
	2011-6-28	0.47	0.43	0.48	0.74
	2011-8-16	0.29	0.16	0.43	0.80
C/N 비	2011-5-25	5	9	16	12
	2011-6-28	9	7	11	10
	2011-8-16	9	6	12	9
T-P (g P kg ⁻¹)	2011-5-25	0.78	0.70	0.59	0.73
	2011-6-28	0.85	0.83	0.85	0.92
	2011-8-16	0.74	0.70	0.70	1.07
Avail-P (mgP ₂ O ₅ kg ⁻¹)	2011-5-25	63.5	25.1	20.7	37.5
	2011-6-28	52.9	34.1	77.3	132.2
	2011-8-16	37.5	18.6	36.6	215.5

Table 3. 각 강우사상에 대한 강우량

강우사상	강우기간	강우량(mm)	강우사상	강우기간	강우량(mm)
1	11/04/22~11/04/22	31.0	7	11/06/28~11/06/28	16.5
2	11/04/26~11/04/26	17.0	8	11/07/03~11/07/04	40.5
3	11/04/30~11/04/30	13.5	9	11/07/07~11/07/10	144.1
4	11/05/10~11/05/11	124.0	10	11/07/14~11/07/14	16.0
5	11/06/22~11/06/22	48.5	11	11/08/07~11/08/12	197.5
6	11/06/25~11/06/26	35.0			

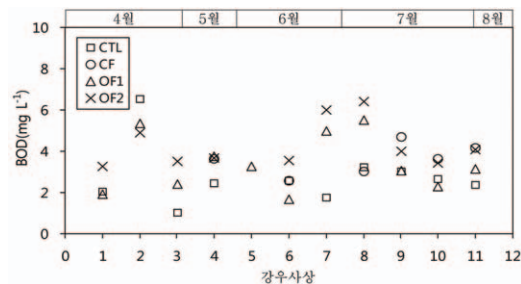


Fig. 2. 시비조건에 따른 강우사상별 유출수의 BOD 농도의 변화

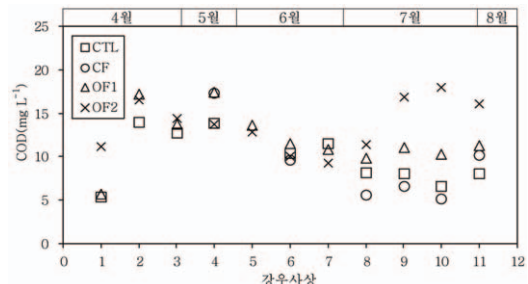


Fig. 3. 시비조건에 따른 강우사상별 유출수의 COD 농도의 변화

3) 유출수 수질

2011년 11개의 강우사상(Table 3)에 대하여 유출수를 샘플링하여 수질을 분석하였다. Fig. 2와 Fig. 3은 각 처리구별 강우시 유출수의 BOD와 COD의 EMC 농도를 강우사상별로 나타내고 있다. 대조구, 화학비료 처리구, 퇴비 1배구, 퇴비 2배구의 BOD는 각각 1.01~6.54(평균: 2.76) mg L⁻¹, 2.56~

4.68(평균: 3.61) mg L⁻¹, 1.68~5.52(평균: 3.40) mg L⁻¹, 3.28~6.39(평균: 4.29) mg L⁻¹로 나타났다. COD는 각각 5.30~13.90(평균: 9.84) mg L⁻¹, 5.12~17.25(평균: 9.05) mg L⁻¹, 5.65~17.37(평균: 12.03) mg L⁻¹, 9.26~17.93(평균: 13.65) mg L⁻¹로 나타났다. t-검정 결과 유의수준 0.05에서 BOD의 평균농도는 퇴비 2배구가 1배구보다 높고,

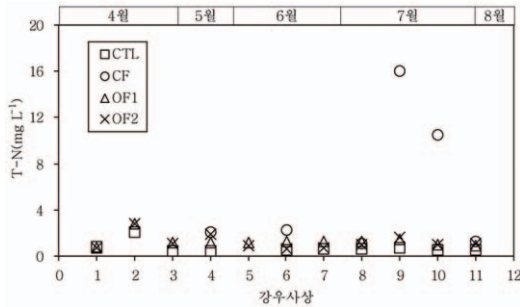


Fig. 4. 시비조건에 따른 강우사상별 유출수의 T-N 농도의 변화

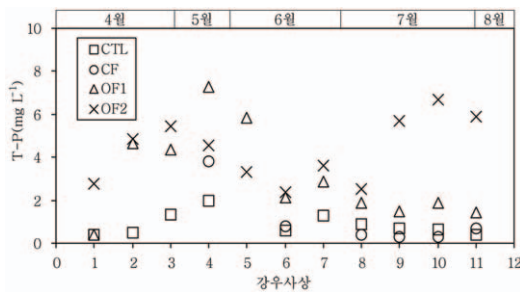


Fig. 5. 시비조건에 따른 강우사상별 유출수의 T-P 농도의 변화

COD의 평균농도는 화학비료 처리구보다 퇴비 처리구에서 높은 것으로 나타났다.

Fig. 4과 Fig. 5는 옥수수를 재배 기간 동안 강우사상별 유출수의 대조구, 화학비료 처리구, 퇴비1배구, 2배구의 질소와 인농도를 나타내는 것으로 질소 농도는 각각 0.46~2.10(평균 0.75) mg L⁻¹, 1.1~16.04(평균 : 5.55) mg L⁻¹, 0.72~2.81(평균 : 1.28) mg L⁻¹, 0.64~2.83(평균 : 1.23) mg L⁻¹로 나타났다. 화학비료 처리구에서 후반부의 질소농도가 높게 나온 것은 화학비료는 퇴비가 기비로 전량 시비 하는 것과 달리 기비와 추비로 나뉘어서 시비하므로 추비의 영향이 컸던 것으로 판단된다(Event 9, 10). 인농도는 각각 0.24~1.77(평균: 0.65) mg L⁻¹, 0.19~3.75(평균: 0.92) mg L⁻¹, 0.15~6.62(평균: 2.55) mg L⁻¹, 1.23~5.24(평균 : 2.87) mg L⁻¹로 나타났다. t-검정 결과 유의수준 0.05에서 T-N의 평균농도는 퇴비 처리구가 대조구보다 높았고, T-P의 평균농도는 화학비료 처리구와 대조구보다 퇴비 처리구에서 높은 것으로 나타났다.

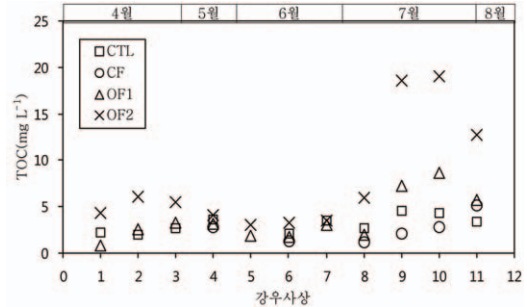


Fig. 6. 퇴비와 화학비료의 사용에 따른 유출수 내 TOC 농도의 변화

Fig. 6은 강우사상별 유출수의 TOC의 농도 분포를 나타내는 것으로 대조구, 화학비료 처리구, 퇴비 1배구, 퇴비 2배구의 TOC 농도는 각각 1.98~4.50(평균: 3.11) mg L⁻¹, 1.21~5.19(평균: 2.57) mg L⁻¹, 0.87~8.59(평균: 3.64) mg L⁻¹, 3.08~19.05(평균: 7.83) mg L⁻¹로 나타났다. 퇴비 2배구에서 가장 높은 농도를 보였으며 1배구에 비해 후반부의 농도가 상당히 높게 나타나는 것은 퇴비의 사용율이 증가할수록 토양탄소가 증가하고, 토양탄소의 증가는 강우시 유출수의 TOC 농도에 영향을 주는 것으로 판단된다. t-검정 결과 유의수준 0.05에서 TOC의 평균농도는 퇴비 2배구가 화학비료 처리구, 퇴비 1배구, 대조구보다 높은 것으로 나타났다.

토양의 T-C 함량은 식물생장에 따른 광합성산물 분배와 토양 유기물 분해에 의해 결정되며, 비료처리에 의해 토양고유 유기물의 분해가 촉진된다. 별도의 유기물 투입이 없이 화학비료만을 시비했을 경우 화학비료 사용에 따른 양분공급에 의해 미생물 호흡증가와 작물 뿌리생장 증가로 미생물의 먹이가 되는 뿌리분비물이 증가하여 토양속 T-C 농도가 감소하고 수질의 TOC농도 역시 감소하는 경향이 나타난다. 따라서 화학비료처리구가 대조구보다 T-C농도가 낮게 관측된 것으로 판단된다.

IV. 결론 및 제언

기후변화 대비 탄소 저감 방안의 하나로 탄소의 저장고로 농경지 토양을 이용하면서 농경지로부터

수체로 유기물질 및 질소, 인과 같은 영양물질이 배출 되는 것을 최소화 하는 노력이 필요하다. 본 연구에서는 농경지 탄소 거동에 관한 문헌고찰의 결과를 제시 하였으며, 퇴비와 같은 유기 비료 시용이 토양 탄소와 유출수 수질에 미치는 영향을 조사하기위해 기초 실험을 실시하였다. 퇴비 처리구로부터 유출수의 인 농도가 대조구와 화학비료 처리구에 비해 높게 조사되어 퇴비 시용시 인의 수계 유입을 고려하여 시용량을 결정하여야 할 것으로 판단된다. 또한 유기물 지표인 TOC의 경우도 화학비료 처리구보다 퇴비 처리구에서 높은 농도를 보였으며 퇴비 2배구가 1배구에 비해 농도가 상당히 높게 나타나는 것은 퇴비의 시용율이 증가할수록 토양탄소가 증가하고, 토양탄소의 증가는 강우시 유출수의 TOC 농도에 영향을 주는 것으로 나타났다. 유기물에 의한 수질 오염방지를 위해서도 퇴비와 같은 유기비료가 적정량 이용되고 시비관리가 필요한 것으로 판단된다.

우리나라 국가 기후변화 대응정책 방향 및 추진 전략 중 기후변화에 대한 농림수산 분야 대책으로 탄소흡착 기술을 통한 토양유기탄소 증대, 농촌 유기성 탄소순환 모델 개발, 농경지 및 농작물을 이용한 탄소 격리, 토양교란 최소화, 윤작체계 활용, 토양구조 개선 및 안정화와 토양유실 방지 퇴비, 작물 잔존물 농경지 환원, 유기농업 실시, 토양교란 최소화를 위하여 보전경운, 무경운, 직파재배, 토양복원, 토양식생피복 등이 필요한 것으로 제안되고 있다. 이를 위해서는 현행의 농경관리 하에서 농경지가 탄소 배출원인지 저장원인지 파악이 필요하며, 상이한 토양과 농경조건에 따른 개별적 대책을 제시하고 다양한 농경지 탄소저장 대책의 적용시 효과와 문제점 파악이 필요하다. 또한 탄소고정을 위한 토양 및 농경관리가 수질오염에 미치는 영향을 파악하여 최소화하는 방안이 필요하며, 이를 위한 다양한 현장실험과 전산모형을 활용한 농경지 토양의 최적관리기법 도출이 요구된다.

사 사

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재

원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2010-0008311).

참고문헌

- 강동환, 김성수, 권병혁, 김일규, 2008, 고흥만 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.
- 김진수, 이종진, 오승영, 2000, 시비조건에 따른 단위 논에서의 영양염류의 농도 특성, 한국관개배수지, 7(1), 47-56.
- 노기안, 김필주, 강기경, 안윤수, 윤성호, 1999, 유기물 시용에 의한 벼논에서의 양분 유출경감, 한국환경농학회지 18(3), 196-203.
- 오승영, 김진수, 김규성, 김선중, 윤춘경, 2002, 관개기 대구획 광역논에서의 오염부하 원단위, 한국농공학회지, 44(2), 136-147.
- 윤춘경, 권숙국, 정일민, 권태영, 1999, 오수처리수 관개 벼재배를 통한 농업용수 수질기준의 검토, 한국농공학회지, 41(2), 44-54.
- 전지홍, 윤춘경, 황하선, 윤광식, 2003, 논에서의 오염부하 예측을 위한 범용모형 개발, 한국육수학회지, 36(3), 344-355.
- 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.
- 최용훈, 원철희, 서지연, 신민환, 양희정, 임경재, 최

- 중대, 2009, 평지밭과 고랭지밭의 비점오염에 대한 분석과 비교, 수질보전 한국물환경학회지, 25(5), 682-688.
- 최진규, 구자웅, 손재권, 윤광식, 조재영, 2001, 마령지구 필지 논으로부터 영농기 영양물질 수지와 유출부하량, 한국농공학회지, 43(5), 153-162.
- Agbenin, J.O., Goladi, J.T., 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, M.M., 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.
- Apezteguia, R, Izaurralde, C., Sereno, R., 2009, Simulation study of soil organic matter dynamics as affected by land use and agricultural practices in semiarid Cordoba, Argentina, *Soil & Tillage Research*, 102, 101-108.
- Amos, B., Arkebauer, T.J., Doran, J.W., 2005, Soil surface fluxes of greenhouse gases in an irrigated maize-based agroecosystem, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69, 387-395.
- Bajracharya, R.M., Lal, R., Kimble, J.M., 2000, Diurnal and seasonal CO₂-C flux from soil as related to erosion phases in central Ohio, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 286-293.
- Beare, M.H., Cabrera, M.L., Hendrix, P.F., Coleman, D.C., 1994, Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional- and no-tillage soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58, 787-795.
- Bernardos, J.N., Viglizzo, E.F., Jouvét, V., LeLrora, F.A., Pordomingo, A.J., Cid, F.D., 2001, The use of EPIC model to study the agroecological change during 93 years of farming transformation in the Argentine pampas, *Agricultural Systems*, 69, 215-234.
- Brown, R.A., Rosenberg, N.J., 1999, Climate change impacts on the potential productivity of corn and winter wheat in their primary United States growing regions, *Climatic Change*, 41(1), 73-107.
- 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.
- Calderon, F.J., Jackson, L., 2002, Rototillage, disking, and subsequent irrigation: Effects on soil nitrogen dynamics, microbial biomass, and carbon dioxide efflux, *J. Environ. Qual.*, 31, 752-758.
- Cambardella C.A., Doran, H.W.Y., 1996, Assessing soil quality by testing organic matter, In Jerry M. Bogham *et al.* (ed.) *Soil organic matter: Analysis and interpretation*, SSSA Special publication, 46, 41-50.
- Chang, C., Sommerfeldt, T.G., Entz, T., 1991, Soil chemistry after eleven annual applications of cattle feedlot manure, *J. Env. Qual.*, 20, 475-480.
- Chung, S.W., Gassman, P.W., Gu, R., Kanwar, R.S., 2002, Evaluation of EPIC for assessing tile flow and nitrogen losses for alternative agricultural management

- systems, *Trans. ASAE*, 45(4), 1135-1146.
- Chung, S.W., Gassman, P.W., Huggins, D.R., Randall, G.W., 2001, Evaluation of EPIC for tile flow and tile nitrate losses from three Minnesota cropping systems, *J. Environ. Qual.*, 30(3), 822-830.
- Curtin, D., Wang, H., Selles, F., McConkey, B.G., Campbell, C.A., 2000, Tillage effects on carbon fluxes in continuous wheat and fallow-wheat rotations, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 2080-2086.
- Duxbury, J.M., 1994, The significance of agricultural sources of greenhouse gases, *Fert. Res.*, 38, 151-163.
- Duxbury, J.M., 1995, The significance of agricultural greenhouse gas emissions from soil of tropical agroecosystems, In R. Lal (ed.) *Soil management and greenhouse effect*, Lewis Publ., Boca Raton, FL., 279-291.
- Edwards, D.R., Benson, V.W., Williams, J.R., Daniel, T.C., Lemunyon, J., Gilbert, R.G., 1994, Use of the EPIC model to predict runoff transport of surface-applied inorganic fertilizer and poultry manure constituents, *Trans. ASAE*, 37(2), 403-409.
- Favis-Mortlock, D.T., Evans, R., Boardman, J., Harris, T.M., 1991, Climate change, winter wheat yield and soil erosion on the English South Downs, *Agric. Syst.*, 37, 415-433.
- Fortin, M.C., Rochette, P., Pattey, E., 1996, Soil carbon dioxide fluxes from conventional and no-tillage small-grain cropping system, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60, 1541-1547.
- Franzluebbers, A.J., J.A. Stuedemann, S.R. Wilkinson, 2001, Bermudagrass management in the Southern Piedmont USA. I. Soil and surface residue carbon and sulfur, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65, 834-841.
- Frenzluebbers, A.J. Steiner, J.L., 2002, Climatic influences on soil organic carbon storage with no tillage, In R. Lal (ed.) *Agricultural Practices and Policies for Carbon Sequestration in Soil*. Boca Raton: CRC Press, 71-86.
- 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 electrofocusing, *Soil Science*, 154, 8-13.
- Grant, R.F., 1997, Changes in soil organic matter under different tillage and rotation: Mathematical modeling in ecosys, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61, 1159-1175.
- Guo, Y., Gong, P., Amundson, R., Yu., Q., 2006, Analysis of factors controlling soil carbon in the conterminous United States, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70, 601-612.
- Gupta, A.P., Narwal, R.P., Antil, R.S., Dev, S., 1992, Sustaining soil fertility with organic-C, N, P, and K by using farmyard manure and fertilizer-N in a semiarid zone: A long-term study, *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 6, 243-251.
- Hooker, B.A., Morris, T.F., Peters, R., Cardon, Z.G., 2005, Long term effects of tillage and corn stalk return on soil carbon dynamics, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69, 188-196.
- Izaurrealde, R.C., Williams, J.R., McGill, W.B., Rosenberg, N.J., Quiroga Jakas, M.C., 2006, Simulating soil C dynamics with EPIC: Model description and testing against long-term data, *Ecological*

- Modelling, 192, 362-384.
- Jackson, L.E., Calderon, F.J., Steenwerth, K.L., Scow, K.M., Rolston, D.E., 2003, Responses of soil microbial processes and community structure to tillage events and implications for soil quality, *Geoderma*, 114, 305-317.
- Jastrow, J.D., Boulton, T.W., Miller, R.M., 1996, Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60, 801-807.
- Jung, W.K. Y.H. Kim, 2006, Soil organic carbon determination for calcareous soils, *Korea J. Soil Sci. Fert.*, 39, 396-402.
- Kalbitz, K., Solinger, S., Park J. H., Michalzik, B., Matzner, E., 2000, Control on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review, *Soil Science*, 165(4), 227-304.
- Kapkiyai, J.J., Karanja, N.K., Qureshi, J.N., Smithson, P.C., Womer, P.L., 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.
- Kingery, W.L., Wood, C.W., Delaney, D.P., Williams, J.C., Mullins, G.L., 1994, Impact of long-term land application of broiler litter on environmentally related soil properties, *J. Environ. Qual.*, 23, 139-147.
- Lal, R., 2004, Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security, *Science*, 304, 1623-1626.
- Lal, R., Kimble, J.M., 1997, Conservation tillage for carbon sequestration, *Nutr. Cycling Agroecosyst.*, 49, 243-253.
- Lal, R., Kimble, J., Follett, R.F., 1997, Pedospheric processes and the carbon cycle, In Rattan Lal *et al.* (ed) *Soil process and the carbon cycle*. CRC Press. Boca Raton, FL, USA, 1-8.
- Lee, K.D., Lee, K.B., Gil, G.H., Song, I.H., Kang, J.G., Hwang, S.W., 2011, Nitrogen and phosphorus content changes in paddy soil and water as affected by organic fertilizer application, *Korean J. Environ. Agric.* 30(1), 1-8.
- Li, C., Frohking, S., Harriss, R., 1994, Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils, *Global Biogeochem. Cycles* 8(3), 237-254.
- Li, C., Mosier, A., Wassmann, R., Cai, Z., Zheng, X., Huang, Y., Tsuruta, H., Boonjawat, J., Lantin, R., 2004, Modeling greenhouse gas emissions from rice-based production systems: Sensitivity and upscaling, *Global Biogeochem. Cycles* 18, 1-19.
- Norbert Billen, Clara Roder, Thomas Gaiser, Karl Stahr, 2009, Carbon sequestration in soils of SW-Germany as affected by agricultural management - calibration of the EPIC model for regional simulations, *Ecological modeling* 220, 71-80.
- Parkin, T.B., Kaspar, T.C., 2003, Temperature controls on diurnal carbon dioxide flux: Implications for estimating soil carbon loss, *Soil Sci. Soc Am. J.* 67, 1763-1772.
- Pathak, H., Li, C.S., Wassmann, R., 2005, Greenhouse gas emissions from Indian rice fields: calibration and upscaling using the DNDC model, *Biogeosciences*

- 2, 113-123.
- Phillips, D.L., P.D. Hardin, V.W. Benson, J.V. Baglio, 1993, Nonpoint source pollution impacts of alternative agricultural management practices in Illinois: A simulation study, *J. Soil Water Cons.* 48(5), 449-457
- Pierson, S.T., Cabrera, M.L., Evanylo, G.K., Schroeder, P.D., Radcliffe, D.E., Kuykendall, H.A., Benson, V.W., Williams, J.R., Hoveland, C.S., McCann, M.A., 2001, Phosphorus losses from grasslands fertilized with broiler litter: EPIC simulations, *J. Environ. Qual.*, 30, 1790-1795.
- Potter, K.N., Williams, J.R., 1994, Predicting daily mean temperatures in the EPIC simulation model, *Agron. J.*, 86(6), 1006-1011.
- Rinaldi, M., 2001, Application of EPIC model for irrigation scheduling of sunflower in southern Italy, *Agric. Water Manage.* 49, 185-196.
- Roberts, W.P., Chan, K.Y. 1990, Tillage-induced increases in carbon dioxide loss from soil, *Soil Tillage Res.*, 17, 143-151.
- Rochette, P., Gregorich, E.G., 1998, Dynamics of soil microbial biomass C, soluble organic C, and CO₂ evolution after three years of manure application, *Can. J. Soil Sci.*, 78, 283-290.
- Rochette, P., Flanagan, L.B., 1997, Quantifying rhizosphere respiration in a corn crop under field conditions, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61, 466-474.
- Roloff, G., de Jong, R., Nolin, M.C., 1998, Crop yield, soil temperature and sensitivity of EPIC under central-eastern Canadian conditions, *Can. J. Plant Sci.*, 78(3), 431-439.
- Sainju, U.M., Lenssen, A., Caesar-Tonthat, T., Waddell, J., 2006, Tillage and crop rotation effects on dryland soil and residue carbon and nitrogen, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70, 668-678.
- Shin, C.W., Kim, J.J., Yoon, J.H., 1988, Studies on the characteristics of phosphorus in the upland soil, 1. Composition of accumulated phosphorus forms and available phosphorus, *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.*, 21, 21-29.
- Smith, W.N., Grant, B., Desjardins, R.L., 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.
- Sommerfeldt, T.G., Chang, C., Entz, T., 1988, Long-term annual manure applications increase soil organic matter and nitrogen, and decrease carbon to nitrogen ratio, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52, 1668-1672.
- Van Gestel, B.P., Merckx, M.R., Vlassak, K., 1993, Microbial biomass responses to soil drying and wetting: The fast- and slow-growing microorganisms in soils from different climates, *Soil Biol. Biochem.*, 25, 109-123.
- Wall, G.W., Garcia, R.L., Kimball, B.A., Hunsaker, D.J., Pinter Jr., P.J., Long, S.P., Osborne, C.P., Hendrix, D.L., Wechsung, F., Wechsung, G., Leavitt, S.W., LaMorte, R.L., Idso, S.B., 2006, Interactive effects of elevated carbon dioxide and drought on wheat, *Agron. J.*, 98, 354-381.

- Weil, R.R., Magdoff, F., 2004, Significance of soil organic matter to soil quality and health, In F. Mafdoff and R. R. Weil (ed.), Soil organic matter in sustainable agriculture, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 1-43.
- Williams, J.R., Jones, C.A., Dyke, P.T., 1984, A modeling approach to determining the relationships between erosion and soil productivity, Transactions of the ASAE, 27, 129-144.
- Wood, B.H., Wood, C.W., Yoo, K.H., Yoon, K.S., Delany, D.P., 1999, Seasonal surface runoff losses of nutrients and metals from soils fertilized with broiler litter and commercial fertilizer, J. Environ. Qual. 28(4), 1210-1218.
- Xu-Ri, 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.
- Zhang, F., Li, C., wang, Z., Wu, H., 2006, Modeling impacts of management alternatives on soil carbon storage of farmland in Northwest China, Biogeosciences, 3, 451-466.

최종원고채택 12. 12. 12