한작지(Korean J. Crop Sci.), 57(1): 89~97(2012)

30년 콩-옥수수 윤작 및 경운처리 장기시험 포장의 토양 온실가스 발생

서종호*† · Tony J. Vyn** · Anita Gál*** · Doug R. Smith****

*농촌진흥청 국립식량과학원, **미국 Purdue 대학교, ***헝가리 Szent Istvan 대학교, ****미국 USDA-ARS

Soil Greenhouse Gas Emissions from Three Decades Long-term Experimental Field of Corn-Soybean Rotation and Tillage Treatments

Jong-ho Seo*†, Tony J. Vyn**, Anita Gál***, and Doug R. Smith****

*National Institute of Crop Science, RDA, Suwon 441-857, Korea
**Agronomy Dep., Purdue Univ., West Lafayette, IN 47907, USA
***Dep. of Soil Science and Agrochemistry, Szent Istvan Univ., Pater Karoly Utca 12103 Godollo, Hungary
****USDA-ARS, National Soil Erosion Lab., Purdue Univ., West Lafayette, IN 47907, USA

ABSTRACT Reduction of greenhouse gas (GHG) emissions from upland crop field as well as paddy field is being required, but little information on GHG emissions according to cultivation practices in upland field is available. Soil GHG emissions during the growing season were investigated in the field of three decades rotation and tillage treatments which were consisted of plow, chiesl tillage and no tillage in west central Indiana, USA in 2006. Seasonal cumulative CO_2 emissions were not different among treatments. CH_4 emission increased a little in plow tillage during early soybean growing season. Most of N_2O emission occurred during early corn growing season after N-fertilizer application from mid June to mid July, and was significantly affected by tillage practices in which seasonal cumulative N_2O emission was significantly higher under chisel tillage. N_2O emission under no-tillage was lower about 64% and 39% than that under chisel tillage and plow tillage, respectively. No-tillage practice with rotation of corn and soybean seems to be promising in point of less GHG emission and less labor for cultivation without grain yield reduction.

Keywords : greenhouse gas (GHG), rotation, tillage, corn, soybean, nitrogen fertilizer

현대의 농업은 최대의 식량생산을 위한 에너지 고투입의 생산방식에서 저투입의 친환경 생산방식으로 변모하고 있으며, 지구온난화에 따른 이상기상에 대비한 온실가스 저감 및 재해방지를 위한 토양보전 농업이 강조되고 있다. 또한 농촌의 인력의 감소에 따라 앞으로 영농 단위면적이 증가하고 농업에너지 사용 및 영농이 환경에 미치는 영향에 대한 규제가 강화될 것으로 예상된다. 우리나라는 벼 위주의 작물생산이 주를 이루었지만 국제 곡물가의 폭등에 따라 콩과 옥수수 등의 국내 자급률의 증가를 위해 밭작물의 생산이 앞으로 확대되어 밭에서도 저투입 및 친환경의 생산방식이 필요해질 것으로 보인다.

미국의 콘벨트에서와 같이 옥수수와 콩을 대규모로 생산하는 지역에서는 파종시 작업시간 및 에너지를 절약하고 토양유실을 방지하기 위해서 기존의 관행경운(conventional tillage)에서 축소경운(reduced tillage) 및 보전경운(conservation tillage)으로 발전하는 추세다. 특히 보전경운의 비율이 현저히 증가하여 전체 경운 면적 중 1990년의 6%에서 2008년 현재 41.5%로 증가하였다(CTIC, 2011). 우리나라에서도 앞으로 옥수수와 콩의 집단재배 면적의 증가에 따라 서구식 옥수수 및 콩의 윤작체계 및 보전경운 방식이 많이 도입될 것으로 예상되는데, 그에 따라 작물의 생산성뿐만 아니라 토양보전과 온실가스 억제 등 환경에 미치는 영향에 대한 연구도 중요해질 것으로 보인다.

일반경운이 무경운에 비해 생장의 증가와 특히 30 cm 이하에서 뿌리량을 증대시켜 토양 탄소를 증대시킨다고 보고된 바 있다(Baker, 2007). 그러나 일반적으로 무경운재배 등의 친환경 경종방법이 토양에 이산화탄소를 고정(sequestration)하는 능력이 높아 미국 콘벨트에서 무경운 등 보전경운 방

†Corresponding author: (Phone) +82-31-290-6763 (E-mail) sseo@korea.kr
<Received 4 March, 2012; Revised 12 March, 2012; Accepted 14 March, 2012>

법에 의한 탄소고정 잠재력은 약 100 Tg C yr^{-1}에 달한다고 한다(Reicosky *et al.*, 2005). 이산화탄소의 발생은 옥수수-콩 등 작부(윤작)체계에 의해서도 차이가 있어(Drury *et al.*, 2004), 작부체계의 개선도 이산화탄소 감축에 중요하다고 한다.

영농에 의한 온실가스의 발생을 감축하기 위해서는 이산화탄소보다 각각 21배 및 310배 높은 온실효과를 가지고 있는 메탄 및 아산화질소(Mosier *et al.*, 2006)의 발생을 감축하는 것이 중요하다. 메탄은 미국 중서부와 같이 중점질토로 배수가 양호하지 못한 밭에서 유기물 분해 시 생성된 메탄가스가 미처 산화되지 못하여 발생될 수가 있다(Ball *et al.*, 1999). 아산화질소는 온실가스의 4%를 차지하고 있지만 농업부분에서 오는 아산화질소가 73%를 차지하고, 온실효과가 현저히 높기 때문에 적은 량의 발생에 대해서도 주의를 해야한다(Minami *et al.*, 1997). 현재 미국 중서부의 콘벨트에서 작물생산 시 발생하는 아산화질소는 미국농업 전체 부분에서 발생하는 아산화질소의 25~33%를 차지할 정도로 높다(Mummey *et al.*, 1998). 따라서 질소시비량을 줄이고 영농방식을 개선하여 아산화질소의 발생을 줄일 필요성이 있다. 경운방법에 따른 아산화질소 발생량은 무경운에 의해 증가된다는 보고(Ball *et al.*, 1999)와 무경운이 아산화질소를 감소시킨다는 보고(Gregorich *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2011; Keren *et al.*, 1993) 등의 상반된 보고가 있다. 한편 경운에서도 일반적으로 행해지는 plow 및 chisel 경운 등 경운유형에 따른 아산화질소 발생의 연구결과는 적다.

따라서 본 시험은 미국 콘벨트 지역에서 30년간 옥수수-콩 윤작체계에서 경운방법을 달리한 장기연용 시험포장에서 온실가스 발생변화를 조사, 분석하고 그방법과 결과를 앞으로 국내 밭작물 생산의 영농규모의 대면적화 및 보전경운 방식의 도입 등에 대비한 온실가스 발생 연구에 필요한 기초자료로 활용하고자 실시하였다.

재료 및 방법

시험포장 및 실험설계

본 시험은 미국의 인디아나 웨스트라피엣(west central Indiana) 배수가 다소 불량한 Purdue 대학의 ACRE(Agronomy Center for Research and Education, 경도: 86°56′, 위도 : 40°34′, 해발고도 : 215 m)의 옥수수 및 콩의 장기 윤작 및 경운의 장기연용시험 포장에서 실시되었다. 토양은 지질학적으로 warm-season native grasses에서 발달된 유기물함량이 매우 높은 토양으로 경사도가 2% 내외로 배수는 크게 좋지 못한 토양인데, 학술적으로는 Chalmers silty clay loam(fine, silty, mixed, superactive, mesic Typic Endoaquoll)으로 분류된다.

장기연용 시험은 1975년에 시작되었는데, 포장 배치는 주구(main plot)를 작부(윤작)체계로, 세구는 경운체계로 하여 4반복을 두었다. 각 세구(plot)의 폭과 길이는 각각 9 m와 45 m(0.04 ha)로 하였다. 작부(윤작)체계는 옥수수 연작, 콩 연작, 콩-옥수수 윤작, 옥수수-콩 윤작의 4 체계로, 경운체계는 plow(moldboard), chisel 경운 및 무경운으로 3 체계로 구성하였다. plow 및 chisel 경운은 각각 추경과 춘경을 실시하였으며, 추경 plow 경운은 옥수수와 콩의 수확 후인 11월 초순에 46 cm 넓이의 moldboard plow로 토심 20~25 cm로 실시하였다. chisel 경운은 10 cm 폭의 coulter-chisel로 깊이 20 cm로 실시하였다(Fig. 1). plow와 chisel 경운에 대한 춘경은 파종 전 4월 중순에 이루어지는데, plow 및 chisel 경운구 모두 harrow가 부착된 disk로 한번 경운 후 field cultivator로 포장을 정지하였는데, 경운깊이는 10 cm 정도 이었다. 무경운은 춘경과 추경 모두 실시하지 않았다. 춘경 후 각 경운체계에서 토양표면의 잔사피복율은 plow 경운 3%, chisel 경운 31% 및 무경운 93%를 나타내었다. 옥수수 품종은 Pioneer 31N28(119-Day) 이었고, 콩 품종은 Pioneer 93M80 Round-up Ready였다. 옥수수눈 조간격을 76 cm로 하여 79,075 seeds ha^{-1}의 재식밀도로 4월 29일에

(a) (b) (c)

Fig. 1. Pictures of tillage treatments (tillage in fall) in long-term cropping system and tillage experimental field of the Purdue Agricultural Research Center, West Lafayette, Indiana, USA. a) plow (moldboard) tillage, b) chisel tillage, c) no-tillage.

파종하였고, 콩은 조 간격은 20 cm로 345,952 seeds ha^{-1}의 재식밀도로 5월 31일에 파종하였다.

장기시험구의 토양의 유기물 함량은 plow 및 chisel 경운구에서 4%, 무경운구(토양 0～5 cm)에서 6%를 보였다. 토양인산은 경운구에서 50 ppm, 무경운구(표토, 0～5 cm)에서 150 ppm를 나타내었다. 칼리 함량은 무경운구의 표토층이 plow 및 chisel 경운구의 3～5배 높은 500 ppm이었다. 인산과 칼리 비료는 토양검정에 의해 산출된 적정량을 추경 전에 옥수수 및 콩 모두 토양에 시비하였다. 옥수수에 대한 질소비료는 start fertilizer로서 파종 시(4월 29일) 질안(NH_4NO_3) 36 kg N ha^{-1}를 파종조의 5 cm 옆에 시용하였고, 추비(side-dress)로서 6월 10일에 28% urea-NH_4NO_3(UAN)를 260 kg N ha^{-1} 시용하였는데, 옥수수 파종조의 중앙에 5～8 cm 깊이로 coulter를 이용하여 시비하였다. 콩 재배 시 질소비료는 시용하지 않았다. 옥수수의 plow 및 chisel 경운구를 대상으로 6월 16일에 중경 작업을 실시하였다.

제초를 위해 파종 시 토양처리제를, 생육 중 경엽처리제(Roundup Weather Max 2pt $acre^{-1}$)를 살포하였다. 살충제는 파종 시에 옥수수의 거세미(cutworm)를, 생육 중 옥수수의 조명나방(stalk borer)을, 콩의 노린재(leaf bettle) 방지하기 위해서 수시로 살포하였다. 옥수수 수확은 10월 16일, 콩은 10월 25일 수확하였는데, 수확면적은 시험구 중앙의 139 m^2 (넓이 3.05 m, 길이 45.7 m)를 수확기로 기계수확하고, 수확기에 부착된 자동 무게 및 수분함량 측정기로 측정 후 옥수수는 수분함량 15.5%, 콩은 13%로 종실수량을 보정하였다.

온실가스 분석

2006년 토양표면의 온실가스(이산화탄소, 메탄, 아산화질소) 발생량은 작부체계중 미국 중서부 콘벨트 지역에서 주로 행해지는 콩-옥수수(옥수수재배) 및 옥수수-콩(콩 재배)의 두 윤작구의 3 경운처리(plow, chisel 경운 및 무경운) 구를 대상으로 조사하였다. 온실가스 발생량이 작물의 생육초기인 6월～7월 초순에 가장 많은 점을 고려하여 온실가스 발생량 조사는 6월 중순부터 일주일 간격으로 하였고, 7월 중하순부터는 2～3주 간격으로 실시하였다. 온실가스 조사는 vented flux chamber method 방식으로 조사하였다(Mosier *et al.*, 2006). 앵커(anchor)는 알루미늄으로 제작하였으며, chamber(lid)의 윗부분 테두리 주위에 U-shaped channel(73.7×35.4×12.0 cm)을 만들어 물을 넣으면 내부와 외부간의 공기이동을 차단할 수 있게 제작하였다(Fig. 2). 앵커는 각 시험구당 2개소에 10 m 간격으로 토양표면으로부터 10 m 깊이로 수평이 유지되게 설치하였다. 조사 시에는 샘플채취용 vial(12 ml, Exetainer, Labco, High Wycombe, UK)은 샘플 하루전 진공펌프를 이용하여 고무로 절연된 내부를 진공시켰다. 온실가스 발생(flux)의 조사 시 앵커위에 토양표면을 덮을 수 있는 chamber(75.8×38×13 cm)를 덮었는데, 챔버를 덮기전에 내부와 외부의 공기를 철저히 차단하기 위하여 U-shaped channel에 물을 채었다. 온실가스 샘플은 chamber의 고무격막(rubber septum)을 통해 플라스틱 주사기(polypropylene syringe)를 이용하여 chamber 설치 후 0, 5, 10 및 15 분 간격으로 20 ml을 취하여 먼저 진공되어 있는 바이엘 속에 주입하였다. 채취된 가스샘플은 자동 Combi-Pal injection 장치가 장착된 가스크로마토그래피(Varian 3800GC, Mississauga, Canada)를 이용하여 분석하였다. 가스의 농도는 아르곤(95%) 이동가스를 가진 3.05 m Porapak Q에 분당 30 ml의 양을 주입시키고, 350℃의 전자장치에서 분석하였다. 온실가스의 농도는 얻어진 peak area에 GC 분석 시 비교하기 위해 사용하였던 표준가스 농도인 이산화탄소 1004 ppm, 메탄 3.71 ppm, 아산화질소 1.25 ppm을 곱하여 농도를 얻었다. 얻어진 농도는 Excel 프로그램의 slope 함수를 사용하여 5분 간격으로 채취하여 얻어진 농도의 slope를 구하여 1분 당 발생하는 온실가스 농도를 얻었다.

Fig. 2. Picture of anchor and chamber to collect GHG emitted from soil.

가스농도는 표준온도(0℃, 273K) 및 표준압력(101.3 mega pascal)에서의 농도로 보정하였다. 또 ppm 농도를 ug 농도로 바꾸기 위하여 이산화탄소(CO_2-C) 및 메탄(CH_4-C)에 0.536의, 아산화질소(N_2O-N)에 1.25의 기체밀도를 각각 곱하였다. 가스발생량은 Hutchison and Mosier(1981)의 공식을 사용하여 chamber의 가스농도 변화, chamber 용량, 토양표면적을 사용하여 계산하였고 시간당 단위면적당 발생량(mg m^{-2} hr^{-1})으로 산출하였다. 조사기간의 누적 온실가스 발생량(cumulative emission)은 가까운 두 조사시기의 온실가스 발생량의 평균값에 두 조사기간의 시간을 곱하여 누적하였다.

토양온도, 수분 및 무기태질소 조사

강우자료는 장기 시험포장에서 1.5 km 떨어진 Purdue 기상

대 자료를 이용하였다. 토양온도 및 토양수분함량은 가스채취 인접토양에서 측정하였는데, 토양수분은 domain reflectometer (Field Scout 346, TDR300 Serial)을 이용해 토양 0～12 cm의 수분함량을 측정하였다. 토양온도는 thermometer를 이용하여 토양 10 cm에서 조사하였다.

무기태질소 분석용 토양시료는 6월 29일, 7월 19일 및 8월 15일에 채취하였다. 시료는 가스채취 chamber 주위에서 10～15개의 soil core(직경 7 cm)를 이용하여 30 cm 깊이까지 채취하여 4℃ 아이스박스에 저장하면서 운반하였다. 토양시료는 잘 혼합하여 2M KCl 용액에 1시간 동안 흔든 후(추출액:토양=10:1) Whatman No. 42 필터용지(Whatman Ltd., Maidstone, UK)로 여과하였다. 질산태(NO_3-N) 및 암모니아태(NH_4-N) 질소는 여과된 액을 이용하여 Technicon Autoanalyer II(Technicon Industrial System, Tarrytown, NY)로 분석하였다.

결과 및 고찰

30년 장기시험구의 옥수수와 콩의 평균 수량

미국 Purdue 대학의 ACRE에서 실시되고 있는 장기 윤작 및 경운 시험구의 1975년부터 2005년까지의 윤작 및 경운에 따른 옥수수와 콩의 30년 평균 종실수량(Agronomy Dept. Purdue University, 2006)을 Table 1에 나타내었다.

먼저 옥수수의 평균수량을 보면, 연작구에서는 종실 수량이 plow 및 chisel 경운구가 10.73 및 10.44 Mg ha^{-1} 임에 비하여 무경운구는 9.26 Mg ha^{-1}으로 낮았다. 그러나 콩-옥수수 윤작의 무경운구에서는 수량이 10.94 Mg ha^{-1}로 증가하여 plow 및 chisel 경운구와 비슷하였다. 이는 무경운구에서도 연작에서 감소되었던 수량이 윤작으로 인해 회복(18% 수량 증가)될 수 있다는 것을 보여 준다. plow 및 chisel 경운구에서의 윤작에 의한 옥수수의 수량의 증가는 5～8% 이었다. 한편 콩의 수량은 콩은 연작 및 윤작구 모두 각각 경운 처리간 차이가 크지 않았다. 그러나 콩은 윤작에 의한 수량 증가율이 9～10%로서 경운처리보다 수량증가 효과가 컸다. 콩은 무경운 시 초기생육은 감소되었지만 생육후기에 보상작용이 커서 경운 시에 비해 수량의 감소는 없다고 하는데(Yusuf *et al.*, 1999), 옥수수와 달리 콩에서 무경운에 의한 수량의 감소가 크지 않았던 것이 미국에서 콩의 무경운 재배가 증가하는 원인이 되는 것으로 보였다.

토양의 온도 및 수분함량 변화

2006년 시험포장의 작물재배기간의 순별 강우량은(Fig. 3) 대체로 20 mm 이상의 강우량이 있어 작물생육에는 큰 지장이 없었다. 특히 7월 초중순 및 8월 중하순에 강우량이 50～70 mm로 많았다.

토양온도(지하 10 cm)의 변화를 보면(Fig. 4-a), 대체적으로 처리보다 강우와 기온에 의한 조사시기별에 차이가 많았는데, 처리별로는 7월 중하순 콩 재배구의 plow 및 chisel 경운구에서 약 1℃ 높은 것을 제외하고는 큰 차이가 없었다. 지온은 8월 초까지 높았으며, 8월 하순 이후로는 낮아졌다.

토양의 수분함량도 대체적으로 작물이 군락을 형성하기 전인 7월 초순까지는 재배작물 및 경운 처리보다는 시기별 강우, 지하침투 및 증발 등에 의해 크게 영향을 받았지만 7월 중순부터 8월 하순에서는 처리에 따른 차이가 컸다. 군

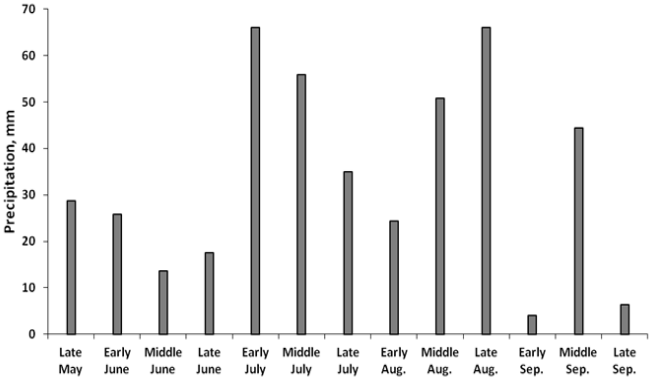


Fig. 3. Ten days precipitation during 2006 cropping season at the Purdue Agricultural Research Center, West Lafayette, Indiana, USA.

Table 1. Thirty year (1975～2005) average grain yields of corn and soybean following rotation and tillage practices at long-term experimental field of the Purdue Agricultural Research Center, West Lafayette, Indiana, USA.

Tillage	Corn			Soybean		
	Continuous corn	Rotated corn	Rotation effect	Continuous soybean	Rotated soybean	Rotation effect
	---------- Mg ha^{-1} ----------		%	---------- Mg ha^{-1} ----------		%
Plow	10.73	11.22	5	3.04	3.35	10
Chisel	10.44	11.23	8	2.91	3.23	11
No-till	9.26	10.94	18	2.94	3.19	9

락이 형성된 7월 중순 이후에는 옥수수 재배구가 콩 재배구에 비해 수분함량이 낮았고, 콩 재배구에서는 plow 및 chisel 경운이 무경운에 비해 높게 유지되었다.

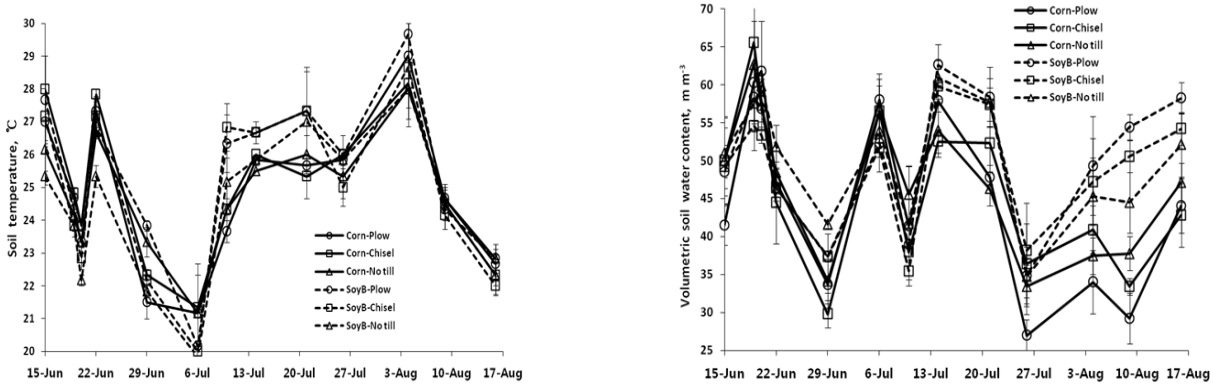
토양 무기태 질소의 변화

토양 무기태질소의 변화를 살펴보면(Table 2) 콩 재배포장의 질산태 질소의 함량은 생육초기인 6월 29일은 질산태 질소가 6～10 mg kg^{-1} 수준이었지만 콩의 생육이 왕성한 7월 19일 및 8월 15일의 생육후기로 갈수록 질산태 질소함량이 4 mg kg^{-1} 이하로 감소하였다.

옥수수 재배포장에서 6월 29일의 경운처리별 질산태 질소함량은 plow 및 chisel 경운에서는 11～13 mg kg^{-1}의 수준이었지만 무경운에서는 4.3 mg kg^{-1}로 낮았다. 그러나 7월 19일 이후는 경운처리간의 뚜렷한 차를 볼 수 없었으나 추비된 UAN의 무기화로 인해 질산태 질소가 20～40 mg kg^{-1}로 현저히 증가하였다. 옥수수 등숙기에 해당하는 8월 15일은 7월 19일에 비하여 옥수수의 질소흡수에 따라 질산태 질소가 감소하였지만 그 수준은 11～16 mg kg^{-1}로 6월 29일의 토양 잔존량과 비슷하였다.

토양 이산화탄소(CO_2) 발생량 변화

옥수수 재배구에서의 이산화탄소 발생량의 변화를 보면(Fig. 5) 대체적으로 120～160 mg m^{-2} hr^{-1}로 7월 초순까지 유지되다가 8월 이후로 되면서 감소하여 9월 초에 70 mg m^{-2} hr^{-1}에 가까운 발생량을 나타내었다. 경운처리별로는 이산화탄소가 많이 발생하는 시기에 plow 경운이 chisel 경운 및 무경운보다 낮은 발생량을 나타내었다. 그에 따라 9월 7일 누적발생량도 plow 경운이 400 kg C ha^{-1} 정도 감소하였다.



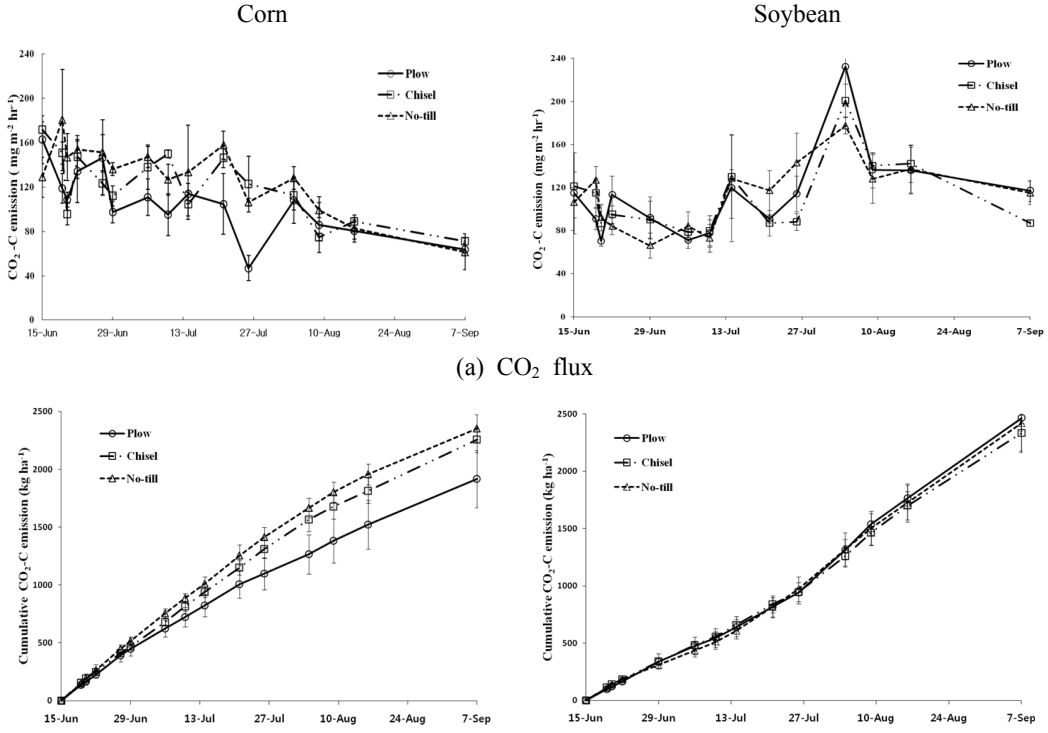
(a) (b)

Fig. 4. Soil temperature (a) and volumetric soil water content (b) across rotated crop and tillage treatments in the 2006 growing season. Vertical bars represent (plus and minus sign) SE (n=3).

Table 2. Changes of soil mineral nitrogen concentrations due to rotation crop and tillage practices in 2006.

Rotation Crop†	Tillage	June 29		July 19		Aug. 15	
		NO_3-N	NH_4-N	NO_3-N	NH_4-N	NO_3-N	NH_4-N
		mg kg^{-1}					
Corn	Plow	12.7 a	7.3 a	40.3	11.3	11.0	6.0
	Chisel	11.0 a	8.0 a	21.0	5.7	16.3	5.7
	No-till	4.3 b	5.0 b	26.7	11.3	14.3	5.3
	Mean	9.3	6.8	29.3	9.4	13.9	5.7
Soybean	Plow	6.3 b	5.7	3.7	6.7	4.0	5.0
	Chisel	8.0 ab	5.7	3.7	5.7	3.3	5.0
	No-till	9.7 a	5.0	5.0	5.3	3.7	5.7
	Mean	8.0	5.5	4.1	5.9	3.7	5.2

†296 kg N ha^{-1} (start fertilizer 36, side-dress 260) was applied on corn plot, but no N fertilizer was applied on soybean plot



(a) CO_2 flux

(b) Cumulative CO_2

Fig. 5. Seasonal changes of flux (a) and cumulative emission (b) of soil CO_2 of corn and soybean fields in association with tillage practices at the long-term experiment field of corn and soybean rotation in 2006. Vertical bars represent (plus and minus sign) SE (n=3).

콩 재배포장에서는 토양온도가 높았던 8월 초순의 이산화탄소 발생량이 200～230 mg m^{-2} hr^{-1}로 가장 발생량이 많았다. 이러한 결과는 7월～8월의 지온의 증가에 따라 전년도에 생산된 옥수수 잔사의 분해가 현저히 증가되었기 때문이라고 생각된다. 그에 따라 누적발생량도 8월 초에 증가하는 경향이었다. 9월 7일까지의 누적발생량은 2,400 kg C ha^{-1} 내외로 경운처리 간에 차이가 없었다.

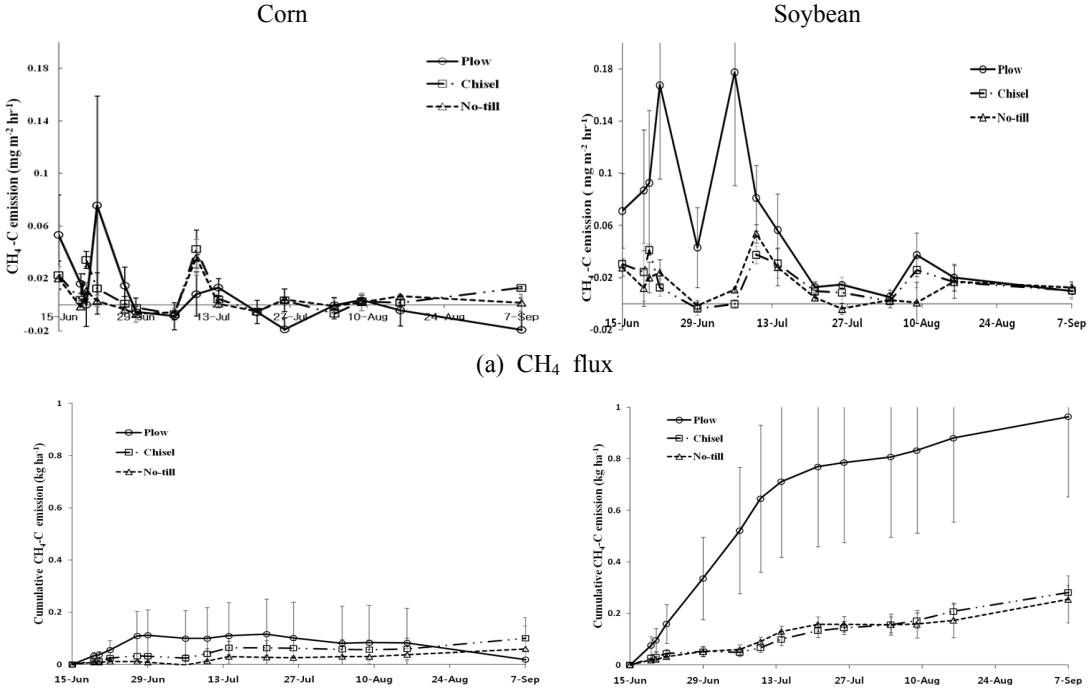
토양 메탄(CH_4) 발생량 변화

옥수수와 콩 초장에서의 메탄가스의 발생량은 다른 두 온실가스에 비해 0.06 mg m^{-2} hr^{-1} 이하로 현저히 적었다. 특히 옥수수 재배에서 더욱 낮았다. 그에 따라 누적 메탄 발생량도 9월 초까지 증가하지 않았다. 경운처리에서는 plow 경운에서 조금 증가하였다(Fig. 6).

메탄발생량은 옥수수에 비해 콩 재배구에서 상대적으로 많이 증가하였는데, 특히 콩 재배의 plow 경운구에서 6월 초～7월 초에 0.18 mg m^{-2} hr^{-1}까지 높은 발생량을 나타내었다. 따라서 누적 메탄가스 발생량도 plow 경운구에서 7월 중순에 0.7 kg C ha^{-1}로 증가하였다. Ball *et al.*(1999) 도 plow 경운이 무경운에 비해 토양 20～30 cm 깊이에서 메탄의 산화율(oxidation rate)이 낮았다고 하였다. 따라서 옥수수-콩 윤작의 콩 재배 시 plow 경운구에서 메탄이 많이 발생한 것은 전년도에 생성된 옥수수 잔사가 20 cm 이하로 깊이 묻힌 상태에서 유기물 분해 시 생성된 메탄이 토양 중에서 미처 산화되지 못하였던 것으로 생각된다.

토양 아산화질소(N_2O) 발생량 변화

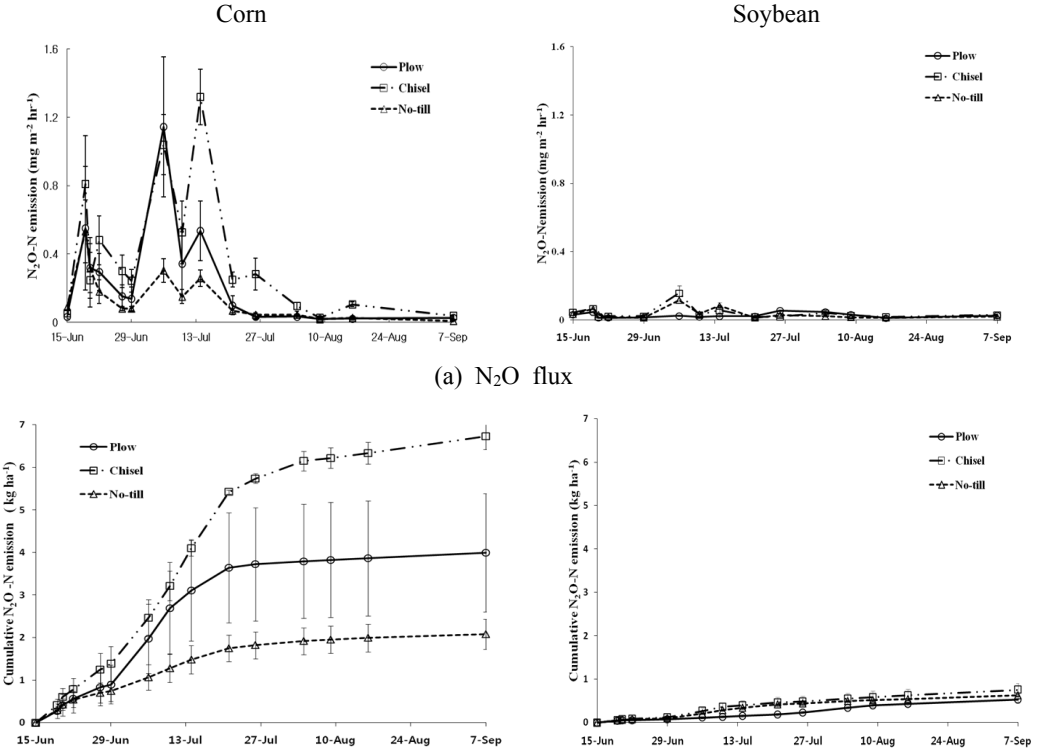
아산화질소 발생과 토양 무기태질소 함량은 높은 상관(0.973**)을 보인다고 했는데(Kim *et al.*, 2010), 옥수수 재배구의 아산화질소 발생량 변화를 보면 질소의 추비(UAN 260 kg N ha^{-1})된 직후인 6월 중순부터 7월 중순 사이의 시비된 질소비료의 무기화 과정에서 급격히 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 7). 이 시기에 plow 및 chisel 경운구는 1.1～1.3 mg m^{-2} hr^{-1}까지 발생량이 증가하였다. 경운처리 중에서는 chisel 경운구가 가장 높은 값을 나타내었고 무경운구에서 가장 낮은 값을 보였다. 무경운구는 발생량이 경운구에 비해 감소하여 최대발생량이 0.5 mg m^{-2} hr^{-1} 이하를 나타내었다. 모든 경운처리구에서 누적 아산화질소량은 7월 하순까지 꾸



(a) CH_4 flux

(b) Cumulative CH_4

Fig. 6. Seasonal flux (a) and cumulative emission (b) of soil CH_4 due to rotation crop and tillage practices in the long-term experiment field of corn-soybean rotation. Vertical bars represent (plus and minus sign) SE (n=3).



(a) N_2O flux

(b) Cumulative N_2O

Fig. 7. Seasonal changes of flux (a) and cumulative emission (b) of soil N_2O due to crop and tillage practices in the long-term experiment field of corn and soybean rotation. Vertical bars represent (plus and minus sign) SE (n=3).

준히 증가하였고, 8월 이후는 큰 변화가 없었는데, 경운처리별 누적발생량을 보면 chisel, plow 경운 및 무경운구의 아산화질소 발생량이 6.8, 4.0 및 2.0 kg N ha^{-1}로 chisel 경운구가 가장 높았고, 무경운구에서 가장 낮아 경운처리간에 뚜렷한 차이를 보였다.

콩재배 포장은 재배 시 질소비료를 시용하지 않았기 때문에 아산화질소의 발생량이 0.04 mg m^{-2} hr^{-1} 이하로 적었고, 그 발생량 또한 7월 이후로는 현저히 감소하였다. 아산화질소의 발생은 주로 질소비료의 시용량 및 경운방법에 따라 차이가 많음을 알 수 있었다.

온실가스 발생에 대한 윤작작물 및 경운 효과

Table 3은 6월 15일부터 9월 7일까지의 윤작작물(옥수수, 콩) 재배기간 중에 발생한 온실가스 누적발생량의 처리별 평균값을 나타낸 것이다. 이산화탄소 발생량은 2,300 kg C ha^{-1} 내외로 윤작작물 및 경운방법에 따른 차이를 보이지 않았다.

메탄의 누적 발생량은 윤작작물 간에 발생량이 현저히 차이가 났는데 콩 재배가 옥수수 재배에 비해 0.44 kg C ha^{-1}가 증가하였다. 이것은 주로 콩의 생육초기 plow 경운에서의 발생량 증가에 의한 것이었다. 콩은 무경운 재배를 하여도 수량의 감소가 없기 때문에 무경운 재배를 도입하면 파종의 노력뿐만 아니라 메탄의 발생도 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

아산화질소는 온실효과 기여도가 이산화탄소의 310배에 해당하기 때문에 발생량이 환경에 미치는 영향이 크다. 특히 옥수수 재배 시에는 300 kg N ha^{-1}에 가까운 많은 량의 질소비료가 시용되면서 생육기간 중 아산화질소가 4.27 kg N ha^{-1}이나(3경운 처리 평균) 많이 발생하는 것을 알 수 있었다. 이는 이산화탄소 1,323 kg C ha^{-1}에 해당하는 온실효과를 가지는 것으로 나타났는데, 이는 포장에서 재배기간 중 발생한 이산화탄소의 60%에 해당하는 온실효과를 가지는 것이었다. 경운처리에 따른 누적 아산화질소 발생량은 chisel 경운이 가장 많고 무경운이 가장 적었는데, 무경운은 chisel 경운에 비해 4 kg N ha^{-1}에 해당하는 량의 아산화질소를 감소시킬 수 있었다. 이는 포장에서 발생하는 이산화탄소의 50%에 해당하는 온실효과를 가지는 것으로 무경운에 의해 온실가스를 효과적으로 줄일 수 있음을 나타내고 있다. 아산화질소 발생에는 질소비료의 사용량 조정 및 무경운 등 보전경운의 채택 등 영농방식의 변경에 의해 온실가스 발생량을 많이 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

적 요

1. 30년 장기 연용구의 연작 대비 윤작에 의한 옥수수 및 콩의 수량증대는 옥수수보다 콩이 더 컸으며, 연작시 무경운에 따라 수량이 감소되었던 옥수수는 윤작에 의

Table 3. Seasonal cumulative emissions of CO_2, CH_4, N_2O and analysis of variance in long-term rotation and tillage experimental field of the Purdue Agricultural Research Center, West Lafayette, Indiana, USA.

Treatment		Cumulative GHG emissions		
		CO_2	CH_4	N_2O
		---------- kg C ha^{-1} ----------		kg N ha^{-1}
Rotation Crop				
Corn		2,176	0.06 b	4.27 a
Soybean		2,407	0.50 a	0.64 b
Tillage				
Plow		2,192	0.49	2.26 b
Chisel		2,295	0.19	3.74 a
No-till		2,388	0.15	1.36 b
Analysis of variance for cumulative GHG emissions				
Source	df	CO_2	CH_4	N_2O
		---------- Probability > *F* ----------		
Rotation crop	1	0.2455	0.0437	0.0212
Tillage	2	0.2518	0.1305	0.0097
Crop×Tillage	2	0.0954	0.0715	0.0135

해 수량이 많이 회복되었다. 콩은 연·윤작구 모두 무경운에서도 수량이 감소하지 않았다.

2. 윤작구의 작물재배기간의 이산화탄소 누적발생량은 재배작물 및 처리간 차이가 없었으며, 메탄은 콩의 재배시 plow 경운구에서 생육초기에 증가하였다.
3. 아산화질소의 발생은 옥수수 생육초기 질소시비 후에 질소비료의 무기화 과정에서 발생량이 증가하였는데, 경운방법에 따라 차이가 뚜렷하여 chisel 경운에서 가장 높았고, 무경운에서 가장 낮았다.
4. 콩-옥수수 윤작체계에서 plow 및 chisel 경운에 비해 무경운(no-tillage)의 채택에 따라 작물의 수량 감소없이 콩 재배 시 메탄 0.7 kg C ha^{-1} 및 옥수수 재배 시 아산화질소 2~4 kg N ha^{-1} 발생량을 감소시킬 수 있었다.

인용문헌

Agronomy Dept. Purdue University. 2006. Cropping systems research report 2005.

Baker, J. M., T. E. Ochsner, R. T. Venterea. 2007. Tillage and soil carbon sequestration - What do we really know ?. Agriculture, Ecosystems and Environment 118 : 1-5.

Ball, B. C., Scott, A., Parker, J. P. 1999. Field N_2O, CO_2 and CH_4 fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. Soil Till. Res. 53. 29-39.

CTIC. 2011. National crop residue management survey: A survey of tillage system usage by crop and acres planted. Conservation Technology Information Center, West Lafayette. IN. USA.

Drury, C. F., X. M. Yang, W. D. Reynolds, C. S. Tan. 2004. Influence of crop rotation and aggregate size on carbon dioxide production and denitrification. Soil & Tillage Research 79 : 87-100.

Gregorich, E. G., P. Rochette, P. St-Georges, U. F. McKim, and C. Chan. 2008. Tillage effects on N_2O emissions from soils under corn and soybeans in eastern Canada, Can. J. Soil Sci. 88. 153-161.

Kim G. Y., H. C. Jeong, K. M. Shim, S. B. Lee, and D. B. Lee. 2011. Evaluation of N_2O emissions with different growing periods (spring and autumn seasons), tillage and no tillage conditions in a Chinese cabbage field. Korean J. Soil Sci. Fert. 44(6) : 1239-1244.

Kim G. Y., K. H. So, H. C. Jeong, K. M. Shim, S. B. Lee, and D. B. Lee. 2010. Evaluation of N_2O emissions with changes of soil temperature, soil water content and mineral N in Red pepper and soybean field. Korean J. Soil Sci. Fert. 43(6) : 880-885.

Hutchinson, G. L. and A. R. Mosier. 1981. Improved soil cover method for field measurement of nitrous oxide fluxes. Soil Sci. Soc. Am. J. 45 : 311-316.

Keren, J. S. and M. G. Johnson. 1993. Conservation tillage impacts on national soil and atmospheric carbon levels. Sci. Soc. Amer. J. 57 : 200-210.

Minami, K. 1997. Mitigation of nitrous oxide emissions from fertilized soils. In: Proceeding of IGAC Symposium, Nagoya, Japan.

Mosier, A., D. Schimel, D. Valentine, K. Bronson, and W. Parton. 1991. Methane and nitrous oxide fluxes in native, fertilized, and cultivated grasslands, Nature 350 : 330-332.

Mosier, A. D., A. D. Halvorson, C. A. Curtis, A. Renle, and X. J. Liu. 2006. Net global warming potential and greenhouse gas intensity in irrigated cropping systems in north eastern Colorado. J. Environ. Qual. 35 : 1584-1598.

Mummey, D. J., J. L. Smith, and G. Bluhm. 1998. Assessment of alternative soil management practices on N_2O emissions from US agriculture. Agri. Ecosyst. Environ. 70 : 79-87.

Reicosky, D. C., M. J. Lindstorm, T. E. Schumacher, D. E. Lobb, and D. D. Malo. 2005. Tillage-induced CO_2 loss across and eroded landscape. Soil Till. Res. 81 : 183-194.

Yusuf, R. I., John. C. Siemens, and D. G. Bullock. 1999. Growth analysis of soybean under no-tillage and conventional tillage systems. Agron. J. 91 : 928-933.