

## 순천만 연안 생태계에서 토양의 이화학적 성질에 의한 이산화탄소 호흡 특성

강동환 · 권병혁<sup>1)\*</sup> · 김필근<sup>2)</sup>

부경대학교 지구과학연구소, <sup>1)</sup>부경대학교 환경대기과학과, <sup>2)</sup>한국지질자원연구원 석유해저연구본부  
(2009년 10월 23일 접수; 2009년 11월 17일 수정; 2009년 12월 11일 채택)

### CO<sub>2</sub> Respiration Characteristics with Physicochemical Properties of Soils at the Coastal Ecosystem in Suncheon Bay

Dong Hwan Kang, Byung Hyuk Kwon<sup>1)\*</sup>, Pil-Geun Kim<sup>2)</sup>

Geo-Sciences Institute, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

<sup>1)</sup>Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

<sup>2)</sup>Petroleum & Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea  
(Manuscript received 23 October, 2009; revised 17 November, 2009; accepted 11 December, 2009)

#### Abstract

This paper was studied CO<sub>2</sub> respiration rate with physicochemical properties of soils at wetland, paddy field and forest in Nongju-ri, Haeryong-myeon, Suncheon city, Jeollanam-do. Soil temperature and CO<sub>2</sub> respiration rate were measured at the field, and soil pH, moisture and soil organic carbon were analyzed in laboratory. Field monitoring was conducted at 6 points (W3, W7, W13, W17, W23, W27) for wetland, 3 points (P1, P2, P3) for paddy field and 3 points (F1, F2, F3) for forest in 10 January 2009. CO<sub>2</sub> concentrations in chamber were measured 352~382 ppm for wetland, 364~382 ppm for paddy field and 379~390 ppm for forest, and the average values were 370 ppm, 370 ppm and 385 ppm, respectively. CO<sub>2</sub> respiration rates of soils were measured -73~-44 mg/m<sup>2</sup>/hr for wetland, -74~-24 mg/m<sup>2</sup>/hr for paddy field and -55~-106 mg/m<sup>2</sup>/hr for forest, and the average values were -8 mg/m<sup>2</sup>/hr, -25 mg/m<sup>2</sup>/hr and 38 mg/m<sup>2</sup>/hr. CO<sub>2</sub> was uptake from air to soil in wetland and paddy field, but it was emission from soil to air in forest. CO<sub>2</sub> respiration rate function in uptake condition increased exponential and linear as soil temperature and soil organic carbon. But, it in emission condition decreased linear as soil temperature and soil organic carbon. CO<sub>2</sub> respiration rate function in wetland decreased linear as soil moisture, but its in paddy and forest increased linear as soil moisture. CO<sub>2</sub> respiration rate function in all sites increased linear as soil pH, and increasing rate at forest was highest.

**Key Words :** Coastal ecosystem, Physicochemical property, Soil respiration, Carbon dioxide

#### 1. 서론

대기 중의 높은 이산화탄소 농도에 대한 우려는 지

구온난화 및 지구 탄소순환과 관련하여 현 인류에게는 최고의 관심사항이 되었다. 녹색식물에 의한 대기권의 탄소를 생물권으로 가져오는 독립영양 고정(fixation)과 탄소를 다시 대기권으로 돌려보내는 호흡(respiration) 사이의 균형을 정량적으로 규명하는 것이 매우 중요하다. 지구상의 대부분의 호흡활동은 토

\*Corresponding Author : Byung-Hyuk Kwon, Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea  
Phone: +82-51-629-6644  
E-mail: bhkwon@pknu.ac.kr

양에서 일어나며, 토양호흡은 유기질류물의 분해, 뿌리호흡 및 토양유기물(soil organic matter)의 느린 분해에 의한 것이다(Sylvia 등, 2005). 18세기에 시작된 토지의 개간 및 경작은 토양호흡을 가속화하였으며, 1950년대까지 대기권 이산화탄소 축적의 가장 큰 요인이 되었다(Post 등, 1990; Schlesinger, 1986). 자연에서 이산화탄소의 두 가지 주된 생물학적 수지는 광합성에 의한 고정과 지구적인 호흡인데, 매년 대기 탄소의 7% 정도를 서로 역방향으로 운반하고 있다(Bolin, 1983). 이러한 지구 전체적인 관점은 규모가 작고 정의가 용이한 생태계의 탄소순환을 이해하는 골격을 제공한다.

미국과 유럽에서는 토양유기탄소의 저장량, 온실가스의 토양호흡 등에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 또한 대기 중 이산화탄소 발생량에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 1985년 이후부터 수행된 토양호흡 관련 연구문헌들이 1990년까지는 10편 이하로 출판되었으나 1991년부터 급격하게 증가하여 2002년 이후에는 연간 150편 이상의 연구물들이 출판되었다(Luo 와 Xhou, 2006). 국내에서 수행된 토양호흡 관련 연구논문(학위논문 포함)은 2000년 이전에는 단 3편이었으며(김 등, 1987; 노, 1979; 성, 1976), 2000년 이후 이산화탄소의 토양호흡(soil respiration) 관련 연구로는 고흥만 인공습지에서 갯벌의 토양유기탄소와 대기 중 이산화탄소의 변동관측 연구(강 등, 2008), 갯벌에서 이산화탄소의 배출과 배출특성 연구(김, 2007), 논에서 이산화탄소 교환(이 등, 2003), 산림에서 이산화탄소 교환(최 등, 2003) 등이 있다. 또한 폐쇄형 역학 챔버 시스템(closed dynamic chamber system)을 이용한 토양호흡 연구(채 등, 2003)와 여러 가지 토양호흡 관측기기의 비교 연구(채 등, 2005) 등을 포함한 30편 정도의 연구가 보고되었다.

본 연구에서는 전라남도 순천만 지역 중 해룡면 농주리 일대의 연안 생태계인 갯벌, 논 및 산림 부지에서 토양의 이산화탄소 호흡율을 측정하고 이화학적 성질을 분석하였다. 복합적인 연안 생태계에서 토양의 이화학적 성질과 이산화탄소 호흡율의 상관성을 파악하고, 토양호흡율과 지배인자들 사이의 함수적인 관계를 산정하였다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1. 관측부지 개요

본 연구지역은 전라남도 순천시 해룡면 농주리 일대의 연안 생태계인 갯벌(coastal wetland), 논(paddy field) 및 산림(forest) 부지이다. 갯벌, 논 및 산림에서 토양호흡 측정과 시료채취는 2009년 1월 10일에 수행되었으며, 갯벌 6개 지점(W3, W7, W13, W17, W23 및 W27), 논 3개 지점(P1, P2 및 P3) 및 산림 3개 지점(F1, F2 및 F3)으로 총 12개 지점이다(Fig. 1).

### 2.2. 토양호흡 측정 방법

현장관측에 이용된 토양호흡측정시스템(soil respiration system)은 이산화탄소의 토양호흡을 측정하기 위해 고안된 폐쇄형 역학 챔버 시스템(closed dynamic chamber system)이다. 이 시스템은 본체(EGM-4)와 토양호흡챔버(SRC-1) 및 토양온도센서(STP-1)로 구성되어 있다. 본체는 Environmental Gas Monitor(EGM-4, PP Systems)이며, 본체에는 이산화탄소량 측정을 위한 적외선가스분석기(infrared gas analyzer; IRGA)가 탑재되어 있다. 챔버는 토양호흡챔버(SRC-1, PP systems)이며, 폐쇄형 역학 챔버이다. 토양온도센서는 Soil temperature probe(STP-1, PP systems)이다. 이산화탄소의 측정은 적외선 기체 분석법을 이용하며, 마이크로프로세서의 제어를 통해 측정을 하므로 측정의 정확도가 높다. 또한, 주기적으로 자동 영점(auto-zeroing)보정을 수행하여 최적의 상태를 유지한다.

폐쇄형 역학 챔버법은 측정이 용이하고 측정 시간이 짧아 토양호흡의 직접적인 관측에 있어서 가장 널리 이용되는 방법이다. 폐쇄형 역학 챔버를 토양에 설치한 후, 챔버 내 이산화탄소의 변화량을 이용하여 토양호흡을 산정하게 된다. 이산화탄소의 변화율을 이용하여 토양호흡율이 산정되며, 일반적으로 이산화탄소의 토양호흡을 측정은 챔버법이 널리 이용된다(Luo 와 Xhou, 2006).

챔버가 토양 표면에 설치되면 토양에서 대기로 이산화탄소의 방출(emission) 또는 흡수(sequestration)가 발생하며, 이로 인해 챔버 내 이산화탄소 농도의 변화가 발생한다. 시간에 따른 챔버 내 이산화탄소 농도

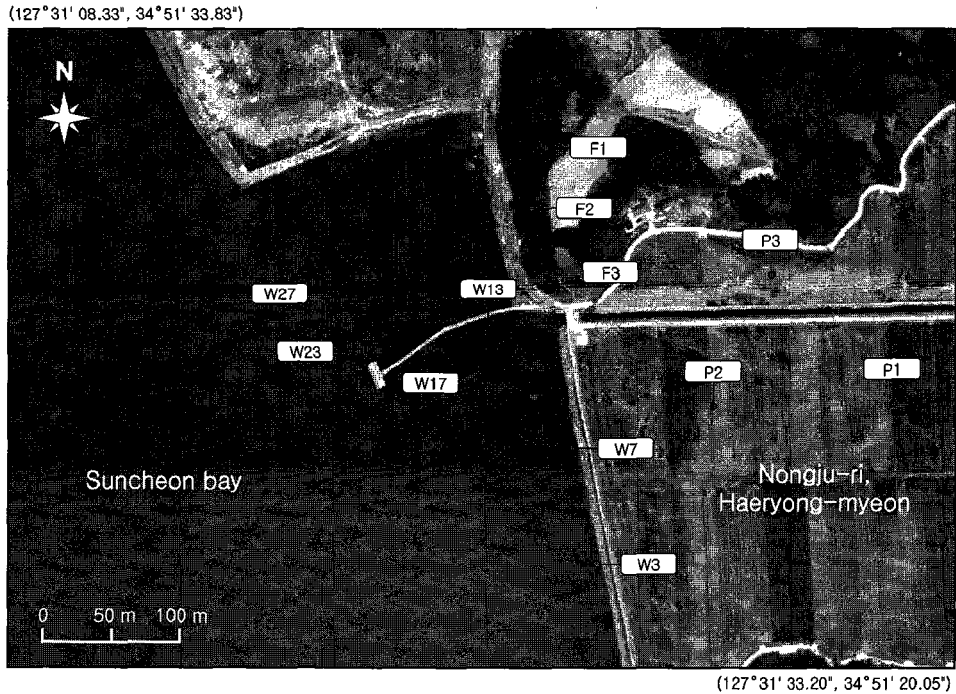


Fig. 1. Soil respiration measuring and soil sampling points at the coastal ecosystems.

의 변화량을 측정하여, 아래의 식을 이용하여 이산화탄소의 토양호흡율을 산정한다(Field 등, 1989).

$$F = \frac{(c_f - c_i) V}{\Delta t A} \quad (1)$$

여기서,  $F$ 는 이산화탄소의 토양호흡율[ $ML^{-2}T^{-1}$ ],  $V$ 는 챔버의 체적[ $L^3$ ],  $\Delta t$ 는 측정 시간 간격[T],  $A$ 는 챔버가 설치된 토양의 표면적[ $L^2$ ],  $c_i$ 는 챔버 내 이산화탄소의 초기농도[ $ML^{-3}$ ] 및  $c_f$ 는  $\Delta t$  시간 이후의 이산화탄소 농도[ $ML^{-3}$ ]이다.

### 3. 결 과

#### 3.1. 이화학적 성질

본 연구지역의 갯벌, 논 및 산림 부지에서 토양과 대기의 온도는 현장에서 측정되었으며, 12개 시료의 토양 함수비(soil moisture), pH 및 유기탄소량(soil organic carbon)이 실내에서 분석되었다(Table 1). 토양 함수비와 pH 성분은 환경부의 토양오염공정시험법에 준하여 수행하였으며, 토양유기탄소량은 부경대학교

공동실험실습관의 총유기탄소 분석기를 이용하여 분석되었다.

갯벌, 논 및 산림 부지에서 현장 측정된 토양의 평균온도는 0.6°C, 3.8°C 및 6.7°C 이었으며, 대기의 평균온도는 -2.5°C, 1.7°C 및 -1.9°C 이었다. 토양이 대기에 비해 2°C 이상 높았으며, 산림 부지에서는 낙엽 등에 의한 보온효과로 인해 8°C 이상의 차이로 보였다. 토양과 대기의 온도는 온실가스(green house gas) 방출(emission) 및 흡수(uptake) 작용의 중요한 지배인자(controlling factor)로서 그 의미가 크다(Luo and Xhou, 2006). 뿌리온도(root temperature)와 뿌리호흡율(root respiration rate)의 관계는 저온에서는 온도 상승에 따라 호흡율이 지수형으로 증가하지만, 45~50°C 이상의 고온에서는 호흡율이 감소하는 것으로 보고되었다(Palta 와 Nobel, 1989). 생태계에서 온도에 대한 토양호흡을 민감도는 함수(moisture) 조건(Dorr와 Munnich, 1987), 뿌리와 근권 호흡(Boone 등, 1998; Atkin 등, 2000; Pregitzer 등, 2000; Maier 와 Kress, 2000; Pregitzer, 2003), 토양유기물질(soil or-

**Table 1.** Air temperature and physicochemical properties of soil at the coastal ecosystems

Sample No.	Air temp. (°C)	Soil temp. (°C)	Moisture (%)	Soil pH	SOC (%)	
Wetland	W3	-2.0	0.5	100.70	8.00	0.92
	W7	-2.0	0.5	116.39	7.94	1.02
	W13	-2.7	0.7	71.72	8.23	0.89
	W17	-3.6	0.2	61.00	8.20	0.79
	W23	-3.1	1.0	74.40	8.06	1.07
	W27	-1.8	1.0	90.15	8.07	1.58
Paddy	P1	1.7	5.5	22.85	6.91	2.02
	P2	1.7	3.1	22.28	6.51	2.10
	P3	1.6	2.9	24.05	6.75	1.31
Forest	F1	-2.2	7.7	6.63	5.84	4.00
	F2	-2.2	6.1	5.63	5.85	5.01
	F3	-1.5	6.4	3.36	5.16	3.42

ganic matter)의 함량(Liski 등, 1999; Giardina와 Ryan, 2000; Fang 등, 2005; Knorr 등, 2005) 등에 의해 영향을 받는다.

갯벌 부지 내 6개 지점의 함수비는 61.00~116.39%의 범위로서, 부지 평균은 85.73% 이었다. 논과 산림 부지의 평균함수비는 23.06%와 5.21%로서 낮았다. 부지 내 측정지점별 함수비의 차이는 갯벌에서 높았으며, 논 부지에서 상대적으로 적게 나타났다. 이는 연구지역의 논 부지 내 수분함량이 공간적으로 균질함을 의미한다. 함수비는 토양 내에서 미생물 활동을 지배하는 요소로서, 일반적으로 함수비가 60% 전후에서 가장 높은 미생물 활동도를 나타낸다(Papendick과 Campbell, 1981). 실내실험에서는 미생물 활동에 최적인 함수비 조건에서 토양호흡율이 최대인 것으로 보고되었으며, 다양한 현장연구 사례에서는 함수비가 최소이거나 최대인 경우에는 토양에서 이산화탄소 방출이 극히 제한됨을 보였다(Bowden 등, 1993, 1998; Liu 등, 2002; Xu 등, 2004).

연구지역 내 3개 부지별 평균 pH는 갯벌 8.08, 논 6.72 및 산림 5.62로 나타났으며, 3개 부지의 관측지점별 pH 값의 편차는 낮았다. 토양에서 박테리아는 pH 4~9, 균류(fungi)는 pH 4~6 범위에서 성장한다(Glinski와 Lipiec, 1990). 본 연구지역 내 3개 부지 모두에서 박테리아의 성장은 가능하지만, 균류는

산림 부지에서만 존재할 것으로 판단된다. Kowalenko 등(1978)은 pH 7 이하의 토양에서는 pH가 증가할수록 이산화탄소의 생산량(방출량)이 많아지고, pH 7 이상의 토양에서는 pH가 증가할수록 이산화탄소의 생산량이 적어지는 것으로 보고하였다. 본 연구지역의 논과 산림 부지에서는 pH에 따라 이산화탄소 방출량이 증가할 것이고, 갯벌 부지에서는 반대의 경향을 나타낼 것으로 사료된다.

연구지역에서 3개 부지별 토양시료 내 평균유기탄소량은 갯벌 1.04%, 논 1.81%, 산림 4.14%로 분석되어 산림 부지에서의 유기탄소량이 가장 높게 나타났다. 산림 부지에서는 낙엽 등이 토양화되면서 많은 유기물질이 토양 내에 축적되었기 때문이다. 국내에서 조사된 갯벌 퇴적물 내 유기탄소량은 동해안 영일만 지역에서 평균 1.00%(이 등, 2004)와 0.73%(엄 등, 2003) 정도인 것으로 나타났다. 본 연구지역의 갯벌 부지 내 평균유기탄소량은 1.04%로서 동해안 갯벌에 비해서는 약간 높은 함량을 보였다. 일반 토양의 실트와 점토 함량이 높을수록 토양유기탄소량이 증가하게 된다(Mendham 등, 2002). 다른 조건들이 동일하다면, 토양유기탄소량이 많을수록 미생물 활동에 의한 토양에서 대기로의 이산화탄소 호흡율이 선형적으로 증가하게 된다(Franzluebbers 등, 2001).

**Table 2.** CO<sub>2</sub> concentration of chamber monitored at the ecosystems (unit: ppm)

Measured No.		1st time	2nd time	Point average	Site average
Wetland	W3	369	378	374	370
	W7	374	367	371	
	W13	365	367	366	
	W17	358	372	365	
	W23	382	377	380	
	W27	352	377	365	
Paddy	P1	370	382	376	370
	P2	373	364	369	
	P3	366	364	365	
Forest	F1	390	389	390	385
	F2	380	384	382	
	F3	388	379	384	

**Table 3.** Soil respiration rate monitored at the ecosystems (unit: mg/m<sup>2</sup>/hr)

Measured No.		1st time	2nd time	Point average	Site average
Wetland	W3	-16	7	-4	-8
	W7	-13	-38	-25	
	W13	-73	12	-30	
	W17	29	11	20	
	W23	19	44	31	
	W27	-48	-31	-39	
Paddy	P1	-5	-35	-20	-25
	P2	-14	-74	-44	
	P3	-47	24	-12	
Forest	F1	-	106	106	38
	F2	38	62	50	
	F3	-30	-55	-42	

**3.2. 토양호흡**

본 연구에 이용된 토양호흡관측시스템에서는 토양 호흡을 관측 시 챔버 내 이산화탄소 농도가 측정된다. 챔버 내 이산화탄소 농도는 120초 동안 27회 반복 측정되며, 각각의 관측지점에서 2회씩 수행되었다. 동일 지점에서 12회 관측된 이산화탄소의 평균농도와 관측 지점 및 부지별 평균농도가 Table 2에 정리되어 있다. 연안 갯벌에서 이산화탄소 농도의 범위는 352~382 ppm, 지점별 평균은 365~380 ppm, 부지 전체의 평균은 370 ppm으로 나타났다. 논 부지에서 이산화탄소 농도의 범위는 364~382 ppm, 지점별 평균은 365~376 ppm, 부지 전체의 평균은 370 ppm으로 나타났다. 산림 부지에서 이산화탄소 농도의 범위는 379~390 ppm, 지점별 평균은 382~390 ppm, 부지 전체의

평균은 385 ppm으로서 3개 부지 중에서 가장 높게 나타났다. 연안 갯벌과 논 부지의 이산화탄소 농도는 유사하였으며, 산림 부지에서는 이산화탄소의 평균농도가 15 ppm 정도 높은 것으로 나타났다. 이는 산림 부지에서 나무뿌리에 의한 토양호흡과 토양 표면에 쌓여있는 낙엽 등에 의한 이산화탄소의 방출에 의한 것이다(Luo 와 Xhou, 2006).

연구지역 내 갯벌, 논 및 산림 부지에서 측정된 관측지점 및 시기별 이산화탄소의 토양호흡율이 Table 3에 정리되어 있다. 갯벌에서 토양호흡율의 범위는 -73~44 mg/m<sup>2</sup>/hr, 평균은 -8 mg/m<sup>2</sup>/hr로 나타나 대기 중 이산화탄소가 갯벌로 흡수되고 있다. 측정시기가 겨울이어서 토양 및 대기의 온도가 매우 낮았으며, 이로 인해 갯벌 내에서 미생물과 동물 플랑크톤의 활

동이 감소하여 호흡에 의한 이산화탄소 발생량이 적었기 때문이다. 논 부지에서 이산화탄소 토양호흡율의 범위는  $-74 \sim 24 \text{ mg/m}^2/\text{hr}$ , 평균은  $-25 \text{ mg/m}^2/\text{hr}$ 로 나타났다. 논 또한 이산화탄소가 대기에서 토양으로 흡수되고 있으며, 이러한 원인은 갯벌과 동일한 기작에 의한 것이다. 산림 부지에서 이산화탄소의 토양호흡율은  $-55 \sim 106 \text{ mg/m}^2/\text{hr}$ , 평균은  $38 \text{ mg/m}^2/\text{hr}$ 로 나타났다. 산림 부지의 F1 지점에서의 첫 번째 측정된 토양호흡율은 관측 오차로 판단되어 분석에서 제외시켰다. 산림 부지에서는 평균적으로 토양에서 대기로의 이산화탄소 방출이 발생하고 있으며, 이는 산림의 뿌리호흡(root respiration)에 의한 요인과 토양 표면에 쌓여있는 낙엽을 분해하는 미생물의 활동에 의한 요인에 의한 것이다. 그리고, 산림 부지 내 F3 지점에서 이산화탄소의 토양호흡율이  $-42 \text{ mg/m}^2/\text{hr}$ 로 나타난 것은 측정 지점의 표면에 낙엽 등이 존재하지 않았으며 주변에 나무가 없었기 때문이다.

#### 4. 고찰

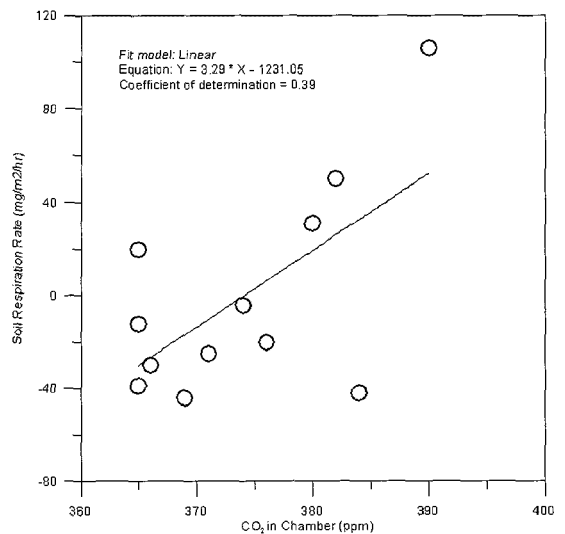
본 연구지역의 갯벌, 논 및 산림 부지에서 측정된 이산화탄소 농도와 토양호흡율에 영향을 미치는 토양의 이화학적 성질을 분석하기 위해 상관계수를 산출하였다(Table 4). 챔버 내 이산화탄소 농도와 토양호흡율은 정의 상관성을 가지고 0.62 정도의 상관계수를 가지는 것으로 나타났다. 기존의 연구 결과에서도 토양에서 이산화탄소의 방출이 많을수록 챔버 내 이산화탄소 농도가 증가하고, 이로 인해 토양호흡율이 높게 산출된다. 챔버 내 이산화탄소 농도는 토양 온도와 유기탄소량(SOC)과의 상관계수가 0.76과 0.74로서 높게 나타났으며, 토양호흡율과의 상관계수는 0.41과 0.48로서 정의 상관성을 가지는 것으로 나타났다. 토양유기탄소량이 많을수록 미생물 활동에 의한 이산화탄소의 토양호흡율이 선형적으로 증가하게 된다(Franzluebbers 등, 2001). 챔버 내 이산화탄소 농도와 토양 pH 간의 상관계수는  $-0.66$ 으로서 음의 상관성을 나타내었으며, 토양호흡율과는  $-0.23$ 으로서 낮지만 음의 상관성을 보였다. 토양 표면으로부터 10cm 이내에서는 이산화탄소 방출 량과 pH 값의 관계는 음의 선형성을 가진다(Xu와 Qi, 2001).

**Table 4.** Correlation coefficients between soil respiration and physicochemical properties

	CO <sub>2</sub> in chamber (ppm)	Soil respiration rate (mg/m <sup>2</sup> /hr)
CO <sub>2</sub> in chamber (ppm)	-	-
Soil respiration rate (mg/m <sup>2</sup> /hr)	<b>0.62</b>	-
Air temperature (°C)	-0.17	-0.40
Soil temperature (°C)	<b>0.76</b>	<b>0.41</b>
Moisture (%)	-0.50	-0.29
Soil pH	<b>-0.66</b>	-0.23
Soil organic carbon (%)	<b>0.74</b>	<b>0.48</b>

연구지역에서 관측된 챔버 내 이산화탄소 농도에 대한 토양호흡율의 함수를 추정하였으며, 또한 토양호흡율과 토양 온도, 함수비, pH 및 유기탄소량의 함수적인 관계에 산출하였다. 챔버 내 이산화탄소 농도에 따른 토양호흡율은 선형함수의 관계에서 기울기는 3.29로 나타났으며, 원 자료와 회귀직선 간의 결정계수는 0.39 정도이었다(Fig. 2).

토양온도에 대한 토양호흡율 함수는 토양으로부터 이산화탄소의 방출(emission)과 흡수(uptake) 조건으로 자료군으로 분류하여 각각의 회귀분석을 수행하였다. 토양에서 이산화탄소의 방출 조건에서는 토양은



**Fig. 2.** Regression function of soil respiration rate as CO<sub>2</sub> concentration in chamber.

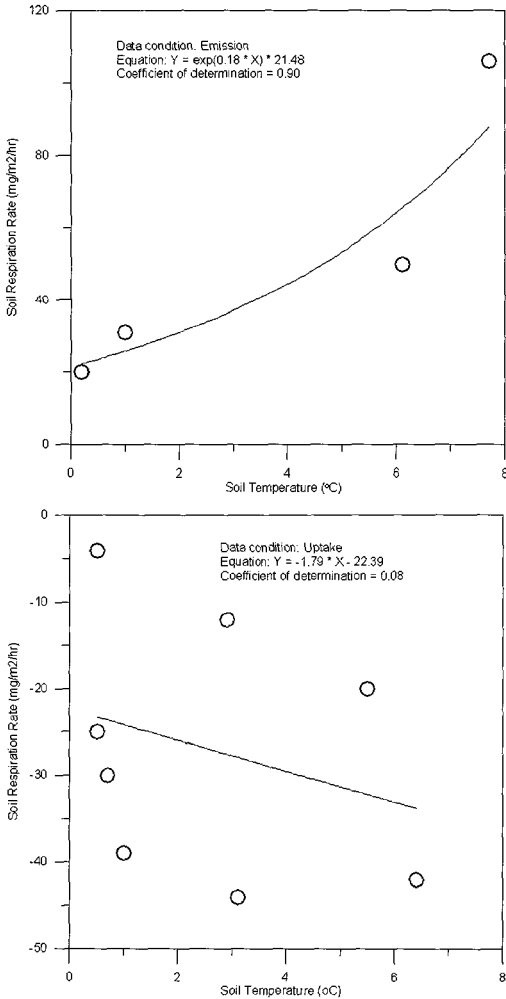


Fig. 3. Regression functions of soil respiration rate as soil temperature.

도에 의한 호흡율이 지수형(exponential)으로 증가하는 함수가 가장 적합함( $R^2=0.90$ ) 것으로 추정되었으며, 이산화탄소 흡수 조건에서 추정된 직선함수의 결정계수는 0.08 정도로서 매우 낮았으나 토양온도의 상승에 따른 호흡율이 감소하는 경향은 뚜렷하게 나타났다(Fig. 3). 생태계의 이산화탄소 방출 조건에서 토양온도에 따른 호흡율의 지수형으로 증가하는 함수로 보고된 바 있으며(Lloyd와 Taylor, 1994), 본 연구에서도 유사한 결과를 나타내었다.

토양 함수비 대 호흡율 함수는 갯벌, 논, 산림 부지의 자료군으로 분류하여 회귀분석을 수행하였다(Fig. 4). 갯벌, 논, 산림 부지에서 모두 선형함수가 가장 적합하였으며, 추정된 선형회귀함수와의 결정계수는 갯벌에서 낮았으며 산림 자료에서 0.99로서 매우 높았다. 논과 산림 부지의 함수비는 25% 이하로서 낮았으며, 이러한 조건에서는 함수비의 증가에 따라 호흡율이 급격하게 증가하게 된다(Liu 등, 2002; Xu 등, 2004). 본 연구지역의 갯벌 부지에서는 60% 이상의 함수비를 보였으며, 이러한 조건은 혐기성(anaerobic)에 가까우며 미생물의 활동도가 호기성(aerobic) 조건에 비해 약화되므로 함수비가 증가할수록 호흡율은 감소하게 된다(Papendick과 Campbell, 1981). 따라서, 갯벌 자료에서 추정된 선형회귀함수의 기울기는 -0.67 정도로서 토양 함수비의 증가에 따라 호흡율이 감소하는 경향을 나타내었다. 토양의 함수비가 매우 낮고 유기탄소량이 높은 산림 부지에서 함수비의 변화는 미생물 활동에 지배적인 요인이 될 것이며, 이로 인해 미생물의 유기물 분해가 활발하여 이산화탄소의 방출량이

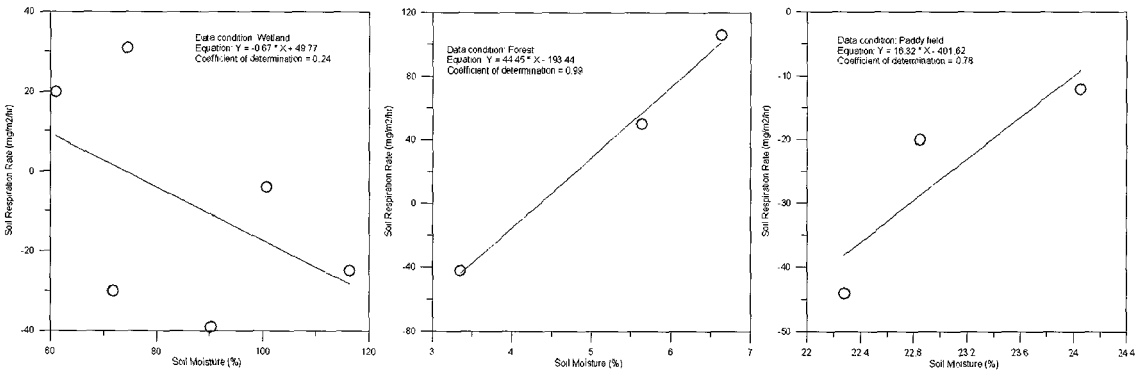


Fig. 4. Regression functions of soil respiration rate as soil moisture.

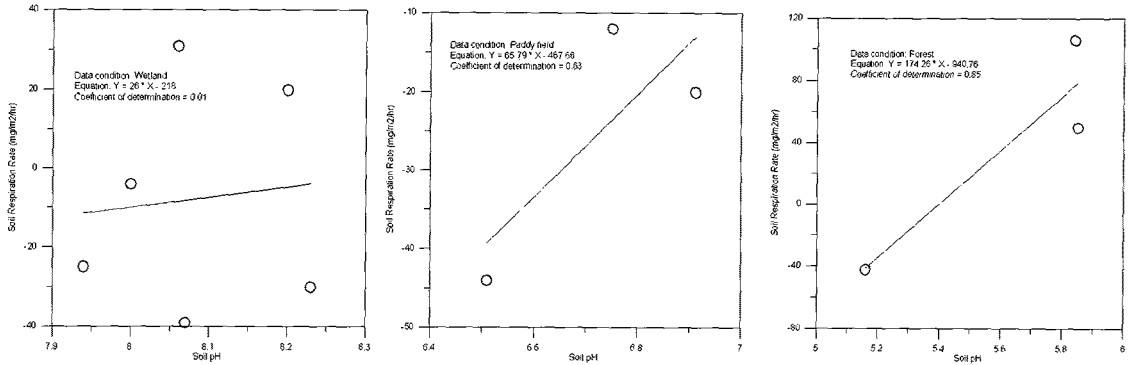


Fig. 5. Regression functions of soil respiration rate as soil pH.

급격하게 증가하게 된다. 논과 산림 부지 자료의 선형 회귀함수 기울기는 각각 16.32와 44.45 정도이었으며, 이는 동일한 함수비의 변화 조건에서 토양유기탄소량이 많은 산림 부지의 호흡율이 2.5배 이상 높음을 의미한다.

토양 pH에 따른 호흡율 함수는 갯벌, 논, 산림 부지별 자료군을 이용하여 회귀분석을 수행하였다(Fig. 5). 갯벌 부지에서는 6개 지점 모두 pH 7을 초과하였으며, 논과 산림 부지에서는 pH 7 미만이었다(Table 1 참조). Kowalenko 등(1978)은 일반적으로 토양 pH가 7 이하인 조건에서는 pH에 따라 토양의 이산화탄소 생산량이 증가하고, pH 7 이상인 조건에서는 pH가 높아지면 이산화탄소 생산량이 감소한다고 보고하였다. 본 연구에서도 pH가 낮은 산림 부지에서 pH 변화에 따른 토양호흡율의 변화폭이 가장 높게 나타났으며, 이는 pH 변화에 따른 토양의 이산화탄소 생산량이 크게 증가하였음을 의미한다.

토양유기탄소(SOC) 대 호흡율 함수는 토양에서 이산화탄소의 방출과 흡수 조건으로 분류된 자료군에 대해 회귀분석을 수행하였다. 이산화탄소 방출 조건의 자료에서는 토양유기탄소가 많을수록 이산화탄소 발생량이 증가하는 것으로 나타났으며, 흡수 조건에서는 토양유기탄소량이 많을수록 이산화탄소 흡수량이 증가하였다(Fig. 6). 토양유기탄소에 따른 토양의 이산화탄소 발생량은 선형적으로 증가함은 Franzluebbers 등(2001)에 의해 보고되었다. 본 연구지역에서 이산화탄소의 흡수 조건에서 토양유기탄소에 따른 흡수량의 증가 기작(mechanism)은 명확하게 설명하기는 힘든

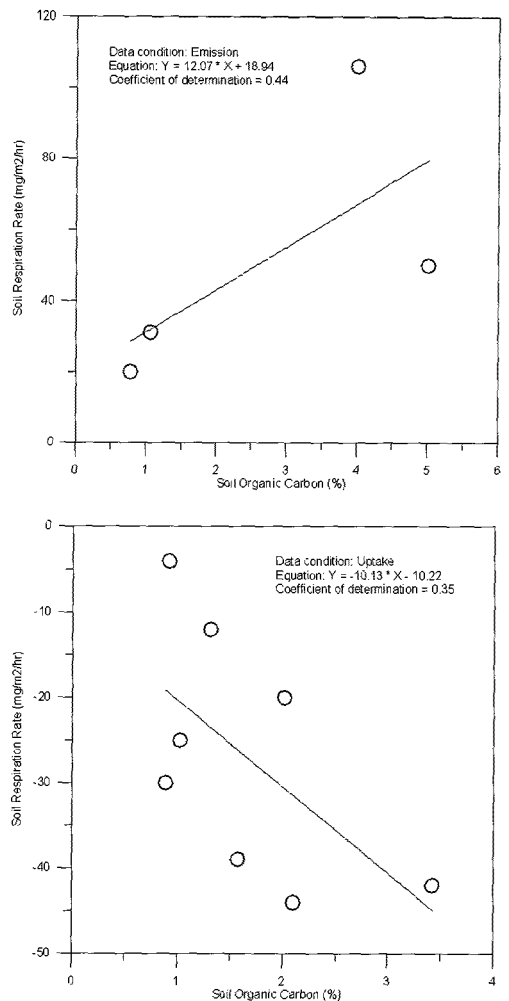


Fig. 6. Regression functions of soil respiration rate as soil organic carbon.



부분이지만, 대기에서 토양으로 이산화탄소의 흡수량이 증가하면 토양유기탄소량이 많아지는 것은 명백하다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 순천시 해룡면 농주리 일대의 연안 생태계의 갯벌, 논 및 산림 부지에서 토양의 이화학적 성질과 이산화탄소 호흡율을 분석하였으며, 아래와 같은 결론들이 도출되었다.

1) 본 연구지역의 갯벌, 논 및 산림 부지에서 토양의 평균온도는 0.6℃, 3.8℃ 및 6.7℃ 이었으며, 갯벌과 논에서는 대기의 평균온도에 비해 2℃ 이상 높았으며 산림 부지에서는 낙엽 등에 의한 보온효과로 인해 8℃ 이상의 차이로 보였다. 갯벌 부지의 평균 함수비는 85.73%로서 높았으며, 논과 산림 부지에서는 23.06%와 5.21%로서 낮았다. 토양 pH의 평균값은 갯벌 8.08, 논 6.72, 산림 5.62로 나타났으며, 3개 부지 각각의 관측지점별 pH 값의 편차는 낮았다. 유기탄소량의 평균값은 갯벌 1.04%, 논 1.81%, 산림 4.14%로서 산림 부지에서는 낙엽 등이 토양화 되면서 많은 유기물질이 토양 내에 축적되어 높게 나타났다.

2) 갯벌에서 측정된 챔버 내 이산화탄소 농도와 호흡율의 평균은 370 ppm과 -8 mg/m<sup>2</sup>/hr, 논에서 그 평균이 370 ppm과 -25 mg/m<sup>2</sup>/hr, 산림에서는 그 평균이 385 ppm과 38 mg/m<sup>2</sup>/hr 정도이었다. 갯벌과 논에 비해 산림에서의 챔버 내 이산화탄소 평균농도는 15 ppm 정도 높았으며, 갯벌과 논은 토양에서 이산화탄소를 흡수하지만 산림에서는 방출하고 있는 것으로 나타났다. 이는 산림의 뿌리호흡과 토양 표면에 쌓여 있는 낙엽을 분해하는 미생물의 활동에 의한 것이다.

3) 갯벌, 논 및 산림 부지에서 측정된 챔버 내 이산화탄소 농도와 토양호흡율은 정의 상관성을 가지고 0.62 정도의 상관계수를 가지는 것으로 나타났다. 토양 온도와 유기탄소에 대한 챔버 내 이산화탄소 농도의 상관계수는 0.76과 0.74로서 높게 나타났으며, 토양호흡율과의 상관계수는 0.41과 0.48로서 상대적으로 낮았다. 토양 pH에 대한 챔버 내 이산화탄소 농도의 상관계수는 -0.66, 토양호흡율과는 -0.23으로서 음의 관계를 나타내었다. 본 연구지역의 생태계에서

토양 표면의 이산화탄소 농도는 토양온도와 토양유기탄소에 의해 높은 영향성을 보였으며, 토양 함수비와 pH에 의한 영향성은 상대적으로 낮았다.

4) 토양의 이화학적 성질들(온도, 함수비, pH, SOC)에 대한 이산화탄소 호흡을 함수를 산정하기 위해, 토양온도와 SOC 자료는 이산화탄소의 방출과 흡수 조건으로 자료군을 분류하였으며 토양 pH와 함수비는 갯벌, 논, 산림 부지의 자료군으로 분류하여 회귀 분석을 수행하였다. 토양온도에 대한 이산화탄소 호흡을 함수는 방출 조건에서는 지수형으로, 흡수 조건에서는 선형 함수로 나타났다. 따라서 본 연구지역의 생태계에서는 토양온도 상승에 따른 이산화탄소의 방출율은 지수적으로 증가하지만, 흡수율은 선형적으로 증가함을 보였다. 토양유기탄소 대 이산화탄소 호흡율은 방출과 흡수 조건 모두에서 선형함수로 추정되었으며, 두 경우 모두의 기울기는 유사하게 나타났다. 토양 함수비 대 이산화탄소 호흡을 함수는 갯벌, 논, 산림 부지에서 모두 선형함수가 가장 적합하였으며, 추정된 선형회귀함수와의 결정계수는 갯벌에서 낮았으며 산림 자료에서 0.99로서 매우 높았다. 논과 산림 부지의 함수비는 25% 이하로서 낮아 함수비에 따른 호흡율의 증가가 급격하였으며, 갯벌 부지에서는 60% 이상의 함수비로서 미생물의 활동도가 호기성 조건에 비해 약화되므로 함수비가 증가할수록 호흡율은 감소하였다. 갯벌 부지에서는 pH 7을 초과하였으며, 논과 산림 부지에서는 pH 7 미만인 조건이었기에, 갯벌에서는 pH에 따른 이산화탄소 생산량이 감소하고 논과 산림에서는 pH에 따른 이산화탄소 생산량이 증가하게 된다. 본 연구지역의 생태계에서도 산림 부지에서 pH에 따른 토양호흡율의 변화(선형회귀함수의 기울기)가 174.26으로 가장 높았으며, 이는 pH 변화에 따른 토양의 이산화탄소 생산량이 크게 증가하고 있음을 의미하는 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 환경부의 "차세대핵심환경기술개발사업 (Eco-technopia 21 project)으로 지원받은 과제입니다. 지원기관에 감사하며, 본 논문의 심사자들에게도 감사드립니다.

## 참고 문헌

- 강동환, 김성수, 권병혁, 김일규, 2008, 고흥만 인공습지의 토양유기탄소와 이산화탄소 변동 관측, 수산해양교육학회지, 20(1), 58-67.
- 김광식, 김용웅, 이명철, 김현우, 1987, 농약이 토양 미생물 상에 미치는 영향에 관한 연구: 1. 살균·살충제가 토양 중의 미생물, 토양 호흡 및 효소활동에 미치는 영향, 한국토양비료학회지, 20(4), 375-385.
- 김득수, 2007, 온실기체(CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O)의 하구언갯벌 배출량과 배출특성연구, 한국대기환경학회지, 23(2), 225-241.
- 노진규, 1979, 살충제  $\gamma$ -BHC가 토양 세균수 및 토양 호흡에 미치는 영향, 석사학위논문, 건국대학교.
- 성은희, 1976, 산림군락의 토양 호흡에 관한 연구, 석사학위논문, 춘천교대.
- 엄인권, 임동일, 이미경, 전수경, 정희수, 2003, 한국 동해안 영일만 표층 퇴적물의 금속 함량과 공간 변화 특성, 한국지구과학회지, 24(5), 477-490.
- 이미경, 배우근, 엄인권, 정희수, (2004) 영일만 해역 표층 퇴적물의 금속 분포 특성, 대한환경공학회지, 26(5), 543-551.
- 이희춘, 홍진규, 조천호, 최병철, 오성남, 김준, 2003, 한국 해남 농경지와 대기간의 에너지와 이산화탄소의 지표 교환, 한국농림기상학회지, 5(2), 61-69.
- 채남이, 김준, 김동길, 이도원, 김래현, 반지연, 손요한, 2003, 폐회로 역학 챔버 시스템을 이용한 토양 이산화탄소 플럭스 관측, 한국농림기상학회지, 5(2), 94-100.
- 채남이, 김래현, 황태희, 서상욱, 이재석, 손요한, 이도원, 김준, 2005, 식물 환경 조절 시스템에서의 토양 호흡 관측 챔버법의 비교 실험, 한국농림기상학회지, 7(1), 107-114.
- 최태진, 김준, 임종환, 2003, 2002년 여름철 경사진 광릉 낙엽 활엽수림에서의 이산화탄소 교환, 한국농림기상학회지, 5(2), 70-80.
- Atkin, O. K., Edwards, E. J., Loveys, B. R., 2000, Response of root respiration to changes in temperature and its relevance to global warming, *New Phytologist*, 147, 141-154.
- Bolin, B., 1983, The carbon cycle, The major biochemical cycles and their interactions, John Wiley & Sons, New York, 41-45.
- Boone, R. D., Nadelhoffer, K. J., Canary, J. D., Kaye, J. P., 1998, Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration, *Nature*, 396, 570-572.
- Bowden, R. D., Nadelhoffer, K. J., Boone, R. D., Melillo, J. M., Garrison, J. B., 1993, Contributions of above-ground litter, belowground litter, and root respiration to total soil respiration in a temperate mixed hardwood forest, *Canadian Journal of Forest Research*, 23, 1402-1407.
- Bowden, R. D., Newkirk, K. M., Rullo, G. M., 1998, Carbon dioxide and methane fluxes by a forest soil under laboratory-controlled moisture and temperature conditions, *Soil Biology and Biochemistry*, 30, 1591-1597.
- Dorr, H., Munnich, K. O., 1987, Annual variation in soil respiration in selected areas of the temperate zone, *Tellus*, 39B, 114-121.
- Fang, C., Smith, P., Moncrieff, J. B., Smith, J. U., 2005, Similar response of labile and resistant soil organic matter pools to changes in temperature, *Nature*, 433, 57-59.
- Field, C. B., Ball, J. T., Berry, J. A., 1989, Photosynthesis, principles and field techniques. In *Plant physiological ecology, field methods and instrumentation* (Percy, R. W., Ehleringer, J., Mooney, H. A., Rundel, P. W. eds.), Chapman and Hall, New York, 209-253.
- Franzluebbers, A. J., Haney, R. L., Honeycutt, C. W., Arshad, M. A., Schomberg, H. H., Hons, F. M., 2001, Climatic influences on active fractions of soil organic matter, *Soil Biology and Biochemistry*, 33(7-9), 1103-1111.
- Giardina, C. P., Ryan, M. G., 2000, Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature, *Nature*, 404, 858-861.
- Glinzki, J., Lipiec, J., 1990, Soil physical conditions and plant roots, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Knorr, W., Prentice, I. C., House, J. I., Holland, E. A., 2005, Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming, *Nature*, 433, 298-301.
- Kowalenko, C. G., Ivarson, K. C., Cameron, D. R., 1978, Effect of moisture content, temperature and nitrogen fertilization on carbon dioxide evolution from field soils, *Soil Biology and Biochemistry*, 10, 417-423.
- Liski, J., Ilversniemi, H., Makela, A., Westman, C. J., 1999, CO<sub>2</sub> emissions from soil in response to climatic warming are overestimated: The decomposition of old soil organic matter is tolerant of temperature, *Ambio*, 28, 171-174.
- Liu, X., Wan, S., Su, B., Hui, d., Luo, Y., 2002, Response of soil CO<sub>2</sub> efflux to water manipulation in a tallgrass prairie ecosystem, *Plant and Soil*, 240, 213-223.
- Lloyd, J., Taylor, J. A., 1994, On the temperature dependence of soil respiration, *Functional Ecology*, 8,

- 315-323.
- Luo, Y., Zhou, X., 2006, Soil respiration and the environment, ELSEVIER, 305.
- Maier, C. A., Kress, L. W., 2000, Soil CO<sub>2</sub> evolution and root respiration in 11 year-old loblolly pine (*Pinus taeda*) plantations as affected by moisture and nutrient availability, *Canadian Journal of Forest Research*, 30(3), 347-359.
- Mendham, D. S., O'Connell, A. M., Grove, T. S., 2002, Organic matter characteristics under native forest, long-term pasture, and recent conversion to Eucalyptus plantations in Western Australia: Microbial biomass, soil respiration, and permanganate oxidation, *Australian Journal of Soil Research*, 40(5), 859-872.
- Palta, J. A., Nobel, P. S., 1989, Root respiration for Agave deserti: Influence of temperature, water status and age on daily patterns, *Journal of Experimental Botany*, 40, 181-186.
- Papendick, R. I., Campbell, G. S., 1981, Theory and measurement of water potential, in Parr, J. F., Gardner, W. R., Elliott, L. F.(eds.), *Water potential relations in soil microbiology*, 1-22, Soil Science Society of America, Special Publication No. 9, Madison, WI.
- Post, W. M., Peng, T. H., Emanuel, W. R., King, A. W., Dale, V. H., DeAngelis, D. L., 1990, The global carbon cycle, *Am. Scientist*, 78, 310-326.
- Pregitzer, K. S., 2003, Woody plants, carbon allocation and fine roots, *New Phytologist*, 158, 421-423.
- Pregitzer, K. S., King, J. S., Burton, A. J., Brown, S. E., 2000, Responses of tree fine roots to temperature, *New Phytologist*, 147, 105-115.
- Schlesinger, W. H., 1986, Changes in soil carbon storage and associated properties with disturbance and recovery, *The changing carbon cycle: A global analysis*, Springer-Verlag, New York, 194-200.
- Sylvia, D. M., Fuhrmann, J., Hartel, P. G., Zuberer, D., 2005, *Principles and applications of soil microbiology*, 2nd Edition, Prentice Hall.
- Xu, L., Baldocchi, D. D., Tan, J., 2004, How soil moisture, rain pulses, and growth alter the response of ecosystem respiration to temperature, *Global Biogeochemical Cycles*, 18, GB4002, Doi: 10.1029/2004GB002281.
- Xu, L., Qi, Y., 2001, Soil-surface CO<sub>2</sub> efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California, *Global Change Biology*, 7, 667-677.