

고라니(*Hydropotes inermis*)의 분변이 습지 토양의 CO₂ flux에 미치는 영향

박호민 · 전승훈* · 이상돈†

이화여자대학교 환경공학과

*가천대학교 조경학과

Study on effect on CO₂ flux of wetland soil by feces of Korean water deer(*Hydropotes inermis*)

Hyomin Park · Seunghoon Chun* · Sangdon Lee†

Dept of Environmental Sciences and Engineering, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea

*Dept of Landscape Architecture, Gachon University, Gyeonggi-Do 461-701, Korea

(Received: 08 June 2015, Revised: 29 July 2015, Accepted: 05 August 2015)

요약

토양으로부터 방출되는 CO₂의 양은 전 지구적 지구 탄소 순환에서 가장 큰 방출 중 하나로 알려져 있다. 특히 토양 내 미생물의 유기물질 분해 과정에 의해 방출되는 이산화탄소의 양은 토양의 탄소 저장량을 장기적으로 결정하는 요인이 되므로 그 양을 정량화 하는 것이 필요하다. 본 연구는 토양에서 고라니의 분변이 CO₂ 배출에 미치는 영향을 파악하기 위해 수행하였다. 그리고 고라니의 분변이 토양의 CO₂ 배출에 주는 영향과 토지의 이용에 따라 변화하는 CO₂ flux를 정량화 하였다. 그 결과 고라니 분변 내 많은 유기물질은 토양 미생물의 활성화에 영향을 주고 그로 인해 토양의 호흡 및 토양 내 물리·화학적 변화가 발생되어 토양의 유기물 함량이 서로 다르게 나타남을 확인할 수 있었다. 특히 4개 지역의 토양(경작지, 휴경지, 버드나무 군락, 갈대습지)의 C/N ratio와 CO₂ flux는 분변의 유무와 통계적으로 매우 유의미한 상관 관계를 나타냈으며($P<0.01$), 분변의 영향을 받은 토양의 CO₂ flux는 분변의 영향을 받지 않은 토양보다 2-20배 더 높은 것으로 나타났다. 이 연구는 고라니의 분변이 토양에 주는 영향과 야생동물 분변을 이용한 토양 물질 순환 연구를 통해 육상 생태계 및 토양권의 물질 순환과 그 영향의 정도를 정량화 하였다는 점에서 큰 의의가 있는 연구이다.

핵심어 : 고라니, 야생동물, 분변, CO₂ flux, 물질 순환, 탄소 순환

Abstract

The total global emission of CO₂ from soils is recognized as one of the largest fluxes in the global carbon cycle. Especially it is necessary to quantify the amount of CO₂ emitted by the organic material decomposition processes of microorganisms in the soil, because it becomes one of a factor for determining the carbon stocks in the soil. This study was conducted to estimate the impact of the Korean water deer (*Hydropotes inermis*)' feces to the soil organic matter. Also, effects of Korean water deer' feces on CO₂ emissions of soil and land use pattern dependent CO₂ flux quantification are studied. The organic materials in the Korean water deer' feces significantly changed organic matter content of soil and influenced the activity of soil microorganisms, both changing of respiration of the soil and physical-chemical components in soil. In particular, C/N ratio and the CO₂ flux of soil of four regions (Rice paddy, Fallow ground, *Salix koreensis* community, *Phragmites australis* community) showed a statistically highly significant correlation ($P<0.01$) with the presence or absence of feces. CO₂ flux of soil affected by the feces was 2-20 times higher than the soil unaffected by the feces. This study has great significance to quantify the extent of the material circulation and its impact to the terrestrial ecosystem and soil zone throughout Korean water deer' feces. Feces of wildlife can affect soil and soil material circulation.

Key words : Korean water deer, Wildlife, Feces, CO₂ flux, Material cycle, Carbon cycle

1. 서 론

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, 기

후 변화에 관한 정부간 패널)보고서에 따르면 지난 30년간 지표면은 계속해서 따뜻해지고 있으며, 북반구에서 1983-2012년의 기간은 과거 1400년 동안 가장 따뜻한 기간이다 (IPCC, 2013). 이러한 지구 온난화의 주범은 CO₂, CH₄, N₂O와 같은 온실가스의 증가라 할 수 있으며, CO₂는 전체 온실가스의 배출량의 80%를 차지하고 있다.

† To whom correspondence should be addressed.
Dept of Environmental Sciences and Engineering, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea
E-mail: lsd@ewha.ac.kr

지구상에 존재하는 탄소는 대기와 해양, 육상 생태계 등에 나누어 존재하며, 기체와 무기탄소 및 유기탄소의 형태로 순환하고 있다(Jazen, 2004). 이 중 토양권은 대기권 CO₂의 원천일 뿐만 아니라 대기권 CO₂의 저장의 역할을 하고 있으며(IPCC, 2000), 토양권에서 대기로 방출되는 탄소는 약 75~120Gt CO₂yr⁻¹로 화석연료 방출량의 11~20배에 달한다(Raich and Potter, 1995; Schimel et al., 1996). 또한 토양 유기물질은 많은 양의 탄소를 포함하는데 최근에 측정된 바로는 대략 1600Pg이며(Eswarna et al., 1993), 대기 중 CO₂가 포함하고 있는 탄소의 양의 2배가 넘는다(Raich and Potter, 1995). 오늘날 토양으로부터 방출되는 CO₂의 양은 전 지구적 지구 탄소 순환에서 가장 큰 방출 중 하나로 알려져 있으며, 토양 호흡의 작은 규모의 변화는 대기 중 CO₂ 농도에 큰 영향을 미칠 것이다(Schlesinger, 2000). 토양 내 탄소는 전 지구적 기후변화에 영향을 미치는 요소이므로(Davidson and Janssens, 2006), 토양의 탄소순환에 관한 연구는 생태계의 에너지 흐름에 관한 중요한 연구라 할 수 있다.

전 세계적으로 탄소에 관한 관심이 증대와 함께 토양권에 관한 연구도 점차 증가하고 있다. 국내에서도 토양호흡에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있으며 다양한 생태계에 대한 토양호흡에 관한 연구가 실행되고 있다. 생물의 호흡작용으로 인해 토양 표면으로부터 방출되는 CO₂ flux를 토양 호흡이라고 하며, 미래 대기 이산화탄소 농도와 지구 탄소 수지를 예측하는데 상당히 중요하다(Yosuke et al., 2011). 하지만 대부분의 연구가 산림 토양 호흡에 국한되어 있고 과수원, 농경지, 수변 등에 관한 연구는 매우 드물기 때문에 생태계 탄소수지를 전체적으로 파악하기 위해 보다 다양한 생태계의 토양호흡 자료와 관련 환경요인과 상호작용에 관한 연구 자료의 보충이 절실히 요구된다(Lee et al., 2010).

많은 연구자들이 물질 순환에 관한 관심과 요구 증가로 인하여 토양호흡과 물질 순환에 관한 연구가 이루어지고 있다. 그러나 토양권 생태계의 주요 구성원인 동물이 토양호흡에 미치는 영향에 대해서는 아직까지 연구가 수행된 바가 없는 실정이다. 동물의 행동은 유기물질의 분해에 직접적인 영향을 주어 식생의 생산 및 분포, 토양 영양물질의 공간적 분포에 직접적인 영향을 주며(Batzli, 1978; Jay et al., 1980), 동물의 분변에 함유되어 있는 풍부한 유기물질이 토양에 가해졌을 때 토양 미생물의 활성화 및 토양 성질을 변화시키는 것은 국내외 많은 연구들을 통해 잘 알려진 사실이다(Won et al., 2004; Suh et al., 2010). 그러므로 미생물의 유기물질 분해과정에 의해 방출되는 이산화탄소의 양은 장기적인 면에서 토양의 탄소 저장량을 결정하는 요인이 되므로(Schlesinger, 1977), 그 양을 정량화 하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구는 고라니의 영향을 받는 다양한 토양을 선택하여 고라니의 분변이 토양의 이화학적 성질과 토양 CO₂ flux에 미치는 영향에 대한 상관성을 파악하고 영향인자들과 토양호흡과의 분산분석을 실시하여 야생동물의 분변이 동물 생태계와 토양 물질 순환에 미치는 영향에 대해 알아보하고자 한다.

2. 재료 및 연구지역

2.1 연구대상종

고라니(*Hydropotes inermis*)는 세계적으로 한국과 중국에 토착종으로 분포하며, 영국과 프랑스의 일부 지역에도 일부가 이주되어 분포하는 것으로 알려져 있다(Cooke and Farrell, 1998). 고라니는 소목(Artiodactyla), 사슴과(Cervidae), 고라니속(*Hydropotes*)에 속하며, 중국의 양쯔강 이남에 서식하는 중국고라니(*H. i. inermis*)와 우리나라 전역에 분포하고 있는 한국고라니(*H. i. argyropus*)로 크게 분류된다.

현재 중국 고라니는 IUCN(International Union for Conservation of Nature)과 중국 정부에 의해 Lower Risk/Near Threatened species와 Vulnerable species로 각각 지정되어 보호되고 있다(Wang, 1998; Hilton, 2000). 그러나 한국 고라니의 경우 우리나라 전역에 서식하는 고유종으로 중·대형 포유류 중 서식밀도가 높고 주로 산림과 습지, 농경지에서 활동하는 것으로 알려져 있으며(Park and Lee, 2013), 제주도를 제외한 전국적으로 개체수가 풍부하여 야생 동·식물 보호법을 통해 유해야생동물 및 수렵 종으로 지정하여 매년 포획을 통한 밀도 조절 정책을 시행하고 있다(Kim et al., 2009). 2003년부터 2007년까지 포획된 고라니의 개체수는 18,367마리이다(Ministry of environment, 2008).

2.2 조사지 개황

본 연구지역은 경기도 고양시에 위치하고 있는 장항습지이다. 장항습지는 산림성(forested) 조석담수습지(tidal freshwater marsh)로 종단길이 7.6km, 최대 폭 0.6km, 면적 2.7km²에 달하는 대규모 습지이며 한강하구 습지보호지역 중에서 가장 상류 쪽에 위치하고 있다. 장항습지는 서울에 인접하고 있지만 군사보호지역으로 오랫동안 일반인의 출입이 금지되어 자연적인 하구환경이 잘 보전된 유일한 자연하구이다. 장항습지는 연안습지와 내륙습지의 특성을 동시에 간직하고 있으며 2006년에 60.7km²의 면적이 습지보호지역으로 지정되었다. 습지 중앙부에서는 논농사가 이루어지고 있고 하류로 갈수록 장항습지의 대표적인 식물군락인 버드나무(*Salix koreensis*)군락이 발달되어 있으며, 갈대(*Phragmites australis*)군락이 여러 곳에 형성되어 있다. 이 곳은 다양한 생물서식처 유형이 나타나고 있는데 특히 버드나무가 우점하는 삼림성 습지, 초본이 우점하는 습초지, 하구갯벌, 논, 나대지 등에 따라 다양한 동식물이 출현하고 있다.

장항습지는 오랫동안 군사보호지역으로 보호되어 고라니, 삿(*Felis bengalensis euphilura*), 너구리(*Nyctereutes procyonoides*) 등의 포유류 서식밀도가 높다. 특히 일부 건조한 나대지나 제방 사면부에는 1년생 또는 2년생 식물이 우점하여 이를 주로 섭식하는 고라니의 서식처로 제공되고 있으며(Han river Basin Environmental Office, 2009), 농경지가 있고

물을 쉽게 구할 수 있어 고라니의 서식수가 크게 증가하고 있다. 고라니는 장항습지 내에 버드나무가 많고 숨을 곳이 있어서 서식 밀도가 높으며 습지 내에서만 서식하는 수가 50~70마리로 알려져 있다(Han river Basin Environmental Office, 2009).

3. 실험 방법

3.1 실험용 시료 채취

실험용 토양과 고라니의 분변은 2012년 9월에 채취하였다. 장항습지의 토양의 특성에 따라 경작지, 휴경지, 버드나무 군락, 갈대 습지로 토양 시료 채취 지역을 구분하였다. 경작지(Rice paddy)는 장항습지 중앙에 위치해 있는 논농사 지역 중 무작위로 조사지역을 선택하였다. 이 지역은 매년 농사를 짓고 있으며 곳곳에 고라니의 분변과 족적이 확인되었다. 휴경지(Fallow ground)는 경작지 중 현재 농사를 짓지 않는 지역을 선택하였으며, 휴경지 내 고라니의 분변과 족적은 다른 조사지역들보다 적게 분포하고 있었다. 버드나무 군락(*Salix koreensis*)은 장항습지 하류에 위치하고 있다. 이곳은 점토질 토양으로 말뚝개(*Hiromantes dehaani*)의 서식처로 이용되고 있으며, 주변에서 고라니의 분변과 족적 및 여러 가지 흔적을 쉽게 확인 할 수 있었다. 갈대습지(*Phragmites australis*)는 버드나무 군락 근처에 위치하고 있으며 버드나무 군락의 토양보다 토양 내 모래와 자갈이 많은 것이 특징이다. 이곳은 편평한 지형이며 고라니의 분변을 쉽게 발견할 수 있었다.

토양 유형별로 고라니 분변에 영향을 받는 토양 3곳, 고라니 분변의 영향을 받지 않는 토양 3곳을 무작위로 선정하여 토양 시료를 채취하였다(Table 1). 토양 시료는 암석의 노출이 심하거나 지형의 기복이 심한 곳, 리터 층이 형성된 곳은 제외 하였으며 고라니 분변의 영향을 받은 토양 시료는 고라니의 분변이 제거 된 토양의 표토 위에 샘플관($\Phi=31\text{cm}$, $h=10\text{cm}$)을 설치하여 표토 층의 토양(0~10cm)을 채취하였고, 즉시 지퍼백에 넣어 밀봉하였다. 고라니 분변의 영향을 받지 않은 토양은 조사구 내 고라니 분변이 없는 지역을 무작위로 선정한 뒤 샘플관($\Phi=31\text{cm}$, $h=10\text{cm}$)을 설치하여 표토 층의 토양(0~10cm)을 채취하였다.

채취한 토양은 즉시 실험실로 옮긴 뒤 이물질들을 제거하여 제작한 배양용기에 넣어 배양하였으며, 이때 고라니 분변의 영향을 받은 토양은 채취 당시에 있던 고라니 분변을 분변 아래에 위치한 토양 위에 분쇄하여 배양하였다.

3.2 pH

채취된 토양 시료의 CO₂ flux와 pH와의 상관관계를 알아보기 위해 배양 기간 동안 2주 간격으로 pH를 측정하였다. pH는 토양화학분석법(National Academy of Agricultural Science, 2010)의 pH 1:5 측정방법에 근거하였으며, 유리전극 pH meter(HORIBA F-51)를 이용하여 토양 시료 상등액의 pH를 측정하였다.

3.3 토양 함수량

토양 함수량은 토양 오염 공정 시험법(2009)으로 하여 측정하였으며, 각 지점별(경작지, 휴경지, 버드나무 군락, 갈대습지)로 채취한 고라니 분변의 영향을 받은 토양과 고라니 분변의 영향을 받지 않은 토양을 70°C 오븐에 넣어 48시간 동안 건조 시킨 뒤 각 조사지점별 토양의 수분 함량을 구하였다.

3.4 CO₂ flux

고라니의 분변의 영향에 대한 토양 미생물의 호흡을 측정하기 위하여 토양의 CO₂ flux를 측정하였다. 먼저 채취한 토양을 2000 μm 의 체를 이용하여 토양에 내 이물질을 제거하였다. 그리고 토양 입자가 균일하게 된 토양 시료를 제작한 용기($\Phi=33\text{cm}$, $h=15\text{cm}$)에 넣어 25°C로 유지되는 인큐베이터에 5주간 배양 시켰으며, 배양 전 토양의 수분을 측정하여 배양기간 동안 토양의 수분이 일정하게 유지될 수 있도록 하였다. 2주 간격으로 폐쇄형 역학 챔버(Closed dynamic chamber)에 배양 토양을 넣은 뒤 CO₂ analyzer(LI-820 CO₂ analyzer, LI-COR)를 이용하여 CO₂ flux를 측정하였다(Robertson, 1999). CO₂ flux를 측정하는 동안 Hobo data logger를 이용하여 온도와 습도, 기압을 측정하였다. 측정된 데이터는 용기의 밀폐된 공간에서 일정 시간 동안 발생하는 이산화탄소의 증가율로부터 CO₂ 밀도를 계산하여 단위시간당 단위면적에서의 이산화탄소 방출량을 구했다. 이 모든 실험은 3반복으로 실시하였다.

3.5 C/N ratio

토양 내 C/N ratio를 구하기 위해 각 지점에서 채취한 토양과 분변시료를 70°C oven에 48시간 건조시켰으며, 건조시킨 시료를 막자 사발을 이용하여 분쇄한 뒤 NICEM의 안정성 동위원소비 질량분석기를 이용하여 토양과 분변 내 존재하는 C와 N의 함량을 구하여 C/N비율을 계산하였다.

Table 1. GPS point of sampling sites that were collected of Korean water deer' feces

	Rice paddy	Fallow ground	<i>Salix koreensis</i> community	<i>Phragmites australis</i> community
Site 1	N37° 38' 01.1"	N37° 37' 58.9"	N37° 38' 27.0"	N37° 38' 26.9"
	E126° 46' 06.7"	E126° 46' 04.2"	E126° 44' 57.8"	E126° 44' 57.1"
Site 2	N37° 38' 01.0"	-	N37° 38' 28.0"	N37° 38' 25.7"
	E126° 46' 06.9"	-	E126° 44' 55.1"	E126° 33' 56.4"
Site 3	N37° 38' 00.8"	-	N37° 38' 28.0"	N37° 38' 25.4"
	E126° 46' 07.3"	-	E126° 44' 55.1"	E126° 44' 55.9"

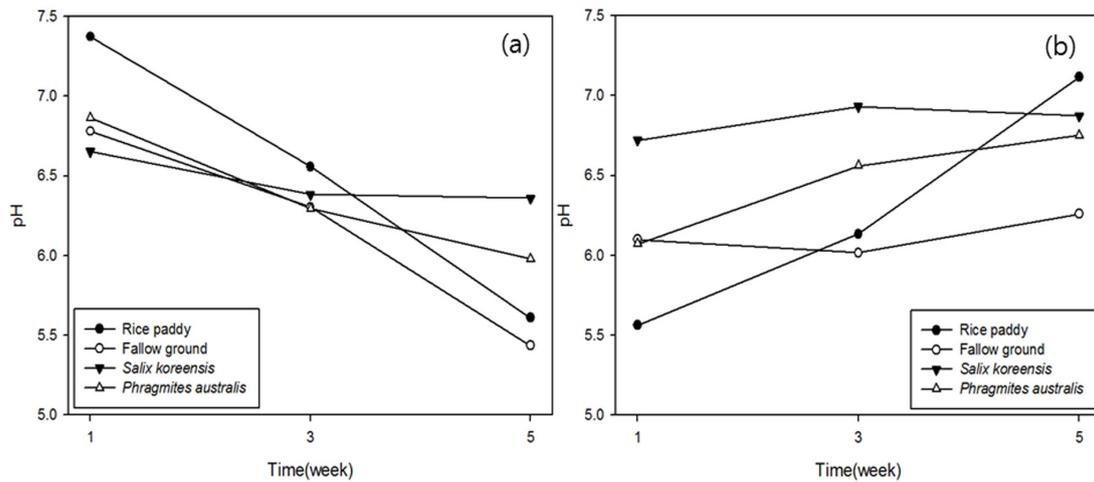


Fig. 1. Changes of pH of the soil type : (a) unaffected soil of the Korean water deer' feces (b) affected soil of the Korean water deer' feces.

3.6 통계 분석

고라니 분변의 영향과 토양으로부터 발생하는 CO₂ flux와의 관계는 SPSS Statistics 21.0의 AVOVA-test 및 상관 분석 방법을 이용하여 분석하였다.

4. 결 과

4.1 pH

고라니 분변의 영향이 없는 토양의 pH를 측정된 결과, 경작지, 휴경지, 버드나무 군락, 갈대 습지의 토양 pH는 시간이 경과할 수록 감소하는 경향을 보이며 경작지의 pH 변화가 다른 지역에 비하여 크게 감소하였다. 배양 초기의 토양 pH는 경작지가 7.37, 휴경지가 6.78, 버드나무군락이 6.65, 갈대습지가 6.86으로 pH 7.0에 가까운 중성의 pH를 나타내고 있지만 시간이 경과할수록 고라니의 분변 영향이 없는 토양은 pH가 낮아지는 것을 확인할 수 있으며, 5주 후 측정했을 때는 경작지 5.61, 휴경지 5.44, 버드나무군락 6.36 갈대습지 5.98이었으며 배양이 진행 될수록 토양의 산성화가 진행되고 있음을 알 수 있다(Fig. 1a).

한편 고라니 분변의 영향을 받은 경작지, 휴경지, 버드나무 군락, 갈대습지의 토양 pH의 변화를 나타낸 결과 경작지, 갈대 습지의 토양 pH는 지속적으로 증가함을 알 수 있었다. 특히 경작지 토양의 pH가 큰 폭으로 증가하였으며, 휴경지 토양의 pH는 pH가 일시적으로 낮아졌다가 증가하였다. 한편 버드나무군락 토양의 pH는 증가하다가 감소하는 추세이지만 1주 후 pH 측정값은 6.72, 3주 후 6.93, 5주 후 6.87로 처음과 비교하면 pH는 오히려 증가하였다. 이를 통해 고라니 분변의 영향을 받은 토양의 pH가 증가하면서 산성토양의 pH 수치를 나타내던 토양이 pH 7에 가까운 중성토양으로 변화하고 있는 것을 알 수 있다(Fig. 1b).

4.2 토양 함수량

고라니의 분변이 토양 함수량에 미치는 영향을 알아보기

위해 고라니 분변의 영향을 받은 토양과 고라니 분변의 영향을 받지 않은 토양의 수분함량을 측정하였다(Fig. 2). 고라니 분변의 영향을 받지 않은 지역 중 토양 함수량이 가장 높은 곳은 휴경지 토양으로 토양 함수량이 24.46%로 나타났다. 반면 고라니 분변의 영향을 받은 지역 중 토양 함수량이 가장 높은 곳은 버드나무 군락 지역의 토양이었으며, 토양 함수량은 27.51%였다.

한편, 토양 수분 함량이 가장 낮은 지역은 고라니 분변의 영향을 받지 않은 지역에서는 갈대습지, 고라니 분변의 영향을 받은 토양에서는 경작지이며 이때 각각의 수분 함량은 18.18%, 19.13%로 나타났다.

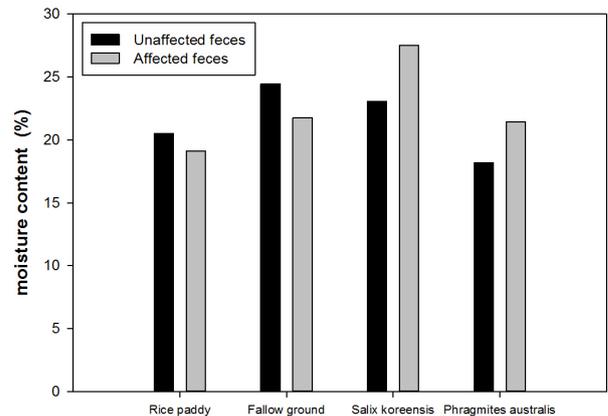


Fig. 2. Comparison of the soil moisture contents with and without feces.

4.3 CO₂ flux

CO₂ analyzer를 이용하여 각 토양의 CO₂ flux를 측정 한 결과 고라니 분변의 영향을 받지 않는 토양의 CO₂ flux 중 휴경지, 버드나무 군락 토양은 시간이 경과할 수록 토양의 CO₂ flux가 증가하지만 경작지, 갈대습지 토양은 토양 CO₂ flux가 감소하는 경향이 나타났다. 고라니 분변의 영향을 받지 않는 토양과는 달리 고라니 분변의 영향을 받은 토양은 시간이 경과할수록 모든 유형의 토양에서 배출되는

CO₂ flux의 양이 감소하는 것으로 나타났으며, 특히 버드나무군락의 토양의 CO₂ flux는 다른 토양과 비교하여 큰 폭으로 감소하고 있음을 확인할 수 있었다. 한편 각 토양 유형별로 고라니 분변의 유무에 따른 CO₂ flux를 살펴본 결과 고라니 분변의 영향을 받은 토양이 고라니 분변의 영향을 받지 않은 토양보다 CO₂ flux가 2-20배 정도 더 높

은 것을 확인할 수 있었다(Fig. 3).

실험 결과를 바탕으로 배양기간 동안 각 토양 별로 측정된 토양의 CO₂ flux가 분변의 유무에 따라 유의한 차이가 있는지를 알아보기 위하여 AVOVA-test를 실시하였다. 그 결과 경작지, 휴경지 토양의 토양 CO₂ flux는 분변의 유무에 의한 차이가 있었으며, 버드나무 군락의 토양 CO₂ flux

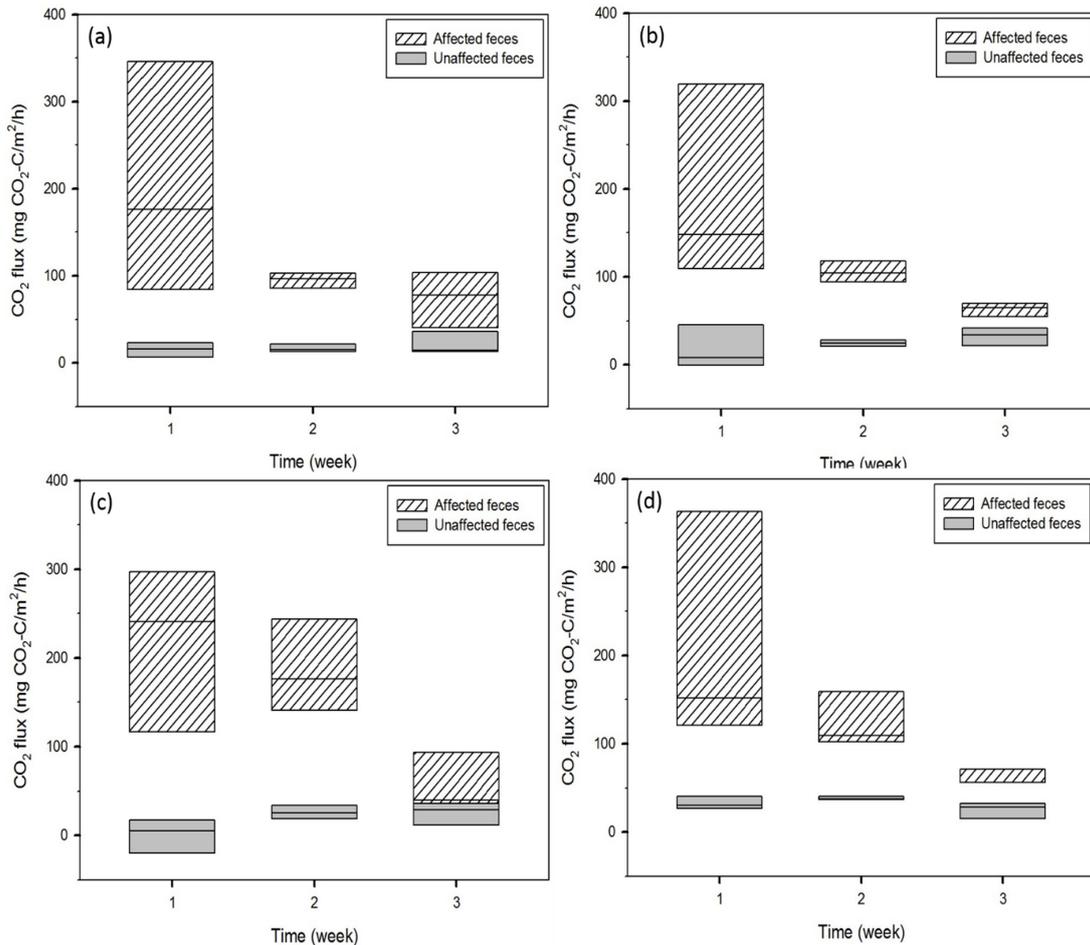


Fig. 3. Changes of CO₂ flux of the soil type and Korea water deer' feces : (a)Rice paddy, (b)Fallow ground, (c) *Salix koreensis* community, (d) *Phragmites australis* community. Box plots average 25-75% and medium in the line.

Table 2. Statistical analysis between the CO₂ flux and the variable of each soil by using the analysis of two way-ANOVA (* P < 0.05, ** P < 0.01, *** P < 0.001).

	Source	SS	DF	F-ratio	P
Rice paddy	Feces	54979.6	1	17.5	0.001**
	Period	12149.4	2	1.9	0.187
	Feces*Period	16306.4	2	2.6	0.116
Fallow ground	Feces	47411.9	1	21.3	0.001**
	Period	10432.4	2	2.3	0.138
	Feces*Period	15860.2	2	3.6	0.061
<i>Salix koreensis</i> community	Feces	103583.9	1	59.2	0.000***
	Period	19247.3	2	5.5	0.016*
	Feces*Period	33271.0	2	9.5	0.002**
<i>Phragmites australis</i> community	Feces	49346.3	1	16.1	0.002**
	Period	11613.6	2	1.9	0.193
	Feces*Period	24007.0	2	3.9	0.049*

는 분변유무와 배양기간, 분변유무와 배양기간과의 상호작용에 의한 요인과 모두 유의미한 상관관계를 보였다($P < 0.01$). 특히 토양의 CO₂ flux와 분변 유무와의 유의확률은 매우 유의한 것으로 나타났으며($P < 0.001$), 분변과 배양 기간 간의 상호작용에 의한 요인도 매우 유의미함을 알 수 있었다($P < 0.01$). 갈대습지의 토양 CO₂ flux는 분변 유무와 배양기간과 분변간의 상호관계에 유의미한 값을 나타냈으며, 특히 분변의 유무와 매우 유의한 확률 값을 보였다($P < 0.01$). 따라서 경작지, 휴경지, 버드나무군락, 갈대습지 모두 토양의 CO₂ flux 및 분변의 유무와 매우 유의미한 상관관계가 있음을 확인할 수 있었다(Table 2).

4.4 C/N ratio

분변에 함유된 유기물이 토양의 C/N ratio에 미치는 영향을 알아보기 위해 2주 간격으로 배양 토양 내 탄소와 질소의 성분비를 측정된 뒤 토양 내 탄소와 질소의 비율을 계산하였다.

고라니 분변의 영향을 받지 않은 토양의 C/N ratio는 시간이 경과함에 따라 토양의 C/N ratio가 증가하는 것으로 나타났으며, 4개의 토양 중 특히 경작지의 C/N ratio의 상승 비율이 큰 폭으로 증가하였다. 고라니 분변의 영향을 받지 않는 토양 중 경작지는 탄소의 함량은 1주차에 0.590 wt%, 3주차에 0.605 wt%, 5주차에 0.433 wt%로 토양 내 탄소 함량이 증가하였다가 감소하고 있지만 질소 함량은 1주차에 0.080 wt%, 3주차에 0.062 wt%, 5주차에 0.006 wt%로 탄소의 감소율보다 더 큰 비율로 감소하여 결과적

으로 C/N ratio는 크게 증가하였다. 또한 경작지와 비슷하게 휴경지의 탄소와 질소 함량은 감소하고 있으나 탄소의 감소량이 더 작아서 휴경지의 C/N ratio도 증가하고 있다. 그러나 버드나무 군락과 갈대습지 토양의 탄소 함량은 증가하고 있지만 질소의 함량은 작게 감소하여 토양의 C/N ratio가 증가하고 있음을 알 수 있었다(Fig. 4a).

한편 고라니 분변의 영향을 받은 토양의 C/N ratio를 측정된 결과 경작지, 휴경지, 버드나무군락은 3주 후 측정하였을 때에는 C/N ratio가 크게 증가하는 경향이 나타났지만 5주 후에는 C/N ratio가 크게 감소하였다. 그러나 갈대습지 토양의 C/N ratio는 시간이 지날수록 지속적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 경작지와 갈대습지 토양은 초기에는 탄소의 감소량이 질소의 감소량보다 더 작기 때문에 C/N ratio가 증가하였으나 실험 종료 시점에는 탄소의 증가량보다 질소의 증가량이 더 커지면서 C/N ratio가 감소하였다. 그러나 배양 일주일 후 측정된 C/N ratio의 값과 비교하였을 때 배양 5주 후의 C/N ratio 값은 초기의 값보다 증가한 것을 알 수 있다(Fig. 4b).

분변의 유무와 토양 배양기간의 차이에 따라 C/N ratio의 평균값이 통계적으로 유의미한 차이를 알아보기 위하여 SPSS Statistics 21.0의 이원분산분석을 이용하여 검정하였다. 경작지와 휴경지, 버드나무 군락의 토양 모두 분변과 배양기간, 분변과 배양기간 간의 상호작용에 의한 영향에 대해 모두 통계적으로 유의미한 값을 나타냈다($P < 0.01$). 그러나 갈대습지 토양은 배양기간과 유의미한 확률 값을 나타냈을 뿐, 분변의 유무나 배양기간과 분변의 유무 간의

Table 3. Changes of C, N, C/N ratio in unaffected soil of the Korean water deer' feces and affected soil of the Korean water deer' feces.

		1 week	3 weeks	5 weeks	
Rice paddy	affected soil of feces	C	1.237	0.916	1.066
		N	0.103	0.048	0.084
		C/N ratio	12.021	19.043	12.647
	unaffected soil of feces	C	0.590	0.605	0.433
		N	0.080	0.062	0.006
		C/N ratio	7.363	9.762	70.614
Fallow ground	affected soil of feces	C	0.935	0.959	1.035
		N	0.090	0.057	0.089
		C/N ratio	10.403	16.958	11.590
	unaffected soil of feces	C	0.974	0.894	0.875
		N	0.128	0.089	0.054
		C/N ratio	7.578	10.083	16.294
<i>Salix koreensis</i> community	affected soil of feces	C	0.975	1.135	0.965
		N	0.084	0.060	0.078
		C/N ratio	11.586	19.004	12.374
	unaffected soil of feces	C	1.007	1.054	1.158
		N	0.115	0.102	0.096
		C/N ratio	8.729	10.330	12.044
<i>Phragmites australis</i> community	affected soil of feces	C	1.374	1.156	1.250
		N	0.134	0.103	0.110
		C/N ratio	10.230	11.274	11.356
	unaffected soil of feces	C	1.452	1.487	1.487
		N	0.157	0.142	0.127
		C/N ratio	9.239	10.450	11.669

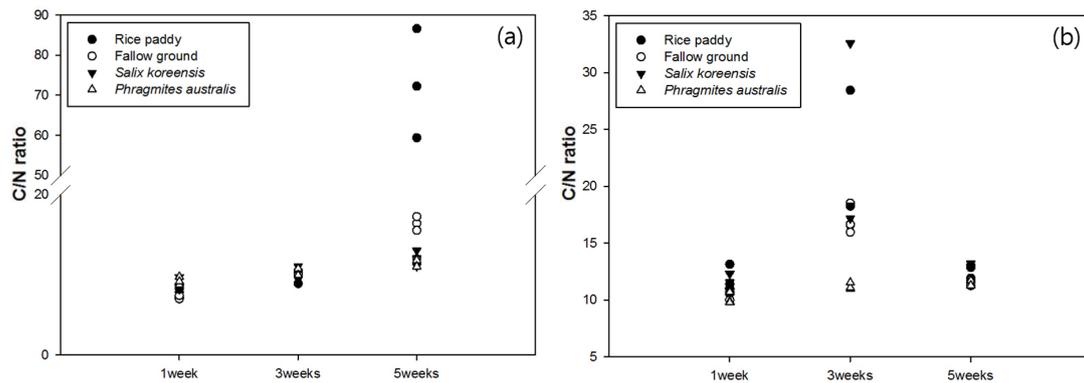


Fig. 4. Changes of C/N ratio of the soil type : (a) unaffected soil of the Korean water deer' feces (b) affected soil of the Korean water deer' feces.

Table 4. Statistical analysis between the C / N ratio and the variable of each soil by using the analysis of two way-ANOVA ([^] $P < 0.05$, ^{**} $P < 0.01$, ^{***} $P < 0.001$).

	Source	SS	DF	F-ratio	P
Rice paddy	Feces	708.3	1	24.699	0.000 ^{***}
	Period	4315.4	3	50.162	0.000 ^{***}
	Feces*Period	4945.9	3	57.491	0.000 ^{***}
Fallow ground	Feces	10.9	1	25.477	0.000 ^{***}
	Period	102.7	3	80.166	0.000 ^{***}
	Feces*Period	109.6	3	85.571	0.000 ^{***}
<i>Salix koreensis</i> community	Feces	94.1	1	12.055	0.002 ^{**}
	Period	163.8	3	6.995	0.002 ^{**}
	Feces*Period	182.1	3	7.779	0.001 ^{**}
<i>Phragmites australis</i> community	Feces	0.5	1	2.403	0.141
	Period	10.8	3	17.59	0.000 ^{***}
	Feces*Period	1.6	3	2.562	0.091

상호작용의 평균 값이 갈대습지 토양의 C/N ratio의 평균과 통계적으로 유의미하지 않은 것으로 나타났다(Table 4).

5. 고찰

토양 미생물의 유기물 분해에 영향을 주는 요소로써 유기물 내 탄소와 질소의 함량비(C/N ratio)가 있다. 토양 미생물은 토양 내 유기물을 분해하여 탄소는 에너지원으로 질소는 영양원으로 섭취하여 체구성에 이용한다(Choi, 2010). 유기물 분해는 탄소와 질소의 함량에 따라 크게 달라지며 토양 유기물의 C/N ratio가 높은 경우에는 유기 화합물의 합성과 에너지원으로서의 탄소의 양은 충분하지만 단백질 합성에 필요한 질소는 결핍되기 때문에 미생물의 증식도 적어지며 가해진 유기물의 분해도 늦어진다.

고라니 분변의 C/N ratio는 13.90으로 일반적으로 토양의 유기재료로 많이 사용하는 돈분의 C/N ratio 17에 비해 낮은 탄질비를 가지고 있다(Park and Lee, 2014). 그러므로 본 연구는 유기물이 풍부한 고라니의 분변이 토양에 가해졌을 때 토양의 물리·화학적 성질이 변화하였으며, 토양의 CO₂ flux도 분변의 유무에 따라 상이한 결과가 나타남

을 확인할 수 있었다.

일반적인 토양의 C/N ratio는 대략 10:1의 근사치이며, 경작지 토양 속에 함유된 유기물의 양은 농사를 짓지 않는 토양 속 유기물의 함량보다 많기 때문에 C/N ratio가 8:1-15:1까지 이고 일반적인 토양의 C/N ratio는 10:1-12:1이다(Lee, 2006). 본 연구에서 측정된 토양의 C/N ratio를 살펴보면 분변의 영향을 받은 곳의 C/N ratio는 유기물 함량이 높은 경작지의 평균 C/N ratio의 범위와 비슷한 수치를 나타내는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서 고라니 분변의 영향을 받은 토양의 C/N ratio는 분변의 영향을 받지 않은 토양에 비해 C/N ratio가 낮았으며, 고라니 분변의 영향을 받은 토양의 C/N ratio는 배양 초기에는 증가하다가 시간이 경과할 수록 감소하는 경향을 보였다. 특히 배양 초기에 토양 내 질소 함량이 큰 폭 감소하였는데, 그 이유는 토양에 사용하는 유기물의 C/N ratio가 15-30 이상인 높은 유기물 토양에 사용하면 미생물의 에너지원으로 이용될 탄소는 충분하고 영양원으로 섭취하여 체세포 구성에 이용할 질소는 부족하기 때문에 토양 중의 NH₄-N이나 NO₃-N까지 미생물 세포의 단백질 합성에 이용하기 때문이다(Choi, 2010). 본 연구에서

사용된 고라니의 분변의 평균 C/N ratio는 14.52로 비료로 사용하는 동물들의 분변들보다 높은 유기물을 가지고 있으므로 고라니 분변의 영향을 받은 토양의 C/N ratio가 증가함을 알 수 있었다. 이는 토양에 퇴비를 사용하면 토양 중 미생물체량 및 효소 활성이 증가함을 보이면서 토양 중 미생물을 증가시킨다는 기존의 연구결과와 일치한다(Won et al., 2004).

토양 pH는 토양 중에 존재하는 각종 양분의 유효도, 유효물질의 용해도, 식물뿌리와 미생물체내의 생리화학 반응 등을 좌우하는 매우 중요한 토양의 화학적 특성으로 알려져 있다. 본 연구에서 토양 고라니 분변의 영향을 받은 토양은 pH가 상승하는 것으로 나타났다. 그 이유는 유기물 함량이 많은 분변 자체의 높은 pH와 분변 내 다량의 무기염에 의한 영향으로 판단된다. 이는 가축의 분변을 토양에 사용하여 토양 pH가 상승하는 여러 실험들의 결과와 일치하는 것으로 나타났다(Kim et al., 1999 ; Yoon, 2008).

한편 토양의 CO₂ flux와 pH의 관계를 분석한 결과 고라니 분변의 영향을 받는 토양은 pH 7이하에서 지속적으로 pH가 증가하고 있으며 이때 토양의 CO₂ flux는 감소하고 있는 것을 알 수 있었다. pH 7이상인 토양에서는 pH가 증가하면 이산화탄소 생산율이 감소하고 pH 7이하인 토양에서는 pH가 증가하면 이산화탄소 생산율도 증가한다고 하였다(Rao and Pathak, 1996; Sitaula et al., 1995). 그러므로 본 연구의 토양 pH와 CO₂ flux결과를 상관관계를 기존의 연구와 비교하였을 때 반대되는 경향을 보였다.

토양 수분은 직접적으로는 식물의 뿌리 호흡과 미생물 활동에, 간접적으로는 토양의 물리·화학적 성질에 변화를 일으켜 토양에서 배출되는 CO₂ 양이 변동된다. 그러므로 토양 수분은 토양의 CO₂ 방출에 주요한 영향 인자이며, 토양이 물로 포화되거나 포화상태에 근접한 조건에서는 혐기성 환경으로 변하여 토양으로부터 배출되는 CO₂ 양은 감소하게 된다(Raich and Schlesinger, 1994; Schimel and Clein, 1996). 또한 토양의 수분이 높을 경우 토양 공극 내 확산속도가 저하되어 유기물의 분해와 뿌리 호흡으로부터 발생하는 CO₂가 억제된다(Linn and Doran, 1984; Doran et al., 1990).

일반적으로 토양 함수비 0-60% 조건에서는 함수비가 증가할수록 미생물 활동도가 증가하고, 60-100% 조건에서는 함수비가 증가할수록 미생물 활동도가 감소하는데(Hammel et al., 1981), 본 실험의 토양 함수비는 14-25%로 토양 함수비가 증가할수록 미생물 활동도가 증가하여 CO₂ flux가 증가하는 것을 알 수가 있었다. 또한 토양 함수량과 CO₂ flux와의 관계를 살펴본 결과 분변의 영향을 받지 않은 곳과 받은 곳 모두 토양 함수량이 높은 지역에서 CO₂ flux의 수치가 가장 큰 것으로 나타났다. 따라서 CO₂ flux는 분변의 유무보다는 토양 함수량이 더 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서는 분변 영향의 유무와 토양 유형에 따라 CO₂ flux의 배출량이 상이하게 나타났다. 분변으로 인해

토양으로부터 배출되는 CO₂ flux의 측정 데이터를 비교한 결과 고라니 분변의 영향을 받은 토양에서는 분변의 영향을 받지 않은 토양보다 최대 20배의 CO₂가 토양으로부터 배출됨을 알 수 있었다. 이는 토양의 환경 조건이 최상이고 분해될 수 있는 물질이 토양에 많이 유입되면 미생물의 활성이 증가함에 따라 이산화탄소의 양도 크게 증가하기 때문이다(이민웅, 2006). 특히 뿌리 호흡과 미생물 호흡에 의해 흡 속도로 방출된 CO₂의 확산이 토양 내 미세입자에 의해 방해를 받아 대기 중 CO₂의 확산에 비해 더 어렵기 때문에 토양 내 CO₂의 농도가 증가할 수 있다(Oh et al., 2005). 그러므로 고라니 분변이 토양에 가해지면서 분변 내 함유된 풍부한 유기물의 분해를 위해서 토양 미생물이 활성화가 되고, 그로 인해 미생물의 호흡이 증가하여 토양 내 CO₂ flux의 발생량이 증가한 것으로 예상된다. 그리고 버드나무군락과 갈대습지는 경작지와 휴경지에 비해 더 높은 CO₂ flux를 볼 수 있었으며, 이를 통해 버드나무 군락과 갈대습지는 경작지와 휴경지에 비하여 토양 내 미생물이 활성화 되고 있음을 알 수 있다.

한편 분변의 영향을 받는 지역의 CO₂ flux는 시간이 경과 할수록 감소하는 경향을 보였다. 그 이유는 토양 호흡으로 인해 증가한 CO₂와 물이 반응하여 탄산을 형성하고 새롭게 만들어진 탄산은 규산염, 탄산염과 같은 다양한 광물을 풍화시켜 중탄산염 이온을 만드는데 이 반응을 통해 토양 내 존재하는 CO₂가 소모되기 때문이다(Bener et al., 1983). 또한 시간이 지날수록 토양 내 유기물의 양이 감소되어 미생물의 활성이 저하되며, 분변과 같은 유기물이 토양에 가해졌을 때 화학비료와 다르게 양분 분해 정도가 속효적이지 못하고 지효적 특성 때문이기도 하다(Yoon, 2008). 그러므로 고라니 분변의 분해 속도가 감소하게 되어 시간이 지날수록 CO₂ flux의 양이 감소하게 되는 것으로 판단된다.

실험 결과를 통해 토양에 유기물이 풍부한 물질이 가해지면 유기물의 분해는 토양 온도, 토양수분, 토양의 pH, C/N ratio등 많은 요인이 상호적으로 결합되어 유기물 분해에 영향을 미치게 되어 토양 내 물리·화학적 변화를 동반함을 알 수 있었다. 또한 토양은 지형의 특색에 따라 토양의 특성이 다르게 나타나므로, 유기물이 토양환경에 미치는 영향은 토양에 따라 상이할 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구는 고라니의 분변 내 유기물이 토양유형에 따라 미치는 물리·화학적 영향을 알아보았다. 그리고 토양 특성과 고라니 분변의 영향에 의한 토양 CO₂ flux를 측정하여 고라니의 분변이 토양 CO₂ flux배출에 주는 영향과 토지의 이용에 따라 변화하는 CO₂ flux를 정량화 하였다. 그 결과 고라니의 분변 내 있는 많은 유기물질들은 토양 미생물의 활성화에 영향을 주고 그로 인해 토양의 호흡 및 토양 내 물리·화학적 변화가 발생되어 고라니 분변의 영향을

받은 토양과 고라니의 분변의 영향을 받지 않은 토양은 서로 다른 특징이 나타남을 확인할 수 있었다.

그러므로 우리나라 전역에 고루 분포하고 있는 야생동물의 대표종인 고라니를 이용하여 고라니 분변을 이용한 토양의 물질 순환에 관한 연구는 동물의 분변이 토양에 주는 영향을 알아 볼 수 있는 의미 있는 연구라 할 수 있겠다. 또한 고라니 분변을 이용한 토양 물질 순환 연구를 통해 동물 생태계와 토양간의 물질 순환과 그 영향의 정도를 정량화 한다는 것에 큰 의미가 있다고 할 수 있겠다.

사 사

본 연구는 KEITI (2014000130010), NRF (2009-0083527) 및 국토교통부 물관리연구사업12기술혁신CO2 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Batzli, GO and Cole, FR (1979). Nutritional ecology of microtine rodents : digestibility of forage. *J. of Mammal.* 60, pp. 740-750
- Berner, RA, Lasaga AC and Garrels RM (1983). The carbonate-silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon-dioxide over the past 100 million years. *Am. J. Sci.* 283(7), pp. 641-683
- Choi, SM (2010). *Soil science*. Yeamoonsa. [Korean Literature]
- Cooke, A and Farrell, L (1998). *Chinese Water Deer. The mammal society, London and the British Deer society*. Fordingbridge. pp. 1-32
- Crutzen, PJ (1981). *Atmospheric chemical processes of the oxides of nitrogen, including N₂O, C.C. Delwiche (Ed.), Denitrification, Nitrification, and Atmospheric Nitrous Oxide*. Wiley, New York. pp. 17-44
- Davidson, EA and Janssens, IA (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*. 440(7081), pp. 165-73
- Doran, JW, Mielke LN and Power JF (1990). Microbial activity as regulated by soil water-filled pore space Symposium on ecology of soil microorganisms in the microhabitat environment, Transactions of the 14th International Congress of Soil Science, Vol. III, Int. Soc. Soil Sci, Kyoto, Japan. pp. 94-99
- Eswaran, H, Van Den Berg, E, and Reich, P (1993). Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57, pp.192-194
- Han river Basin Environmental Office (2009). *Monitoring report in Han river estuary wetland conservation area* [Korean Literature]
- Hammel, JE, Papendick, RI and Campbell, GS (1981). Fallow tillage effects on evaporation and seed zone water content in a dry summer climate. *Soil Sci. Am. J.* 45(6), pp. 1016-1022
- Hilton TC (2000). *IUCN Red list of threatened species*. International Union for the Conservation of Nature, Gland, Switzerland
- IPCC (2000). Summary for Policy Markers : Land Use, Land Use Change and Forestry. A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Secretariat, WMO, 7bis, Avenue de la Paix, C.P. no. 2300, 1211 Geneva 2, Switzerland.
- IPCC (2013). The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom/New York, NY, USA.
- Janzen, HH (2004). Carbon cycling in earth systems - a soil science perspective, *Agriculture and Environment*. 104(3), pp. 399-417
- Jay, DM, George, OB, Everett, KR, John, CS (1980). Some effect of mammalian herbivores and fertilization on tundra soils and vegetation. *Arctic and Alpine Research*. 12(4), pp. 565-578
- Kim, JG, Lee, KB, Lee, SB, Lee, DB, Kim, SJ (1999). The effect of long - term application of different organic material sources on chemical properties of upland soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 32(3), pp. 239-253 [Korean Literature]
- Kim, WM, Kim, JY, Seo, CW, Kim, UK, Kim, JH, Shin, JH, Jung, HM, Bang KJ and Joe, YG (2009). *Study on the optimal management for sustainable use of Korean water deer population*, National Institute of Environmental Research [Korean Literature]
- Lee, EH, Lim, JH and Lee, JS (2010). A review on soil respiration measurement and its application in Korea. *J. of Agr. and Forest Meteorol.* 12(4), pp. 264~276 [Korean Literature]
- Lee, MW (2006). *Soil biology*. Dongguk Univ. Press. [Korean Literature]
- Linn, DM and Doran, JW (1984). Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48, pp. 1267-1272
- Ministry of environment. KDI Center of Economic Information (2008). Expansion in the crops of protecting wildlife damage during harvest. http://epic.kdi.re.kr/epic/epic_view.jsp?num=95989&menu=1 [Korean Literature]
- National Academy of Agricultural Science (2010). *Methods of soil chemical analysis*. [Korean Literature]
- Oh, NH, Kim, HS and Richter DD (2005). What regulates

- soil CO₂ concentrations? – A modeling approach to CO₂ diffusion in deep soil profiles. *Environmental Engineering Science* 22(1), pp. 38–45
- Park, HM and Lee, SD (2013). Habitat use pattern of Korean waterdeer based on the land coverage map. *J. Wetl. Res.* 15(4), pp.567–572. [Korean Literature]
- Park, HM and Lee, SD (2014). Factor of plant growth in relation to feces of Korean waterdeer and land use patterns. *J. Wetl. Res.* 16(4), pp.443–452 [Korean Literature]
- Raich, JW and Schlesinger, WH (1994). The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate, *Tellus*, 44B, pp. 81–99
- Raich, JW and Potter, CS (1995). Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biochemical Cycles*. 15(1), pp.23–26
- Rao, DN and Pathak, H (1996). Ameliorative influence of organic matter on biological activity of salt-affected soils. *Arid Soil Research and Rehabilitation*. 10(4), pp. 311–319
- Robertson, GP, Bledsoe, CS, Coleman, DC, Sollins, P (1999). *Standard soil methods for long-term ecological research*. Oxford Univ. Press, New York
- Schimel, DS, Braswell, BH, McKeown, R, Ojima, DS, Parton, WJ and Pulliam, W (1996). Climate and nitrogen controls on the geography and timescales of terrestrial biogeochemical cycling. *Global Biogeochemical Cycles*. 10(4), pp. 677–692
- Schimel, J, Clein, J (1996). Microbial response to freeze–thaw cycles in tundra and taiga soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 28, pp. 1061–1066
- Schlesinger, WH (1977). Carbon balance in terrestrial detritus. *Ann. Rev. Ecol. Systematics*. 8, pp.51–81
- Schlesinger, WH (1997). *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*, 2nd edn. Academic Press, San Diego
- Schlesinger, WH and Andrews JA (2000). Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*. 48(7), pp. 7–20
- Sitaula, BK, Bakken LR and Abrahamsen G (1995). N-fertilization and soil acidification effects on N₂O and CO₂ emission from temperate pine forest soil. *Soil Biology and Biochemistry*. 27(11), pp. 1401–1408
- Vitousek, PM, and Howarth, RW (1991). Nitrogen limitation on land and in the sea: how can it occur?. *Biogeochemistry*. 13(2), pp. 87–115
- Wang, S (1998). *China red data book of endangered animals (mammal volume)*. Science Press, Beijing.
- Won, HY, Kwon, JS, Shin, YK, Kim, SH, Suh, JS and Choi, WY (2004). Effects of composted pig manure application on enzyme activities and microbial biomass of soil under Chinese Cabbage cultivation. *J. Soil Sci. Fert.* 37(2), pp. 109–115 [Korean Literature]
- Yoon, HB (2008). *Nitrogen mineralization and soil carbon accumulation by livestock manure composts in upland soil*, Ph. D. Dissertation, Kangwon University, Chuncheon, Korea. [Korean Literature]