

내륙습지의 임목 지역별 및 측정 지점별 토양 표층과 대기 사이의 이산화탄소 플럭스 비교 분석 : 의령, 창녕, 합천

순샤오광* · 강동환*** · 박진영*** · 김나현*** · 장성간**** · 임정철***** · 김평범*****

*(주)한송에코엠

**부경대학교 지질환경연구소

*** (주)와이블

****부경대학교 지구환경시스템과학부 지구환경과학전공

*****국립생태원 습지복원팀

Comparative analysis of carbon dioxide flux between soil surface layer and atmosphere by forest tree areas and measuring points in inland wetlands : Uiryeong, Changnyeong, Hapcheon

Sun Xiaoguang* · Dong-hwan Kang** · Jinyoung Park*** · Nahyeon Kim*** · Seonggan Jang**** · Jeong-Cheol Lim***** ·
Pyoung-Beom Kim*****

*Hangsong ecom Co. Ltd., Busan 48548, Republic of Korea

**Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

***Wible Co. Ltd., Busan 48548, Republic of Korea

****Major of Earth and Environmental Sciences, Division of Earth Environmental System Sciences, Pukyong National University,
Busan 48513, Republic of Korea

*****Wetland Center, National Institute of Ecology, Gyeongsangnam-do 50303, Republic of Korea

(Received : 17 December 2024, Revised : 22 January 2025, Accepted : 24 January 2025)

요약

본 연구는 경상남도에 위치한 내륙습지의 임목 지역(5개소)에서 수행되었으며, EGM-4 측정기기를 이용하여 이산화탄소 농도와 지온을 측정하고 이산화탄소 플럭스를 산정하였다. 조사 지역별 이산화탄소 플럭스의 평균은 전체 자료에서는 $684 \sim 1676 \text{ mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{hr}^{-1}$, 나무 아래 지점 자료에서는 $867 \sim 1278 \text{ mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{hr}^{-1}$, 나무 사이 지점 자료에서는 $475 \sim 2054 \text{ mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{hr}^{-1}$ 의 범위로 나타났다. 본 연구에서는 내륙습지의 임목 지역별로 이산화탄소 플럭스의 차이가 2배 이상 나타났으며, 또한 나무 아래 지점과 나무 사이 지점에서 측정된 이산화탄소 플럭스의 차이도 크게 나타났다. 본 연구를 통해 다양한 환경을 가진 내륙습지의 임목 지역에서 이산화탄소 플럭스의 시공간적인 관측이 주기적으로 수행되어야 함을 알 수 있었다.

핵심용어 : 내륙습지, 임목, 이산화탄소 플럭스, 탄소 플럭스

† Corresponding author: Dong-hwan Kang, Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 48513, Korea
E-mail : dhkang@pknu.ac.kr

• Sun Xiaoguang Hangsong ecom Co. Ltd., Busan 48548, Republic of Korea

• Dong-hwan Kang Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

• Jinyoung Park Wible Co. Ltd., Busan 48548, Republic of Korea

• Nahyeon Kim Wible Co. Ltd., Busan 48548, Republic of Korea

• Seonggan Jang Major of Earth and Environmental Sciences, Division of Earth Environmental System Sciences, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

• Jeong-Cheol Lim Wetland Center, National Institute of Ecology, Gyeongsangnam-do 50303, Republic of Korea

• Pyoung-Beom Kim Wetland Center, National Institute of Ecology, Gyeongsangnam-do 50303, Republic of Korea



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract

This study was conducted in five forest tree areas of inland wetlands in Gyeongsangnam-do, and carbon dioxide concentration and soil temperature were measured using the EGM-4, and carbon dioxide flux was calculated. The average carbon dioxide flux by study area was $684\sim 1676 \text{ mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{hr}^{-1}$ for the all data, $867\sim 1278 \text{ mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{hr}^{-1}$ for the data under the tree, and $475\sim 2054 \text{ mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{hr}^{-1}$ for the data among the trees. In this study, the difference in carbon dioxide flux by forest tree area of inland wetlands was more than twice, and there was a significant difference in carbon dioxide flux measured under the tree and those measured among the trees. This study suggests that spatio-temporal monitoring of carbon dioxide flux should be performed periodically in forest tree areas of inland wetlands.

Key words : Inland wetland, Forest tree, Carbon dioxide flux, Carbon flux

1. 서론

우리나라 내륙습지(inland wetlands)는 다양한 환경으로 구성되어 있다. 내륙습지는 임목, 초지, 나대지, 하천 등으로 구성되어 있으며, 내륙습지는 식물의 광합성을 통해 대기 중 이산화탄소를 흡수하고(uptake) 토양 내에 저장하는(stock) 역할을 하고 있다. 또한, 내륙습지에서는 식물의 뿌리 호흡(root respiration)과 토양 표층의 산화로 인해 대기로 이산화탄소가 방출되기도 한다. 내륙습지에서의 탄소 저장 효과에 관한 정량적인 연구를 위해서는 흡수/저장되는 탄소와 방출되는(emission) 탄소를 관측하여 순 탄소 저장량(net carbon stock)을 산정하는 것이 필요하다.

우리나라 자연환경에서 폐쇄형 역학 챔버 시스템(closed dynamic chamber system)을 이용한 이산화탄소 흡수 및 방출에 관한 연구는 연안습지(식생, 비식생 환경)와 초지, 임목 지역 등에서 수행되었다. 우리나라 갯벌에서 수행된 이산화탄소 플럭스 관련 연구로는 순천만 연안 생태계에서 토양의 이화학적 성질에 따른 이산화탄소 플럭스의 특성을 분석하였으며(Kang et al., 2010), 순천만 지역의 갯벌, 논, 산림을 대상으로 이산화탄소 플럭스를 측정하고 토지 이용 용도별 이산화탄소 플럭스를 비교하였으며(Kang et al., 2011), 무안 갯벌을 대상으로 식생 및 비식생 지역에서 계절 및 지온에 의한 이산화탄소 플럭스 변동을 연구하였다(So et al., 2019). 우리나라 초지에서 수행된 이산화탄소 플럭스 관련 연구로는 잔디밭에서 24절기 별로 관측된 자료를 이용하여 계절 변화에 따른 이산화탄소 플럭스 변동 특성을 연구하였으며(Kim et al., 2014), 잔디밭에서 지온 변화에 따른 이산화탄소 플럭스의 민감도(Q_{10})를 산정하여 계절 변동 특성을 연구하였다(Kang et al., 2019). 우리나라 임목 지역에서 폐쇄형 역학 챔버 시스템(EGM-4)을 이용한 이산화탄소 플럭스 관측은 소수의 연구자에 의해 수행되었다. 광릉숲의 전나무와 참나무 군락에서 2년(2005~2006년) 동안 월별로 토양 표층과 대기 사이의 이산화탄소 플럭스를 관측하였으며, 임목 종류별 및 계절별 이산화탄소 플럭스 변동을 분석하였다(Lee et al., 2010). 광릉숲의 소나무 군락에서도 2년(2007~2008년) 동안 월별로 토양 표층과 대기 사이의 이산화탄소 플럭스를 관측하였으며, 소나무 군락의 임목 밀도(높은 밀도(938그루), 중간 밀도(600그루), 낮은 밀도(375그루))에 따른 이산화탄소 플럭스의 변동을 분석하였

다(Noh et al., 2010). 청주와 여수 지역에서 임목 유형별로 이산화탄소 플럭스의 월별 변화를 관측하였으며, 자연림(natural forest)과 인공림(artificial plantation)에서 EGM-4로 측정된 이산화탄소 플럭스를 이용하여 NEP(net ecosystem productivity)를 산정하였다(Kim et al., 2022). 현재까지 우리나라의 다양한 생태계(연안습지, 논, 임목(산림), 초지 등)에서 토양 표층과 대기 사이의 이산화탄소 플럭스를 관측하였지만, 내륙습지의 임목 지역에서 토양 표층과 대기 사이의 이산화탄소 플럭스를 측정된 연구는 수행된 바가 없다.

본 연구에서는 경상남도의 내륙습지 5개 지역에서 토양 표층과 대기 사이의 이산화탄소 농도를 측정하여 이산화탄소 플럭스를 산정하였으며, 또한 이산화탄소 플럭스를 이용하여 탄소 플럭스를 환산하였다. 이산화탄소 플럭스와 탄소 플럭스를 이용하여 내륙습지 조사 지역별 및 측정 지점별(나무 아래, 나무 사이) 이산화탄소 방출량을 비교하고 분석하였다.

2. 연구 방법

본 조사 지역은 경상남도 의령군 용덕면 소상리 35-1(이하 "UR1"로 표기), 경상남도 의령군 의령읍 만천리 889(이하 "UR2"로 표기), 경상남도 창녕군 유어면 가항리 307(이하 "CN1"로 표기), 경상남도 창녕군 유어면 가항리 221-1(이하 "CN2"로 표기), 경상남도 합천군 청덕면 가현리 20(이하 "HC1"로 표기)에 소재한 내륙습지의 임목 지역에서 수행되었다(Table 1). UR1 지역의 평균 고도는 7 m, 면적은 0.04 km^2 정도이고, 임목은 버드나무 60%, 왕버들 나무 40% 정도로 구성되어 있다. UR2 지역의 평균 고도는 7 m, 면적은 0.01 km^2 정도이고, 임목은 버드나무 20%, 왕버들 나무 80% 정도로 구성되어 있다. CN1 지역의 평균 고도는 12 m, 면적은 0.014 km^2 정도이고, 임목은 대부분 왕버들 나무로 구성되어 있다. CN2 지역의 평균 고도는 12 m, 면적은 0.02 km^2 정도이고, 임목은 대부분 왕버들 나무로 구성되어 있다. HP1 지역의 평균 고도는 10 m, 면적은 0.05 km^2 정도이고, 임목은 버드나무 40%, 왕버들 나무 60% 정도로 구성되어 있다.

현장 조사는 5개 지역에서 2024년 9월 26~27일 동안 각각 1회 수행되었으며, EGM-4 측정기기를 이용하여 이산화탄소 농도와 지온을 측정하였다. 조사 지역별로 3~7개 지점에서 측정하였으며, 동일 지역에서는 나무뿌리 호흡에 의한 이산화탄

소 방출 효과를 고려하기 위해 나무 아래 지점(under the tree) 및 나무 사이 지점(among the tree)의 토양 표층에서 각각 측정하였다. 동일 측정 지점에서는 측정 시에 발생하는 이상치를 제거하기 위해 1~3회 반복 측정하였다.

EGM-4는 폐쇄형 역학 챔버 시스템으로서 챔버를 토양 표층에 고정하고 시간별 이산화탄소 농도를 측정하여 토양과 대기 사이의 이산화탄소 플럭스를 산정한다(Kang et al., 2010; Kang et al., 2011; Park et al., 2023). 이 시스템은 본체(EGM-4)와 챔버(SRC-1) 및 토양온도센서(STP-1)로 구성되어 있다. 본체는 Environmental Gas Monitor (EGM-4, PP systems)이며, 본체에는 이산화탄소 측정용 적외선가스 분석기(infrared gas analyzer; IRGA)가 탑재되어 있다. 토양 온도 측정 센서는 Soil temperature probe (STP-1)이다. 이산화탄소의 측정은 적외선 기체 분석법을 이용하며, 마이크로프로세서의 제어를 통해 측정하므로 측정의 정확도가 높다. 또한, 주기적으로 자동 영점(auto-zeroing) 보정을 수행하여 최적의 상태를 유지한다. 폐쇄형 역학 챔버법은 측정이 용이하고 측정 시간이 짧아 토양 표층과 대기 사이의 이산화탄소 플럭스의 직접적인 관측에 있어서 가장 널리 이용되는 방법이다(Luo et al., 2006). 토양 표층과 대기 사이의 이산화탄소 플럭스는 아래의 식 (1)과 같이 챔버 내에서 시간에 따른 이산화탄소 농도의 변화율(slope)을 이용하여 산정하고(Field et al., 1989), 이산화탄소 플럭스의 값이 음(-)이면 대기에서 토양 표층으로의 흡수(uptake)를, 양(+)이면 토양 표층에서 대기로의 방출(emission)을 의미한다.

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

여기서, F 는 이산화탄소 플럭스 [$ML^{-2}T^{-1}$], C_i 는 챔버 내 이산화탄소 초기 농도 [ML^{-3}], C_t 는 Δt 시간 경과 후의 챔버 내 이산화탄소 농도 [ML^{-3}], V 는 챔버의 체적 [L^3], Δt 는 측정 시간 간격 [T], A 는 챔버가 설치된 토양 표층의 표면적 [L^2] 이다.

내륙습지 임목 지역의 토양 표층과 대기 사이의 탄소 흡수/방출을 정량적으로 분석하기 위해 이산화탄소 플럭스, 탄소 원

자질량(C: 12), 산소의 원자질량(O: 16), 이산화탄소의 분자 질량(CO₂: 44)을 이용하여 탄소 플럭스를 환산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 조사 지역별 이산화탄소 농도와 플럭스

본 연구에서 조사된 임목 지역에서의 지온은 22~24°C의 범위로서 조사 지점별 지온의 차이는 크지 않았다. 조사 지역별 이산화탄소 농도의 기술통계량을 산정하였다(Table 2). UR1 지역에서 측정된 이산화탄소 농도의 평균은 499 ppm, 범위는 446~571 ppm으로 나타났다. UR2 지역에서 측정된 이산화탄소 농도의 평균은 480 ppm, 범위는 446~587 ppm으로 나타났다. CN1 지역에서 측정된 이산화탄소 농도의 평균은 537 ppm, 범위는 475~606 ppm으로 나타났다. CN2 지역에서 측정된 이산화탄소 농도의 평균은 500 ppm, 범위는 496~505 ppm으로 나타났다. HC1 지역에서 측정된 이산화탄소 농도의 평균은 465 ppm, 범위는 420~503 ppm으로 나타났다. 이산화탄소 농도의 조사 지역별 표준편차는 5~60 ppm의 범위이었으며, CN2 지역에서 가장 낮았으며 UR2 지역에서 가장 높았다. CN2 지역을 제외한 4개 지역에서의 이산화탄소 농도의 표준편차가 40 ppm 이상으로서 조사 지역별 평균값의 10% 정도이었으며, 동일 지역에서도 측정 지점 사이의 공간적인 불균질성이 높음을 알 수 있었다.

조사 지역별 이산화탄소 플럭스의 기술통계량을 산정하였다(Table 3). UR1 지역에서 조사된 이산화탄소 플럭스의 평균은 전체 자료에서는 894 mgCO₂m⁻²hr⁻¹, 나무 아래 지점 자료에서는 1278 mgCO₂m⁻²hr⁻¹, 나무 사이 지점 자료에서는 606 mgCO₂m⁻²hr⁻¹이었으며, 이산화탄소 플럭스의 범위는 504~1618 mgCO₂m⁻²hr⁻¹로 나타났다. UR2 지역에서 조사된 이산화탄소 플럭스의 평균은 전체 자료에서는 684 mgCO₂m⁻²hr⁻¹, 나무 아래 지점 자료에서는 998 mgCO₂m⁻²hr⁻¹, 나무 사이 지점 자료에서는 475 mgCO₂m⁻²hr⁻¹이었으며, 이산화탄소 플럭스의 범위는 349~1076 mgCO₂m⁻²hr⁻¹로 나타났다. CN1 지역에서 조사된 이산화탄소 플럭스의 평균은 전체 자료에서는 804 mgCO₂m⁻²hr⁻¹, 나무 아래 지점 자료에서는 945 mgCO₂m⁻²hr⁻¹, 나무 사이 지점 자료에서는 664 mgCO₂m⁻²hr⁻¹이었으며, 이

Table 1. Overview of observation site

ID	Altitude (m)	Area (km ²)	Forest trees	Adress
UR1	7	0.04	Salix koreensis Andersson (60%) Salix chaenomeloides Kimura (40%)	35-1 Sosang-ri, Yongdeok-myeon, Uiryeong-gun, Gyeongsangnam-do
UR2	7	0.01	Salix chaenomeloides Kimura (80%) Salix koreensis Andersson (20%)	889 Mancheon-ri, Uiryeong-eup, Uiryeong-gun, Gyeongsangnam-do
CN1	12	0.014	Salix chaenomeloides Kimura	307 Gahang-ri, Yueo-myeon, Changnyeong-gun, Gyeongsangnam-do
CN2	12	0.02	Salix chaenomeloides Kimura	221-1 Gahang-ri, Yueo-myeon, Changnyeong-gun, Gyeongsangnam-do
HC1	10	0.05	Salix chaenomeloides Kimura (60%) Salix koreensis Andersson (40%)	20 Ga-hyeon-ri, Cheongdeok-myeon, Hapcheon-gun, Gyeongsangnam-do

산화탄소 플럭스의 범위는 589~956 mgCO₂m⁻²hr⁻¹로 나타났다. CN2 지역에서 조사된 이산화탄소 플럭스의 평균은 전체 자료에서는 815 mgCO₂m⁻²hr⁻¹, 나무 아래 지점 자료에서는 867 mgCO₂m⁻²hr⁻¹, 나무 사이 지점 자료에서는 711 mgCO₂m⁻²hr⁻¹이었으며, 이산화탄소 플럭스의 범위는 654~1080 mgCO₂m⁻²hr⁻¹로 나타났다. HC1 지역에서 조사된 이산화탄소 플럭스의 평균은 전체 자료에서는 1676 mgCO₂m⁻²hr⁻¹, 나무 아래 지점 자료에서는 920 mgCO₂m⁻²hr⁻¹, 나무 사이 지점 자료에서는 2054 mgCO₂m⁻²hr⁻¹이었으며, 이산화탄소 플럭스의 범위는 920~2676 mgCO₂m⁻²hr⁻¹로 나타났다. 이산화탄소 플럭스의 조사 지역별 표준편차는 174~903 mgCO₂m⁻²hr⁻¹의 범위로 나타났으며, CN1 지역에서 가장 낮았으며 HC1 지역에서 가장 높았다. 이산화탄소 플럭스의 표준편차는 조사 지역별 평균 이산화탄소 플럭스의 20~50% 이상으로서 높게 나타났으며, 이는 모든 조사 지역에서 이산화탄소 플럭스의 공간적인 불균질성이 매우 높음을 의미한다.

3.2. 조사 지역별 탄소 플럭스

조사 지역별 탄소 플럭스의 기술통계량을 산정하였다(Table 4). UR1 지역에서 환산된 탄소 플럭스의 평균은 전체 자료에서는 244 mgCO₂-Cm⁻²hr⁻¹, 나무 아래 지점 자료에서는 349 mgCO₂-Cm⁻²hr⁻¹, 나무 사이 지점 자료에서는 165 mgCO₂-Cm⁻²hr⁻¹이었으며, 탄소 플럭스의 범위는 137~441 mgCO₂-Cm⁻²hr⁻¹로 나타났다. UR2 지역에서 환산된 탄소 플럭스의

평균은 전체 자료에서는 187 mgCO₂-Cm⁻²hr⁻¹, 나무 아래 지점 자료에서는 272 mgCO₂-Cm⁻²hr⁻¹, 나무 사이 지점 자료에서는 130 mgCO₂-Cm⁻²hr⁻¹이었으며, 탄소 플럭스의 범위는 95~293 mgCO₂-Cm⁻²hr⁻¹로 나타났다. CN1 지역에서 환산된 탄소 플럭스의 평균은 전체 자료에서는 219 mgCO₂-Cm⁻²hr⁻¹, 나무 아래 지점 자료에서는 258 mgCO₂-Cm⁻²hr⁻¹, 나무 사이 지점 자료에서는 181 mgCO₂-Cm⁻²hr⁻¹이었으며, 탄소 플럭스의 범위는 161~261 mgCO₂-Cm⁻²hr⁻¹로 나타났다. CN2 지역에서 환산된 탄소 플럭스의 평균은 전체 자료에서는 222 mgCO₂-Cm⁻²hr⁻¹, 나무 아래 지점 자료에서는 236 mgCO₂-Cm⁻²hr⁻¹, 나무 사이 지점 자료에서는 194 mgCO₂-Cm⁻²hr⁻¹이었으며, 탄소 플럭스의 범위는 178~295 mgCO₂-Cm⁻²hr⁻¹로 나타났다. HC1 지역에서 환산된 탄소 플럭스의 평균은 전체 자료에서는 457 mgCO₂-Cm⁻²hr⁻¹, 나무 아래 지점 자료에서는 560 mgCO₂-Cm⁻²hr⁻¹이었으며, 탄소 플럭스의 범위는 251~730 mgCO₂-Cm⁻²hr⁻¹로 나타났다. 탄소 플럭스의 조사 지역별 표준편차는 47~246 mgCO₂-Cm⁻²hr⁻¹의 범위로 나타났으며, CN1 지역에서 가장 낮았으며 HC1 지역에서 가장 높았다.

3.3. 고찰

전체 자료를 이용한 조사 지역별 이산화탄소 플럭스와 탄소 플럭스의 평균은 각각 684~1676 mgCO₂m⁻²hr⁻¹ 및 187~457 mgCO₂-Cm⁻²hr⁻¹의 범위로 나타났으며, UR2 지역에서 가장

Table 2. Descriptive statistics of carbon dioxide concentration by study area (unit: ppm)

Study area	UR1	UR2	CN1	CN2	HC1
Average	499	480	537	500	465
Standard deviation	50	60	54	5	42
Minimum	446	446	475	496	420
Maximum	571	587	606	505	503

Table 3. Descriptive statistics of carbon dioxide flux by study area (unit: mgCO₂m⁻²hr⁻¹)

Study area	UR1	UR2	CN1	CN2	HC1	
All data	894	684	804	815	1676	
Average	Under the tree	1278	998	945	867	920
	Among the trees	606	475	664	711	2054
Standard deviation	415	316	174	231	903	
Minimum	504	349	589	654	920	
Maximum	1618	1076	956	1080	2676	

Table 4. Descriptive statistics of carbon flux by study area (unit: mgCO₂-Cm⁻²hr⁻¹)

Study area	UR1	UR2	CN1	CN2	HC1	
All data	244	187	219	222	457	
Average	Under the tree	349	272	258	236	251
	Among the trees	165	130	181	194	560
Standard deviation	113	86	47	63	246	
Minimum	137	95	161	178	251	
Maximum	441	293	261	295	730	

낮았으며 HC1 지역에서 가장 높았다. 임목 지역에서는 토양 탄소 플럭스가 임목의 나무뿌리 호흡과 토양 유기물 함량 등에 의해 지배적인 영향을 받는다(Boone et al., 1998; Liski et al., 1999; Atkin et al., 2000; Giardina et al., 2000; Maier et al., 2000; Pregitzer et al., 2000; Pregitzer, 2003; Fang et al., 2005; Knorr et al., 2005). 본 연구 결과에서는 임목 지역별로 이산화탄소 방출량이 큰 차이를 보였으며, HC1 지역에서의 이산화탄소 플럭스의 평균이 1600 mgCO₂m⁻²hr⁻¹ 이상이고 나머지 4개 지역에서는 900 mgCO₂m⁻²hr⁻¹ 이하로서 1.8배 이상의 차이를 보였다. 이를 통해 내륙습지의 다양한 환경(임목, 초지, 토양 유기물 등)에 의한 이산화탄소 플럭스의 방출량이 다르게 나타남을 알 수 있었다.

나무 아래 지점에서 조사된 자료만을 이용한 조사 지역별 이산화탄소 플럭스와 탄소 플럭스의 평균은 각각 867~1278 mgCO₂m⁻²hr⁻¹ 및 236~349 mgCO₂-Cm⁻²hr⁻¹의 범위로 나타났다으며, CN2 지역에서 가장 낮았으며 UR1 지역에서 가장 높았다. 나무 사이 지점에서 조사된 자료만을 이용한 조사 지역별 이산화탄소 플럭스와 탄소 플럭스의 평균은 각각 475~2054 mgCO₂m⁻²hr⁻¹ 및 130~560 mgCO₂-Cm⁻²hr⁻¹의 범위로 나타났으며, UR2 지역에서 가장 낮았으며 HC1 지역에서 가장 높았다. HC1 지역을 제외한 모든 지역에서의 이산화탄소 플럭스는 나무 아래 지점이 나무 사이 지점보다 1.2~2.1배 이상 높았으며, 이는 나무 아래 지점에서는 나무뿌리 호흡(root respiration)에 의한 추가적인 이산화탄소 방출이 발생하고 있음을 의미한다(Boone et al., 1998; Maier et al., 2000; Pregitzer, 2003). HC1 지역에서는 나무 사이 지점 중 토양 표층에 낙엽이 많이 쌓여 있으면서 수분이 많은 지점에서 이산화탄소 플럭스가 매우 높았으며, 이는 토양 표층에서 낙엽의 산화(oxidation)로 인해 많은 양의 이산화탄소가 방출되었기 때문이다(Giardina et al., 2000; Pregitzer et al., 2000).

본 연구에서 사용한 측정기기(EGM-4, closed dynamic

chamber system)로 관측하여 산정된 우리나라 임목과 초지에서의 이산화탄소 플럭스 자료와 본 연구의 결과를 비교 분석하였다(Table 5). 본 연구에서는 동일한 시기에 조사하였지만 5개 내륙습지의 임목 지역별 이산화탄소 플럭스 평균의 범위가 684~1676 mgCO₂m⁻²hr⁻¹로서, 그 차이가 2배 이상 나타났다. 기존의 연구들은 동일한 지역에서 1~2년 동안 월별 혹은 절기별로 관측하여 계절별 특성을 분석하였다(Lee et al., 2010; Noh et al., 2010; Kang et al., 2019; Kim et al., 2022). 기존 연구에서 산정된 이산화탄소 플럭스는 최솟값 0 mgCO₂m⁻²hr⁻¹ 이상이였으며, 최댓값은 1495 mgCO₂m⁻²hr⁻¹ 정도로 나타났다. 본 연구의 조사 시기(9월)를 고려한 이산화탄소 플럭스의 조사 지역별 평균의 범위는 광릉, 청주, 여수의 임목 지역에서 조사된 결과의 범위와 유사한 것으로 판단된다(Lee et al., 2010; Noh et al., 2010; Kim et al., 2022). 또한, 임목이 아닌 초지로 구성된 부경대학교 잔디밭에서 1년 동안 24절기 별로 조사된 이산화탄소 플럭스의 평균은 9월에 가장 높았으며, 조사 시기별 이산화탄소 플럭스 평균의 최댓값은 1479 mgCO₂m⁻²hr⁻¹로서 본 연구의 결과보다는 낮게 나타났다(Kang et al., 2019). 본 연구와 기존 연구의 결과에서는 이산화탄소 플럭스가 모두 양(+)의 값으로서 임목과 초지 지역에서 토양 표층에서 대기로의 이산화탄소 방출이 우세한 것으로 나타났다. 우리나라 임목 지역에서는 광합성에 의한 대기 중 이산화탄소 흡수도 활발하지만, 토양 표층에서 대기로의 이산화탄소 방출이 더욱 우세하게 나타나고 있으므로 향후 임목 지역에서의 이산화탄소 관측은 흡수와 방출을 동시에 고려하여 수행해야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 임목 지역의 토양 표층에서 이산화탄소 플럭스를 산정하고 탄소 플럭스를 환산하였으며, 임목 지역별로 나무

Table 5. Case study of carbon dioxide flux calculated using closed dynamic chamber system (EGM-4) in forest tree and grassplot area

Site	Monitoring	Ecosystem	Carbon dioxide flux (mgCO ₂ m ⁻² hr ⁻¹)	Reference
Uiryong Changnyeong Hapcheon	September 2024	Inland wetland (Forest tree)	684~1676	This study
Gwangneung	January 2005 ~ December 2006 (Monthly)	Mountain (Forest tree)	20~1170	Lee et al. (2010)
Gwangneung	December 2006 ~ November 2008 (Monthly)	Mountain (Forest tree)	19.8~1027.9	Noh et al. (2010)
Cheongju Yeosu	August 2010 ~ July 2011 (Monthly)	Mountain (Forest tree)	0~1495 9.5~1375	Kim et al. (2022)
Busan (PKNU)	March 2010 ~ March 2011 (The solar term)	Flatland (Grassplot)	12~1479	Kang et al. (2019)

아래 지점과 나무 사이 지점의 이산화탄소 플럭스를 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 본 연구에서는 내륙습지의 임목 지역별로 이산화탄소 방출량이 큰 차이를 보였으며, 조사 지역별 이산화탄소 플럭스의 평균이 1.8배 이상의 차이를 나타내기도 했다. 이는 내륙습지의 임목 지역에서는 다양한 환경 특성(임목의 수종과 밀도, 초지의 분포 정도, 토양의 종류와 유기물 함량 등)의 영향으로 인해 이산화탄소 방출량이 다르게 나타난 것으로 판단된다.

2) 동일한 내륙습지의 임목 지역에서 나무 아래 지점과 나무 사이 지점의 이산화탄소 플럭스는 5개 지역 중 4개 지역에서 나무 아래 지점이 나무 사이 지점보다 높게 나타났으며, 이는 나무 아래 지점에서는 나무뿌리 호흡에 의한 이산화탄소 방출량이 많았던 것으로 판단된다. 또한 나무 사이 지점 중 토양 표층의 수분과 낙엽이 많은 지점에서는 이산화탄소 플럭스가 매우 높았으며, 이는 토양 표층에서 낙엽의 산화로 인한 이산화탄소 방출량이 많았던 것으로 판단된다.

3) 본 연구의 결과는 기존의 연구 사례에서 산정된 이산화탄소 플럭스와 유사하였으며, 기존 연구에서도 임목 지역의 토양 표층에서 대기로의 이산화탄소 방출이 우세한 것으로 나타났다. 이는 내륙습지의 임목 지역에서는 토양에 저장된 탄소의 산정뿐만 아니라 토양 표층에서 대기로 방출되는 이산화탄소의 양에 관한 지속적인 관측이 필요함을 의미한다. 향후 임목 지역의 토양 표층에서 토양 탄소 저장량과 이산화탄소 방출량을 동시에 관측하여 토양 표층과 대기 사이의 탄소 흡수/방출을 정량화하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

4) 본 연구를 통해 동일한 내륙습지의 임목 지역에서도 나무뿌리 호흡(나무 아래 지점) 및 토양 유기물(나무 사이 지점)에 따른 차이도 큰 것으로 나타났으며, 이를 구명하는 연구가 필요할 것으로 판단된다. 이에 향후 연구로서 임목 지역 내 나무 아래 지점 및 나무 사이 지점에서 코어 채취를 수행하여 토양 탄소 저장량(soil carbon stock)을 산정하고, 코어 채취 지점에서 이산화탄소 흡수/방출의 영향인자(함수비, 입도, pH 등)와 이산화탄소 플럭스를 월별로 측정하여 내륙습지의 임목 지역에서 토양 탄소 플럭스의 계절 변동 특성을 구명하는 연구를 수행하고자 한다.

감사의 글

본 논문은 “국립생태원의 재원으로 습지 부문 온실가스 인벤토리 고도화 연구 I(25) 사업(NIE-B-2025-04)” 및 “2021년도 교육부의 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설장비진흥센터 사업(2021R1A6C101A415)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Kang, D. H., Kwon, B. H., Kim, P. G. (2010). CO₂ respiration characteristics with physicochemical properties of soils at the coastal ecosystem in Suncheon Bay, *Journal of Environmental Science International*, 19(2), 217-227.
- Kang, D. H., Kwon, B. H., Yoo, H. S., Kim, P. S., Kim, K. H. (2011). Seasonal and spatial variations of CO₂ fluxes between surface and atmosphere in foreshore, paddy field and woods sites, *Journal of Environmental Science International*, 20(8), 963-975.
- Kang, D. H., So, Y. H., Kwon, B. H., Kim, P. S. (2019). Sensitivity analysis (Q₁₀) of carbon dioxide flux with soil temperature in the grassplot, *Journal of Environmental Science International*, 28(9), 785-795.
- Kim, G. S., Kim, A. R., Lim, B. S., Seol, J. S., An, J. H., Lim, C. H., Joo, S. J., Lee, C. S. (2022). Soil CO₂ Efflux and Leaf-Litter Decomposition of *Quercus variabilis* and *Pinus densiflora* Stands in the Southern Region of Korean Peninsular, *Atmosphere*, 13, 342.
- Kim, P. S., Kwon, B. H., Kang, D. H. (2014). Response of soil CO₂ fluxes to seasonal variations in a grassplot, *Journal of Environmental Science International*, 23(6), 1131-1142.
- 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.
- Lee, N. Y., Koo, J. W., Noh, N. J., Kim, J., Son, Y. H. (2010). Seasonal variation in soil CO₂ efflux in evergreen coniferous and broad-leaved deciduous forests in a cool-temperate forest, central Korea, *Ecological Research*, 25, 609-617.
- Liski, J., Ilversniemi, H., Makela, A., Westman, C. J. (1999). CO₂ 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.
- Luo, Y., Zhou, X. (2006). Soil respiration and the environment, ELSEVIER, 305p.
- Maier, C. A., Kress, L. W. (2000). Soil CO₂ 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.
- Noh, N. J., Son, Y. H., Lee, S. K., Yoon, T. K., Seo, K. W., Kim, C. S., Lee, W. K., Bae, S. W., Hwang, J. H. (2010). Influence of stand density on soil CO₂ efflux for a *Pinus densiflora* forest in Korea, *Journal of Plant Research*, 123, 411–419.
- Park, K. D., Kang, D. H., So, Y. H., Jo, W. G., Kim, B. W. (2023). Seasonal variation of carbon dioxide flux between soil surface layer and atmosphere in unvegetated tidal flat : Beolgyo tidal flat, *Journal of Environmental Science International*, 32(4), 267–276.
- 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.
- So, Y. H., Kang, D. H., Kwon, B. H., Kim, P. S. (2019). Seasonal variations of CO₂ concentration and flux in vegetation and non-vegetation environments on the Muan tidal flat of Hampyong Bay, *Journal of Wetlands Research*, 21(4), 257–266.