

## 다채널 지표토양 CO<sub>2</sub> 농도 모니터링(SCM) 시스템 개발 및 적용성 평가 연구

성기성<sup>1,2</sup> · 유순영<sup>3</sup> · 최병영<sup>2</sup> · 박진영<sup>2,4</sup> · 한래희<sup>2,5</sup> · 김정찬<sup>2</sup> · 박권규<sup>2</sup> · 채기탁<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>지오택컨설턴트

<sup>2</sup>한국지질자원연구원

<sup>3</sup>부산대학교 사회급변현상연구소

<sup>4</sup>부경대학교 지구환경과학과

<sup>5</sup>경상대학교 지질학과

## Applicability of the Multi-Channel Surface-soil CO<sub>2</sub>-concentration Monitoring (SCM) System as a Surface Soil CO<sub>2</sub> Monitoring Tool

Ki-Sung Sung<sup>1,2</sup> · Soonyoung Yu<sup>3</sup> · Byoung-Young Choi<sup>2</sup> · Jinyoung Park<sup>2,4</sup>  
Raehee Han<sup>2,5</sup> · Jeong-Chan Kim<sup>2</sup> · Kwon Gyu Park<sup>2</sup> · Gitak Chae<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Geotech Consultant Co., LTD

<sup>2</sup>Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)

<sup>3</sup>Research Institute for Social Criticality, Pusan National University

<sup>4</sup>Department of Earth Environmental Science, Pukyong National University

<sup>5</sup>Department of Geology, Gyeongsang National University

### ABSTRACT

Monitoring of CO<sub>2</sub> release through the ground surface is essential to confirm the safety of carbon storage projects. We conducted a feasibility study of the multi-channel surface-soil CO<sub>2</sub>-concentration monitoring (SCM) system as a soil CO<sub>2</sub> monitoring tool with a small scale injection test. The background concentrations showed the distinct diurnal variation. The negative relation of CO<sub>2</sub> with temperature and the low CO<sub>2</sub> concentrations during the day imply that surface-soil CO<sub>2</sub> depends on photosynthesis and respiration. After 4.2 kg of CO<sub>2</sub> injection (1 m depth for 29 minutes), surface-soil CO<sub>2</sub> concentrations increased in the all five chambers, which were located less than 2.8 m of distance from each other. The CO<sub>2</sub> concentrations seem to be recovered to the background around 4 hours after the injection ended. To determine the leakage, the data from Chamber 2 and 5 with low increase rates were used for statistical analyses. Coefficient of variation for 30 minutes (CV<sub>30min</sub>) is efficient to determine a leakage signal, with reflecting the fast change in CO<sub>2</sub> concentrations. Consequently, SCM and CV<sub>30min</sub> could be applied for an efficient monitoring tool to detect CO<sub>2</sub> release through the ground surface. Also, this study provides ideas for establishing action steps after leakage detection.

**Key words :** Geologic CO<sub>2</sub> storage, soil CO<sub>2</sub> monitoring, injection test

### 1. 서 언

지구온난화의 대비책으로 온실가스, 특히 CO<sub>2</sub>의 지중저장에 많은 연구개발이 이루어지고 있다. CO<sub>2</sub> 지중저장 프로젝트가 성공적으로 수행되기 위해서는 저장된 CO<sub>2</sub>가

지표환경으로 재배출되지 않는다는 확증이 필요하다(Cook, 2014). 주입된 CO<sub>2</sub>가 누출되는 과정에서(IPCC, 2005; Zhang et al., 2004), 토양은 지중 CO<sub>2</sub>가 지표환경으로 배출되는 마지막 통로로, 인간에게 직접적으로 영향을 미치는 생태계를 포함한다. 따라서 지표면으로부터 배출되

\*Corresponding author : gtchae@kigam.re.kr

Received : 2014. 12. 24 Reviewed : 2015. 2. 25 Accepted : 2015. 2. 25

Discussion until : 2015. 4. 30

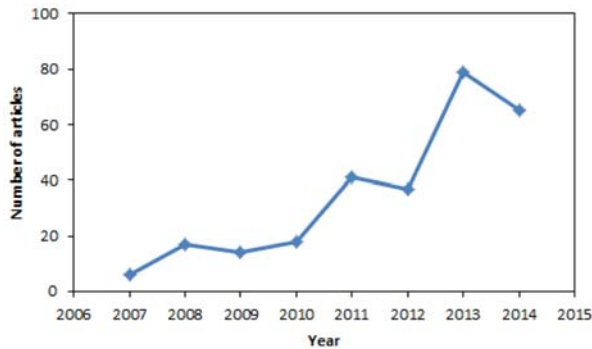


Fig. 1. The number of articles about 'soil CO<sub>2</sub>' published in International Journal of Greenhouse Gas Control (searched in SCOPUS: www.scopus.com on Dec. 22, 2014).

는 CO<sub>2</sub>의 모니터링은 CO<sub>2</sub> 지중저장 프로젝트의 안전성을 입증하는데 필수적이다. 이에 따라 CO<sub>2</sub> 지중저장과 관련하여 토양 CO<sub>2</sub> 모니터링 연구는 양적으로 늘어나고 있는 추세이다(Fig. 1). 토양 CO<sub>2</sub> 모니터링은 주입된 CO<sub>2</sub>가 근지표환경(near-surface environment)으로 누출되는지의 여부를 확인하는 것을 목적으로 한다. 여기서 토양은 지하수면 상부부터 지표까지이고, 암석, 침식토, 퇴적토, 식물, 미생물, 토양 수분, 토양 가스 등으로 구성된다. 토양 CO<sub>2</sub> 모니터링은 CO<sub>2</sub>의 농도뿐만 아니라 토양 CO<sub>2</sub>와 연관된 항목들(예, 토양 수분, 온도, 토양 가스 등)도 정기적으로 측정한다. 자연환경에서 토양 CO<sub>2</sub>는 식물(주로 뿌리)의 호흡, 미생물의 생분해를 통해 발생하고, 지표에서는 광합성을 통하여 소비된다. 또한 심부기원의 CO<sub>2</sub>는 단층대 또는 화산지대 등에서 토양을 통하여 지표로 배출된다. CO<sub>2</sub>를 포함한 토양 가스는 지하 환경에서 확산(diffusion)과 이송(advection)을 통하여 이동하는데, 지하수 유동 방식적과 유사한 형태의 지배방식적으로 설명될 수 있다(Scanlon et al., 2001).

토양 CO<sub>2</sub> 모니터링에 관한 기존 연구는 자연유사 연구, 지중저장 부지 모니터링, 소규모 주입 실험으로 분류될 수 있다. 자연유사 연구는 이탈리아와 미국에서 수행된 예가 있다(Annunziatellis et al., 2008; Jung et al., 2014). 지중저장 부지 모니터링과 관련하여서는 캐나다 Weyburn, 호주 Otway, 독일 CLEAN 프로젝트에서 모니터링 결과가 활발히 발표되고 있다(Beaubien, 2013; Schacht and Jenkins, 2014; Schlömer et al., 2014). 가장 잘 알려진 소규모 주입 실험 프로젝트는 미국의 ZERT(Zero Emission Research and Technology Center)로 많은 연구 결과들이 발표되고 있다(Lewicki et al., 2010; Krevor et al., 2010). 이외에도 노르웨이의 CO<sub>2</sub> field lab, 프랑스의 CO<sub>2</sub>-

vadose project, 스페인의 Hontomin, 영국의 ASGARD, 호주의 Ginninderra 프로젝트 등에서 CO<sub>2</sub> 누출 탐지 모니터링 기술 개발을 위해 지하 천부에 CO<sub>2</sub>를 주입하였다.

위의 선행연구는 토양 CO<sub>2</sub> 모니터링 방법을 크게 지표 토양의 플럭스 및 농도 측정과 불포화대 농도 측정으로 구분하고 있다(NETL, 2012). 지표토양의 플럭스 및 농도 측정은 누출 시 CO<sub>2</sub> 배출량을 산출하고, 이상대(anomalous area)를 탐사하는데 목적이 있다. 플럭스 측정이 불포화대 가스 농도 측정에 비하여 상대적으로 수월하기 때문에 이상대를 탐사하는데 효율적이다(Annunziatellis et al., 2008). 한편 불포화대 농도 측정의 경우, 지하 1 m 내외의 심도에서 가스 시료를 채취하여 현장에서 가스센서를 이용하여 분석하거나, 실험실에서 GC로 분석한다. 주로 CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, He, Rn, 탄소동위원소, 추적자(SF<sub>6</sub>, Kr 등) 등을 분석한다. 불포화대 가스를 분석하면, CO<sub>2</sub>의 기원과 유동 메커니즘, 누출 여부를 판별할 수 있다. 특히 자연 상태 토양에서 농도가 매우 낮고 인공적으로 합성된 추적자를 이용할 경우 누출 여부를 확실하게 판별할 수 있다.

기존 연구들의 결과를 간단하게 살펴보면, 지표토양 CO<sub>2</sub> 플럭스 측정의 경우, ZERT 프로젝트에서 CO<sub>2</sub> 플럭스 측정 결과를 이용하여 일평균 CO<sub>2</sub> 누출량을 계산한 바 있다(Lewicki et al., 2010). 그러나 지표토양 CO<sub>2</sub> 플럭스만을 이용해서는 누출량을 정확히 알 수 없다는 의견도 있다(Schacht and Jenkins, 2014). 자연유사 연구로서 지표토양 CO<sub>2</sub> 플럭스를 측정하여, 단층과 연관된 CO<sub>2</sub> 유출지점을 확인하고, 누출 메커니즘을 해석한 연구도 있다(Annunziatellis et al., 2008; Jung et al., 2014). 반면, CO<sub>2</sub> 지중저장 프로젝트의 일환으로 수행된 불포화대 토양 CO<sub>2</sub> 모니터링의 경우, CO<sub>2</sub> 누출을 의심할 만한 결과는 아직 없었고, 대신 CO<sub>2</sub>의 발생과 유동 기작을 밝히는데 활용되고 있다. 캐나다 Weyburn 프로젝트에서 측정된 불포화대 토양 CO<sub>2</sub>는 강우 후 충전되는 물에 의해 토양 공극 사이의 CO<sub>2</sub>가 빠르게 상부로 이동하여 CO<sub>2</sub> 플럭스가 증가될 수 있고, 이러한 경우 CO<sub>2</sub> 누출로 오해되기 쉬우므로 신중히 판단하여야 한다는 것을 밝혔다(Johnson and Rostron, 2012). 또한 불포화대 가스 중 O<sub>2</sub>+Ar과 CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>와 CO<sub>2</sub>의 관계를 통하여 불포화대 토양 CO<sub>2</sub>의 기원과 발생 메커니즘을 밝혔으며(Weyburn 프로젝트: Beaubien et al., 2013), 토양 CO<sub>2</sub>와 O<sub>2</sub>와의 관계를 통해 토양 CO<sub>2</sub>가 생물화학적 분해로 인해 발생하였는지, CH<sub>4</sub>의 산화에 의한 결과인지를 확인할 수 있었다(Cranfield 프로젝트: Romanak et al., 2012). 불포화대

토양 CO<sub>2</sub>의 탄소동위원소 분석을 통해서 CO<sub>2</sub>의 기원을 확인할 수 있었고(Otway 프로젝트: Schacht and Jenkins, 2014), 주입 CO<sub>2</sub>에 비반응성 기체(noble gas (Kr), SF<sub>6</sub>) 등의 추적자를 혼합할 경우, 추적자 농도 분석을 통하여 누출여부를 판별할 수 있었다(Ginninderra 프로젝트: Feitz et al., 2014).

본 연구는 한국지질자원연구원에서 개발 중에 있는 '다채널 지표토양 CO<sub>2</sub> 농도 모니터링(SCM: surface-soil CO<sub>2</sub>-concentration monitoring) 시스템'을 적용하여 지표토양 CO<sub>2</sub> 농도를 측정하고, 소규모 주입 시험을 통하여 SCM 시스템이 CO<sub>2</sub> 누출을 감지하는데 적용 가능한지를 평가하고자 하였다. 또한 CO<sub>2</sub> 주입 이전 배경농도를 측정하여 지표토양 CO<sub>2</sub>의 변화와 연관된 환경인자들을 도출하고 자연배경농도의 변화에서 벗어나는 이상값의 판별 방법에 대하여 논의하고자 하였다. 본 연구는 궁극적으로 비용 및 시간의 소요가 적은 토양 CO<sub>2</sub> 모니터링 방법을 개발하여 토양 CO<sub>2</sub> 모니터링에 적용하고자 하였으며, 지표토양 CO<sub>2</sub> 모니터링 절차 및 매뉴얼 작성에 도움이 되고자 하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 다채널 지표토양 CO<sub>2</sub> 농도 모니터링(SCM) 시스템

한국지질자원연구원에서는 'CO<sub>2</sub> 지중저장 요소기술 개발 기획연구'의 일환으로 2009년부터 토양 CO<sub>2</sub> 측정 기술을 개발하고 있다. 그 결과로, 2012년부터 다채널 지표토양 CO<sub>2</sub> 농도 모니터링(SCM) 시스템을 설계/제작/설치하였으며(특허 제 10-1080095호), 2013년 9월 충북 음성에 위치한 시험 부지에서 소규모 CO<sub>2</sub> 토양 주입 시험(심도 0.6 m, 주입량 9 kg, 주입압 2 bar, 측정시간 24시간)을 수행한 후, 기술적인 보안을 지속하고 있다(KIGAM, 2013). 본 연구에서 추구하는 토양 모니터링 기술의 개발 방향은 다음과 같다. 첫째, 가능한 많은 지점에서 동시/연속/자동 측정이 가능하여야 한다. 둘째, 측정 장치의 제작/설치 단가가 낮고 측정 방식이 표준화 되어야 한다. 셋째, 유지관리 및 노동 비용이 최소화되어야 한다. 이와 같은 기술 개발 방향에 따라 CO<sub>2</sub> 센서와 챔버로 구성된 지표토양 CO<sub>2</sub> 농도 측정 장치를 제작하였다. SCM 시스템은 아크릴 재질의 원통형 챔버(Φ 30 × h 25 cm) 여러 개를 지표에 밀착시켜 설치하고, 챔버 내부에 설치된 NDIR 센서(non-dispersive infrared sensors)를 통하여 지표로부터 배출되는 CO<sub>2</sub>의 농도를 측정하는 방식이다. 이와 같은 측정 방식은 지표토양 CO<sub>2</sub> 플럭스 측정 방식을 차용한 것

으로, 특정 지점의 챔버 영역에서 지표로 배출되는 CO<sub>2</sub>의 농도를 측정한다. Lewicki et al.(2010)는 ZERT 현장에서 지표 4 cm 상부에 NDIR 센서를 설치하고, 덮개가 있는 지름 2.5 cm, 길이 25 cm PVC관으로 센서를 보호하며 지표로 배출되는 CO<sub>2</sub>의 농도를 측정하는 바 있다. Lewicki et al.(2010)은 이를 대기 CO<sub>2</sub> 농도로 간주하고 측정/해석하였다. 그러나 Lewicki et al.(2010)의 결과에 따르면, 대기 CO<sub>2</sub>는 불포화대 CO<sub>2</sub> 농도보다 CO<sub>2</sub> 누출에 더 빠르고 민감하게 반응하였다. 이러한 결과는 지표로부터 4 cm 정도의 상부에서 측정되는 CO<sub>2</sub>는 토양으로부터 배출되는 CO<sub>2</sub>로 간주하는 것이 합당하다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 SCM 시스템의 측정값을 지표를 통해 토양으로부터 누출되는 CO<sub>2</sub> 농도를 반영하는 값으로 간주하였다.

2013년 9월 충북 음성에서 실시한 소규모 주입 시험을 통하여 SCM 시스템의 문제점과 보완방향을 다음과 같이 도출하였다. 첫째, 챔버 내부의 상대습도 상승으로 결로(結露)가 발생한다. 챔버 내부에 결로가 발생하면 CO<sub>2</sub>가 물방울로 용해되어 챔버 내 CO<sub>2</sub> 농도가 감소할 가능성이 있다. 둘째, 챔버 내부의 압력이 증가한다. 챔버 내부의 CO<sub>2</sub> 분압이 증가하면, CO<sub>2</sub>는 토양으로 다시 유입될 수 있고, 이로 인하여 챔버 내 CO<sub>2</sub> 농도가 변화할 수 있다. 셋째, 이와 같은 문제를 해결하기 위해 소형 환풍기를 설치하였으나, 소형 환풍기를 설치하면 측정 중 환풍기가 설치된 환풍기를 밀폐하여야 하는 불편한 점이 있다. 대안으로, 측정이 이루어지지 않는 동안 챔버를 개방하는 방법이 있으나, 이 방법의 경우, 정기적인 유지관리를 위한 노동이 필요하고, 결측이 발생하여 동시/연속/자동 측정이라는 개발 방향과 맞지 않았다. 본 연구에서는 챔버 내부의 결로 및 압력 변화 문제를 해결하기 위해 챔버 상단에 연통을 설치하였다(Φ 15 × h 15 cm Fig. 2). 연통 상부에는 빗물의 유입을 막을 수 있는 덮개를 설치하였다. 연통 상부와 덮개 사이는 개방되어 있어서 대기의 유입과 유출이 가능하도록 하였다. 연통으로 인하여 챔버 내 압력이 상승되는 문제를 해결할 수 있었으며, 환기를 통하여 결로 현상도 어느 정도 방지할 수 있었다. 또한 연통을 설치함으로써 추가적인 환기 장치가 불필요하게 되었으며, 추가적인 비용 및 노동의 투입도 방지할 수 있었다. 이외에도 2013년 현장 실험에서는 여러 개의 챔버를 설치하는 데에 일관성이 없어 측정 데이터의 차이에 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 챔버를 2단으로 나누어 제작/설치하였다(Fig. 2). 즉, 토양에 밀착되는 부분을 먼저 토양 아래

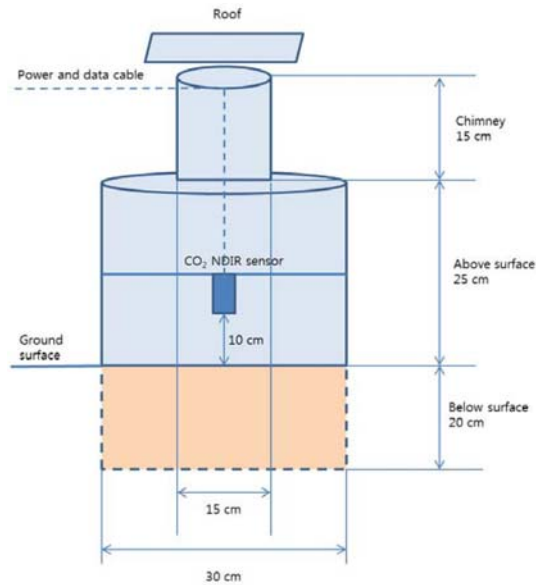


Fig. 2. Conceptual design of chamber for measuring surface-soil CO<sub>2</sub>-concentration.

로 20 cm 정도로 단단하게 고정하고 난 후 챔버의 상단을 부착하였다. 부착 시 아크릴 접착제와 실리콘으로 마감하여 기체의 유출입을 차단하였다. 이와 같이 제작/설치할 경우 설치가 용이하고, 일정 깊이로 설치하는 것이 가능하며 챔버 내부의 토양 표면을 고르게 하는 작업을 할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 챔버 내부에 설치된 NDIR 센서(E+E Elektronik 社, EE82, <10,000 ppm)의 전원과 데이터 송신은 케이블로 연결하였으나, 광역적인 지역에서 많은 수의 측정기를 운영하기 위해서는 측정 자료의 무선 송신과 태양광 전력 공급 등을 적용할 필요가 있다.

## 2.2. SCM 시스템 적용/평가 연구 방법

### 2.2.1. SCM 시스템 설치 및 배경농도 측정

SCM 시스템의 현장 적용성을 평가하기 위하여 SCM 시스템을 이용하여 토양의 배경농도 측정(8일) 1회, 소규모 주입 시험(1일) 1회를 수행하였다. 충남 공주시 국립박물관 인근의 농지(36° 27' 42.5"; 127° 06' 27.1"; 100 m<sup>2</sup>)에 SCM 시스템을 설치하였다(Fig. 3a). 설치 장소는 밭농사(주로 파, 상추 등)에 이용된 텃밭으로 사질-식양질 토양이다. 시험부지 내에서는 14개월 동안(2013년 10월부터 2014년 10월) 경작을 하지 않았으며, 잡초는 풀베기로 제거하였다. 챔버는 5개를 설치하였으며, 중앙에 1번, 주위에 챔버 2~5번을 십자형태로 배치하였다(Fig. 3b). 챔버 2~5번은 챔버 1번으로부터 약 2 m 정도 떨어져 있다. 지



Fig. 3. Location for testing the SCM system (a) and 5 chambers in the SCM system (b).

표토양 CO<sub>2</sub>의 배경농도는 2014년 8월 12일 오전 10시부터 19일 오후 12시까지 8일간 5분 간격으로 측정되었다. 배경농도를 측정하고 주입 시험을 수행하는 기간의 기상 자료는 공주시 금홍동에 위치한 기상청 AWS(automatic weather system) 자료를 활용하였다.

### 2.2.2. 소규모 주입 시험

토양 내 소규모 CO<sub>2</sub> 주입 시험을 위해서 1 m 길이의 스틸 재질 주입관을 지하에 매설하였다(Fig. 4a). 주입관의 하부 끝은 십자 방향으로 천공하여 CO<sub>2</sub>가 토양으로 주입되도록 하였다. 주입관 상부 및 주입 튜브의 연결 부위는 모두 누출여부를 확인한 후 시험에 사용하였다. 주입관의 토양 부분은 시멘트로 그라우팅을 하였다(Fig. 4a). 그라우팅 전 주입관 하단의 외부를 밀폐하여 찬공 부분으로 시멘트가 새어 들어가지 않도록 하였고, 지표까지 그라우팅을 하였다. 주입관 설치 위치는 챔버 1에서 2 방향



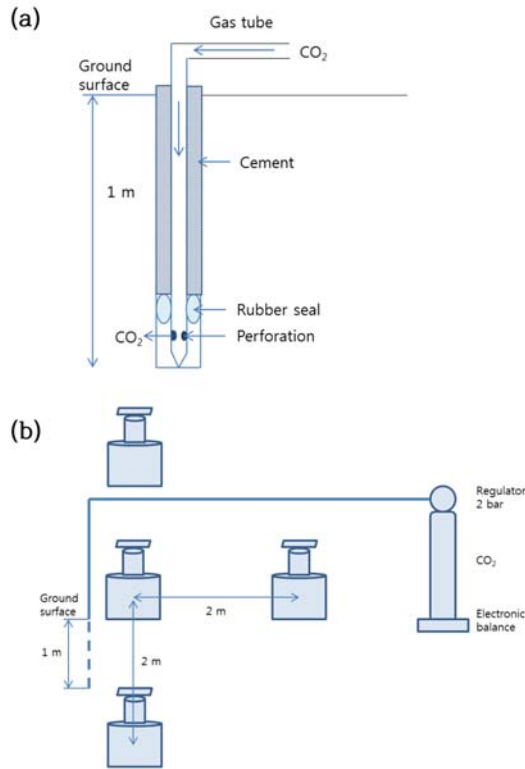


Fig. 4. Installation of CO<sub>2</sub> injection well (a). Location of 5 chambers and a CO<sub>2</sub> injection well in the CO<sub>2</sub> injection test (b).

으로 약 20 cm 떨어진 지점이다(Fig. 4b).

주입시험은 2014년 10월 14일 10시 28분부터 15일 06시 50분까지 약 1일 동안 수행되었다. CO<sub>2</sub> 주입은 14일 10시 35분부터 시작하여 11시 04분까지 29분 간 이루어졌으며, 주입량은 약 4.21 kg, 2 bar의 압력으로 주입되었다. 주입량은 전자저울로 측정되었으며, 주입압력은 레귤레이터로 조절되었다(Fig. 3b). 주입 시험 동안 CO<sub>2</sub> 농도는 1초 간격으로 측정되었다. 주입율은 약 220 kg/day로서, 미국 ZERT 프로젝트의 300 kg/day, 호주 Ginninderra 프로젝트의 144 kg/day, 216 kg/day와 비슷하였다.

주입에 이용된 CO<sub>2</sub>는 99.999% 순도의 CO<sub>2</sub>를 이용하였고, 주입 중 작업자와 주민의 안전을 위해 다음과 같은 안전 조치를 취하였다. 첫째, 작업 시 3인 이상 참여하고, 1인은 멀리 떨어져서 작업자의 작업을 관찰한다. 이는 작업자의 행동에 이상이 있을 시, 작업을 중단하고 작업자를 안전한 곳으로 대피하기 위해서이다. 둘째, 주입 중에는 약 10분 간격으로 지표 1.5 m 높이에서 CO<sub>2</sub> 농도를 측정하였다. 주입 종료 후에는 약 3시간 동안 30분 간격으로 대기 CO<sub>2</sub> 농도를 측정하였다. 작업장의 CO<sub>2</sub> 농도가 1,000 ppm 이상이 될 경우 작업자는 피곤함을 느낄 수 있으며, 5,000 ppm 이상 상승하지 않도록 하여야 한다.

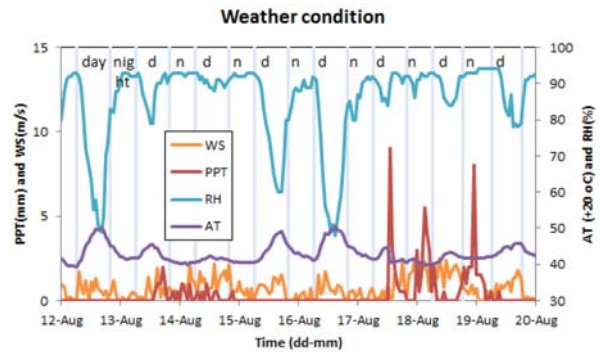


Fig. 5. Weather conditions when the background concentration of surface-soil CO<sub>2</sub>-concentration was measured. PPT: precipitation per hour (mm/hr), RH: relative humidity, AT: atmospheric temperature, WS: wind speed. The vertical lines represent times for sunrises and sunsets.

CO<sub>2</sub>는 2~10%(20,000~100,000 ppm)의 농도에서 메스꺼움, 어지러움, 두통, 정신 혼란을 야기하며, 혈압과 호흡이 상승할 수 있다. 8% 이상에서는 메스꺼움과 구토가 나타나고, 10% 이상에서는 몇 분 안에 질식에 이르게 될 수 있다.

### 3. 연구 결과

#### 3.1. 지표토양 CO<sub>2</sub>의 배경농도

##### 3.1.1. 기상

지표토양 CO<sub>2</sub>의 배경농도를 측정할 기간 동안 기상자료는 Fig. 5와 같다. 측정기간 중 기온은 최저 19.3°C에서 최대 30°C로 일교차가 컸고, 강우가 있는 날은 상대적으로 일교차가 작았다. 상대습도의 경우 기온과는 반대로 낮에는 낮아지고 밤에 높아지는 일변화가 나타났으며(48~94%), 강우가 있을 경우 높은 상대습도 수준을 유지하였다. 배경농도를 측정하는 기간 동안 강우는 5일간 2회 있었고, 누적 강우량은 72.5 mm이다. 강우량이 가장 많은 날은 8월 18일로 35.5 mm로 기록되었다. 첫 번째 강우는 13일 14시에 시작하여 14일 21시에 종료되었고(누적 12.5 mm), 두 번째 강우는 17일 13시에 시작하여 19일 오전 9시에 종료되었다(누적 60.0 mm)(Fig. 5).

##### 3.1.2. 지표토양 CO<sub>2</sub>의 배경농도 측정 결과

지표토양 CO<sub>2</sub>의 배경농도는 대체로 낮에 낮고 밤에 높게 나타났다(Fig. 6). 측정된 CO<sub>2</sub> 농도는 챔버 간에 차이를 나타내었는데, 평균적으로 챔버 1에서는 718 ppm(508~939), 챔버 2는 536 ppm(311~706), 챔버 3은 471 ppm(364~647), 챔버 4는 392 ppm(96~543), 챔버 5는

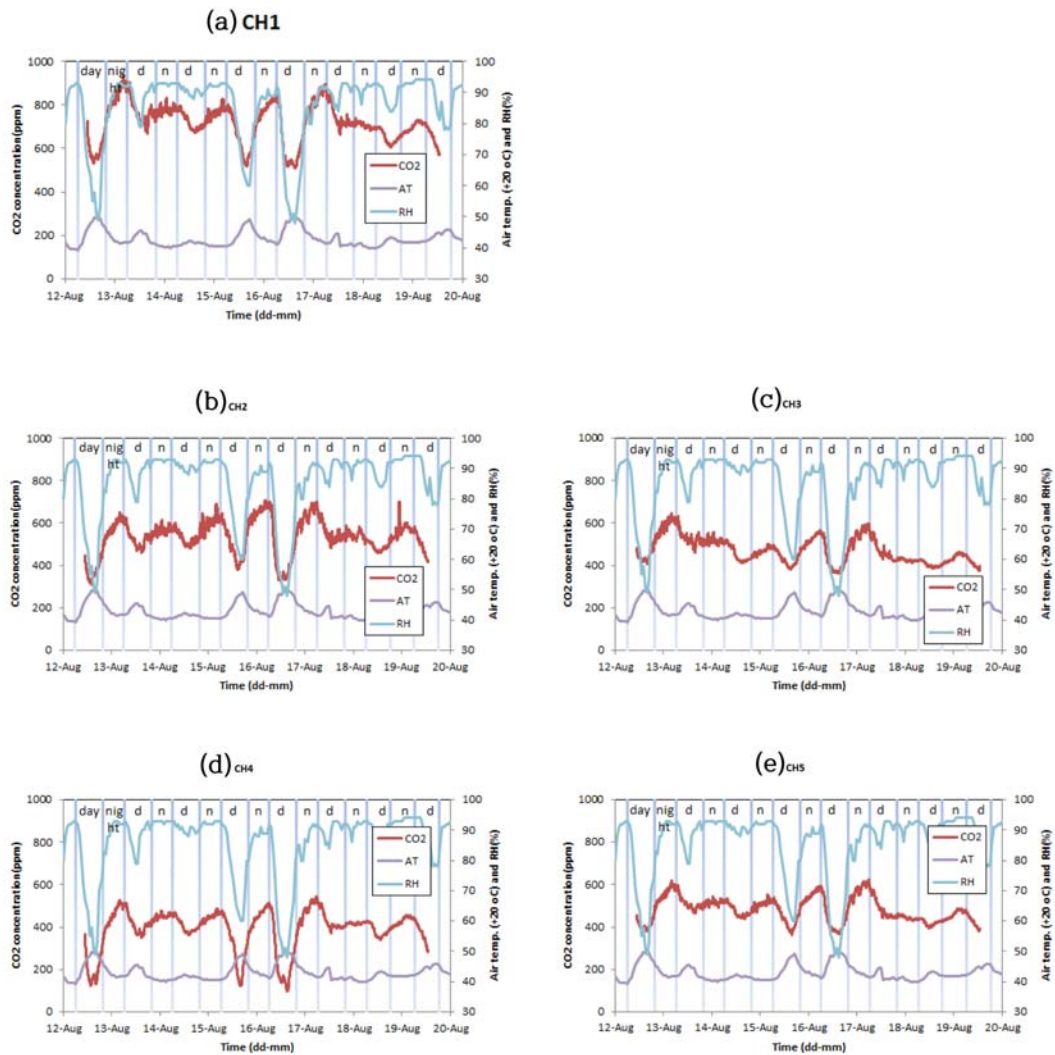
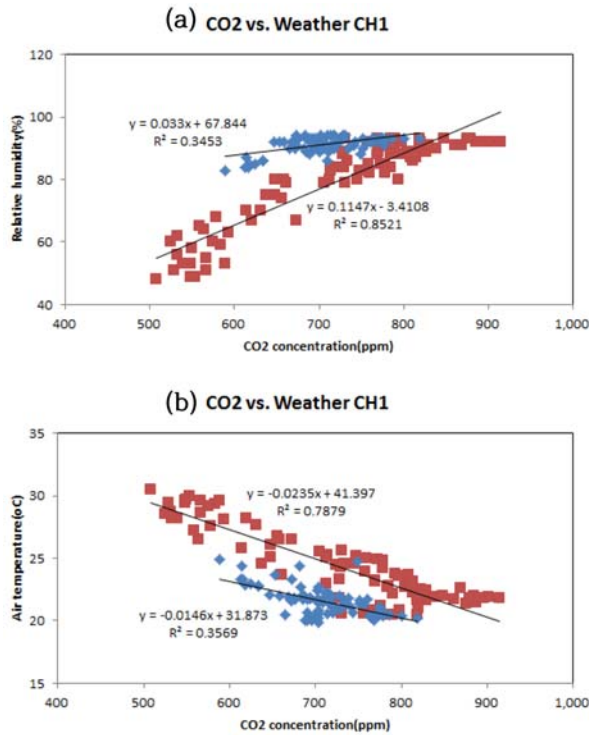


Fig. 6. Background concentration of surface-soil CO<sub>2</sub>-concentration measured from Chamber 1(a), 2(b), 3(c), 4(d) and 5(e).

481 ppm(365~623)으로 나타났다(Fig. 6). 배경농도 측정 이전 각 챔버 내에 설치된 NDIR 센서는 동일한 시료에서 대하여 동일한 값을 나타내도록 보정되었다. 따라서 챔버 간 CO<sub>2</sub> 농도 차이는 유의미한 것으로 판단된다. 일반적으로 식생이 적은 토양의 경우, 지표토양 CO<sub>2</sub>의 배경농도는 대기와 유사한 400 ppm 정도의 값을 나타낼 수 있다. 따라서 지표토양 CO<sub>2</sub> 농도가 100 ppm 이하로 떨어지는 경우(챔버 4)에 대한 추가적인 조사와 해석이 필요하다. 호주 오프웨이(지표 아래 30 cm)와 독일 CLEAN 프로젝트(지표 아래 < 3 m)에서도 불포화대 CO<sub>2</sub> 농도의 최소값이 0.01% 즉, 100 ppm으로 측정된 바가 있기는 하다(Schacht and Jenkins, 2014; Schlömer et al., 2014). 일반적으로 불포화대 CO<sub>2</sub> 농도가 지표토양의 CO<sub>2</sub> 농도에 비해서 높다는 것을 고려할 때, 본 연구와 호주, 독일

에서 측정된 불포화대 CO<sub>2</sub> 농도 100 ppm은 매우 이례적인 값이다.

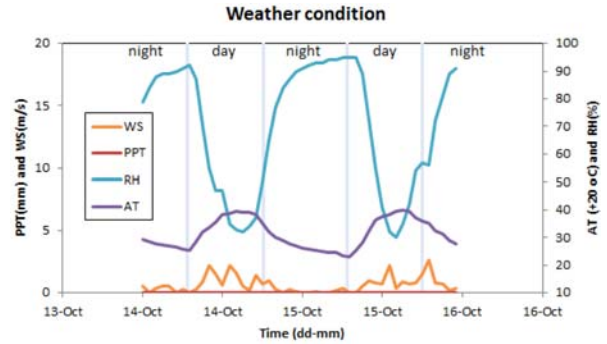
본 연구에서 CO<sub>2</sub> 농도는 모든 챔버에서 일출 후 감소하기 시작하여 오후 2~4시 사이에 최저가 된 후 다시 증가하는 경향을 나타낸다(Fig. 6). CO<sub>2</sub> 농도는 상대습도와는 정의 상관관계를, 온도와는 부의 상관관계를 나타낸다(Fig. 7). 온도와 부의 상관관계를 나타내는 것으로 보아서, CO<sub>2</sub>는 토양 미생물에 의한 유기물의 분해와는 관계가 없는 것으로 판단된다. 일반적으로 불포화대 CO<sub>2</sub> 농도는 미생물의 대사과정으로부터 발생하므로 온도와 정의 상관관계를 나타낸다(Lewicki et al., 2010). 반면, 본 연구에서 지표토양 CO<sub>2</sub> 농도는 낮에 낮고 밤에 높아지는데(일저야고: 日低夜高), 이는 지표 근처 식물의 뿌리 호흡과 광합성의 영향으로 인한 것으로 판단된다. 챔버의 상



**Fig. 7.** Linear regression (Chamber 1) between surface-soil CO<sub>2</sub>-concentration and relative humidity (RH) on (a), and air temperature (AT) on (b). The red dots were from no rainy days, while the blue dots were from rainy days.

부는 내부를 관찰하기 위하여 투명 아크릴로 제작되었다. 따라서 챔버 내부의 토양 표면에서 자라는 식물이 광합성을 했었을 것으로 사료된다. Lewicki et al. (2010)에 의해서 측정된 대기 CO<sub>2</sub> 농도(지표 4 cm 상부 측정; ϕ 2.5 × h 25 cm PVC 덮개 설치)의 경우도 낮에 낮게 나타나고 있어 광합성의 영향으로 해석할 바 있다.

Fig. 7a은 지표토양 CO<sub>2</sub> 농도와 상대습도 간의 관계를 보여준다. 상대습도는 95% 이상 증가하지 않기 때문에 상대습도 95% 부근에서 넓은 범위의 CO<sub>2</sub> 농도가 나타난다. 비가 올 경우, CO<sub>2</sub> 농도와 상대습도 간의 상관관계 기울기와 결정계수가 낮아졌다(Fig. 7a). 기온의 경우도 상대습도의 경우와 마찬가지로, 비가 올 경우, CO<sub>2</sub>와 기온 간의 상관관계 기울기와 결정계수가 낮아졌다(Fig. 7b). 즉, 비가 올 경우, CO<sub>2</sub> 농도는 상대습도나 기온과 상관관계가 비강우시 보다 약해지는 것으로 나타났다. 비강우 시와 비교하였을 때, 강우 시 CO<sub>2</sub> 농도는 밤에도 크게 높아지지 않고, 낮에도 크게 낮아지지 않는 현상이 관찰되었다. 이는 지표 또는 불포화대로 충전되는 빗물에 CO<sub>2</sub>가 용해되는 현상(Annunziatellis et al., 2008), 공극이나 기체의 유동경로가 물로 포화되어 CO<sub>2</sub>의 유동을 막아



**Fig. 8.** Weather conditions during the CO<sub>2</sub> injection test. RH: relative humidity, AT: atmospheric temperature, WS: wind speed. The vertical lines represent times for sunrises and sunsets.

CO<sub>2</sub>의 증가가 둔화되는 현상(Garcia-Anton et al., 2014), 빗물이 토양의 공극내로 유입되면서 기체를 밀어올리는 현상(Johnson and Rostron, 2012) 등이 복합적으로 나타났기 때문인 것으로 사료된다.

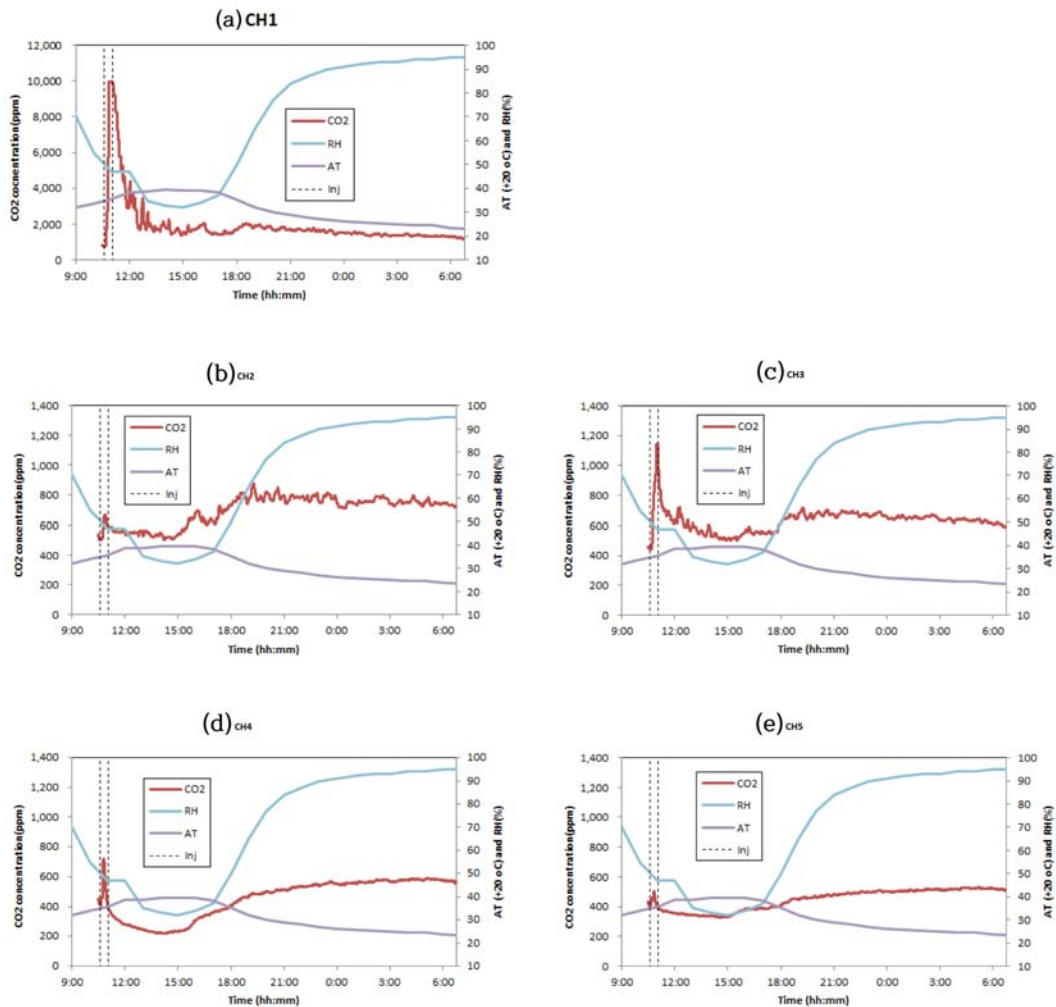
지표토양 CO<sub>2</sub>의 배경농도 범위는 챔버 간 차이를 보이는데(Fig. 6), 약 5 × 5 m 정도의 좁은 지역 내에서도 CO<sub>2</sub>의 발생과 유동에 차이가 있음을 암시한다. 앞서 언급한 바와 같이, 연구 지역의 지표토양 CO<sub>2</sub>가 주로 식물의 호흡에 의해서 발생하고, 광합성에 의해서 제거된다면 식물 분포의 차이가 있었어야 하는데, 챔버 설치 전 부지 내 식생은 모두 제거하였다. 따라서 챔버 간 CO<sub>2</sub> 농도가 차이 나는 이유를 다음과 같이 생각해 볼 수 있다. 첫째, 챔버 내 결로 현상으로 인해 물방울이 생성되는데, 챔버 마다 물방울 생성에서 차이가 났다. 연통의 설치로 결로 현상을 대부분 방지하였으나, 여전히 챔버 내벽에 작은 물방울이 때때로 관찰된 바 있다. 둘째, 좁은 영역 내에서도 토양의 물리적/생물학적 특성이 상이하여 지표로 배출되는 CO<sub>2</sub> 함량이 다를 수 있다. 셋째, 토양 표면의 식생을 완전히 제거하였다고 하나 챔버 설치 후에는 내부의 잡초를 제거하는 것이 불가능하였기 때문에 광합성 정도의 차이가 발생하여 각 챔버 별로 CO<sub>2</sub> 농도값이 다르게 나타난 것으로 사료된다.

### 3.2. 주입 시험 결과

주입 중 기온과 상대습도의 일교차가 컸으며(Fig. 8), 강우는 없었고, 풍속은 최대 2.6 m/s로 바람이 없는 날이라고 할 수 있다. 상대습도는 낮에 30%까지 떨어졌고, 밤에는 95%까지 증가하였다. 기온의 경우 최저 3°C에서 최고 20°C까지 나타났다.

Fig. 9a-e는 각 챔버에서 관측된 지표토양 CO<sub>2</sub>의 농도와 연구부지 주변의 기온 및 상대습도를 나타낸다. 챔버





**Fig. 9.** Surface-soil CO<sub>2</sub>-concentration (ppm), RH (%), and AT (+20°C) before/during/after the CO<sub>2</sub> injection. (a) Chamber 1, (b) Chamber 2, (c) Chamber 3, (d) Chamber 4, (e) Chamber 5

1의 경우 배경농도가 높게 나타났었는데(범위: 508~939 ppm, 평균: 718 ppm, Fig. 6a), 주입 이후 NDIR 센서의 측정한계인 10,000 ppm(1.0%) 까지 증가하였다(Fig. 9a). 주입을 종료한 11시 04분경부터 농도가 급격히 감소하고 있으나, 측정 종료 시점(10월 15일 06:50)에 약 1,250 ppm 정도를 나타내어 배경농도 이상으로 관측되었다.

챔버 2~5에서 CO<sub>2</sub> 농도는 최대 약 1,100 ppm(챔버 3) 까지 나타났다(Fig. 9b~e). 챔버 2의 경우 주입 직전 약 530 ppm(배경농도 평균: 536 ppm, 범위: 311~706 ppm)을 보이다가 주입 후 약 660 ppm 까지 증가한 후 주입종료 이전(10:52)부터 CO<sub>2</sub> 농도가 감소하여 주입 종료 후에는 약 530 ppm 수준으로 감소하였다(Fig. 9b). 그러나 상대 습도가 높아지는 15시부터 증가하기 시작하여 초기 530 ppm보다 높고, 주입 후 측정된 630 ppm보다도 높은 약 800 ppm 수준으로 증가하였다. 오후 4시 경부터 증가하는

배경농도의 변화 경향(Fig. 6b)을 따른 것으로 보인다.

챔버 3의 경우 주입 전 약 450 ppm이었다가 주입 후 서서히 증가하여 주입 종료 시점에 약 1,140 ppm까지 증가하고 주입 종료 후 서서히 감소한다(Fig. 9c). 이후 15시까지 주입 전 농도 450 ppm보다 높은 약 530 ppm 수준을 유지하다가 18시 이후 상대습도의 증가에 따라 증가하는 양상을 나타낸다(약 690 ppm 수준). 이는 8월에 측정된 배경농도의 최대값(약 650 ppm, Fig. 6c)과 유사하다.

챔버 4의 경우 8월에 측정된 배경농도가 가장 낮게 나타났다(평균: 392 ppm, 범위: 96~543 ppm), 주입 시험 직전 약 450 ppm 정도를 나타내다가 주입 이후 서서히 증가하여 약 720 ppm까지 증가하고 주입 종료 이전(10:48)부터 감소하기 시작하였다(Fig. 9d). 주입 종료 이후부터는 주입 전 농도인 450 ppm보다 낮은 230 ppm가



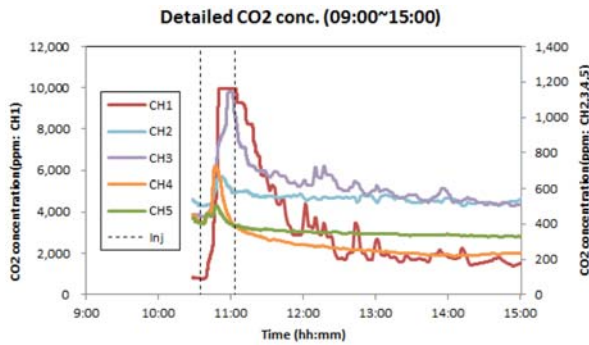


Fig. 10. Comparison of surface-soil CO<sub>2</sub>-concentration (ppm) in 5 chambers after the CO<sub>2</sub> injection.

지 감소하였다. 그러나 챔버 2와 마찬가지로, 약 15시부터 다시 증가하기 시작하여 약 570 ppm까지 증가하는데, 배경농도의 변화 경향을 반영하는 것으로 보인다.

챔버 5의 경우 주입 전 약 430 ppm을 나타내었는데, 이는 8월에 관측된 배경농도의 평균인 481 ppm(범위: 365~623 ppm)과 유사하다. 지표토양 CO<sub>2</sub> 농도는 주입 후 서서히 증가하다가 주입 종료 전(10:48)부터 감소하기 시작하여 15시쯤 약 320 ppm으로 주입 전보다 낮아졌다(Fig. 9e). 그러나 챔버 2, 4와 마찬가지로 약 15시부터 다시 증가하기 시작하여 배경농도의 변화 경향을 따른다. 챔버 4와 5에서 특이한 점은 주입 종료 후 감소된 CO<sub>2</sub>의 농도가 주입 전 농도보다 낮아졌다는 것이다.

각 챔버의 CO<sub>2</sub> 측정 결과를 정리하면 다음과 같다. 첫째, 주입 전 지표토양 CO<sub>2</sub> 농도는 8월에 관측된 배경농도의 범위에서 크게 벗어나지 않았다. 둘째, 챔버 1은 배경농도는 물론 주입 직후 관측된 농도도 가장 높게 나타났다. 주입관에서 약 20 cm 밖에 떨어져 있지 않았기 때문에 가장 높은 CO<sub>2</sub> 농도를 나타낸 것으로 판단된다. 따라서 주입된 CO<sub>2</sub>의 대부분은 챔버 1 주변으로 누출되고 있는 것으로 사료된다. 셋째, 챔버 2, 4, 5에서 CO<sub>2</sub> 농도는 주입이 종료되기 전(10시 46분~48분경)부터 감소되기 시작했다(Fig. 10). 챔버 3의 경우는 주입 종료 이후 감소되기 시작하였으나, 10시 46분경에는 증가율이 감소하는 경향이 관찰되었다(Fig. 10). 이러한 결과는 10시 46분경 주입율이 변화하였거나, 그 시점에 챔버 1, 3 부근으로 CO<sub>2</sub>가 대규모로 유출되기 시작하여 챔버 1을 제외한 다른 챔버로의 CO<sub>2</sub> 유출량이 줄어들었을 가능성을 시사한다. 마지막으로 챔버 2, 4, 5의 경우 15시까지 지속적으로 감소하다 이후 다시 증가하는데(Fig. 9b, d, e), 이는 대기의 상대습도 증가 및 온도 감소의 영향을 받는 것으로 해석되며, 따라서 15시경에는 CO<sub>2</sub> 농도 변화가

자연 상태로 회복된 것으로 판단된다.

결론적으로 약 30분간의 주입 후 주입관에서 약 2 m 거리 내 모든 챔버들에서 CO<sub>2</sub> 누출이 관찰되었으며, 예상한 바와 같이 챔버 1로 CO<sub>2</sub>가 가장 많이 누출되었다. 주입 초기 농도의 증가율은 챔버 1이 가장 높았으나 챔버 1의 농도는 NDIR 센서의 상한을 넘었기 때문에 정확한 증가율을 가늠하기 어렵다. 챔버 2의 경우 최고 농도 665 ppm까지 17분이 걸렸고, 챔버 3은 최고 농도 1,144 ppm까지 24분, 챔버 4는 최고농도 724 ppm까지 약 12분, 챔버 5는 최고농도 503 ppm까지 약 13분 정도 걸렸다. 시간에 따른 CO<sub>2</sub>의 증가율을 계산하면((최고농도/주입전농도)/시간) 챔버 2가 분당 0.07배 증가하였고, 챔버 3이 0.11배, 챔버 4가 0.13배, 챔버 5가 0.08배 증가하였다. 따라서 시간에 따른 농도의 증가율을 따지면 챔버 2와 5가 유사하고, 챔버 3, 4가 유사하다. 즉 챔버 2, 5의 경우 CO<sub>2</sub> 누출에 따른 CO<sub>2</sub> 농도 피크가 상대적으로 작고, 챔버 3, 4는 상대적으로 크다고 할 수 있다. 또한 챔버 2, 5가 위치한 쪽으로 CO<sub>2</sub>의 유동이 상대적으로 적었음을 알 수 있다.

## 4. 토 의

### 4.1. SCM 시스템의 유용성

본 연구에 제기될 수 있는 문제는 SCM을 이용하여 측정한 CO<sub>2</sub> 농도 값이 토양 표면으로부터 배출된 CO<sub>2</sub>의 농도를 옳고이 반영하는 가이다. 앞서 설명한 바와 같이 본 연구에서 NDIR 센서는 지표 상부 10 cm 높이에 위치하였기 때문에 엄밀히 말하면 토양 CO<sub>2</sub>라 할 수 없다. 즉, 불포화대로부터 배출된 토양 CO<sub>2</sub>가 근지표(近地表) 대기 CO<sub>2</sub>와 혼합된 결과라고 해석하는 것이 합당하다. Lewicki et al.(2010)는 지표 4 cm 상부에 센서를 설치하고 측정한 값을 대기 CO<sub>2</sub>로 보고한 바 있다. Lewicki et al.(2010)이 측정한 대기 CO<sub>2</sub> 농도의 일변화는 본 연구의 결과와 유사하게 낮에 낮고, 밤에 높은 경향을 나타내었다. 포항 지역에서 지표토양 CO<sub>2</sub> 플럭스 측정기(Li-COR社, Li-8100A)로 측정한 지표토양의 CO<sub>2</sub> 농도도 일저야고(日低夜高)의 경향을 나타내었다(미발표 자료). 반면, 불포화대에서 측정된 CO<sub>2</sub> 농도의 일변화는 대체로 낮에 높고 밤에 낮아(日高夜低) 온도의 영향을 받는 토양 미생물의 대사 결과로 해석되고 있다(Lewicki et al., 2010; Garcia-Anton et al., 2014; Schloemer et al., 2013). 따라서 본 연구에서의 CO<sub>2</sub> 농도는 토양 미생물의 대사작용 보다는 지표 식물의 광합성과 뿌리에서의 호흡작용을

반영하는 것으로 판단된다. 다만, 대기-불포화대의 기압의 변화, 챔버로부터 토양으로의 CO<sub>2</sub> 재유입 등은 챔버 내/외부의 압력을 측정하지 않아서 고려하지 않았다.

그럼에도 불구하고 본 연구에서 적용된 SCM 시스템은 토양 CO<sub>2</sub>의 변화를 잘 반영하는 것으로 판단된다. 그 이유는 다음과 같다. 첫째, SCM 시스템은 불포화대(1 m 심도)에 주입된 CO<sub>2</sub>가 지표로 배출되는 현상을 빠르게 반영하였다(Fig. 9). 즉, 지표로 배출되는 CO<sub>2</sub>의 감지능(感知能)이 매우 높았다. 미국의 ZERT 프로젝트에서도 지표 4 cm 상부에서 측정된 대기 CO<sub>2</sub> 농도가 심도 30 cm에서 측정된 불포화대 CO<sub>2</sub> 농도와 CO<sub>2</sub> 플럭스보다 더 빨리 누출을 감지했다고 보고된 바 있다(Lewicki et al., 2010). 결국 본 연구에서 측정된 CO<sub>2</sub>가 토양 CO<sub>2</sub>인지 아닌지를 차치하더라도 CO<sub>2</sub> 지중저장 프로젝트에서 CO<sub>2</sub> 누출 탐지에 매우 효과적으로 적용될 수 있다. 또 다른 이유는 강우와 함께 CO<sub>2</sub> 농도가 증가하였다는 것이다(Fig. 6). 불포화대 공극에 물이 있을 경우 불포화대 CO<sub>2</sub>는 공극수에 용해되고 궁극적으로 광물과의 반응으로 그 농도가 감소 할 수 있다. 그러나 빗물이 불포화대로 충전될 경우 불포화대의 공극을 물이 채우게 되고 기체는 상부로 밀려 올라갈 수 있다. 강우 이후 불포화대 CO<sub>2</sub>가 증가하는 현상은 ZERT 프로젝트(Lewicki et al., 2010)와 스페인(Garcia-Anton et al., 2014)의 불포화대(동굴) 연구에서도 보고된 바 있다. 따라서 본 연구에서 강우 시 지표토양 CO<sub>2</sub> 농도가 높아지는 현상은 불포화대 기체가 지표로 배출되기 때문인 것으로 사료된다. 즉 지표에서 CO<sub>2</sub> 농도를 측정하여도 불포화대의 기체 유동(변화)을 충분히 감지할 수 있다고 해석할 수 있다.

이외에도 SCM 시스템은 설치와 측정 방법이 비교적 단순하고, NDIR 센서 외에는 비용이 크지 않다는 장점이 있다. 또한 대량으로 설치할 경우 넓은 지역에 걸쳐 시간적으로 동시에 지표토양 CO<sub>2</sub> 농도를 감시할 수 있기 때문에 예상하지 못한 저장 CO<sub>2</sub> 누출을 감지할 수 있으며, 누출 초기에 지역사회 및 CO<sub>2</sub> 저장 프로젝트 관리자에게 조기경보 할 수 있는 장점이 있다. 뿐만 아니라 불포화대의 가스를 연속으로 측정할 경우, 지하수면의 상승으로 인해 불포화대에 삽입한 관에 물이 차올라 결측이 발생(Schlömer et al., 2014)하거나 센서의 유실(Bernardo and de Vries., 2011)이 발생할 수 있어 추가적인 관리비용이 소요될 수 있는데, SCM을 활용하면 이와 같은 부대비용을 절감할 수 있다.

상기 언급한 바와 같이, SCM 시스템은 토양 CO<sub>2</sub>의 변화를 효과적으로 감지할 수 있으나 앞으로 해결해야 하

는 기술적인 과제도 안고 있다. 첫째, 본 연구는 SCM 시스템의 성능을 검증하기 위한 목적으로 수행되었다. 따라서 측정된 지표토양 CO<sub>2</sub>의 거동 메커니즘을 충분히 설명하지 못한 한계가 있다. 특히 챔버 내/외부의 기압 변화를 측정하지 못하였고, 따라서 상부 연통을 통한 챔버 내/외부 및 토양 표면에서의 기체교환에 대한 해석이 어려웠다. 이를 해결하기 위해서는 챔버 내/외부의 기압을 측정하는 추가적인 연구가 필요하다. 또한 CO<sub>2</sub> 기원과 토양 표면에서의 유동 메커니즘을 설명하기 위해서는 인공/자연 추적자(Kr, SF<sub>6</sub>, 라돈, δ<sup>13</sup>C<sub>CO2</sub>)를 활용할 필요가 있다. 둘째, 결로 현상으로 인해 챔버 내부의 벽면에 형성되는 물방울을 완전히 제거할 필요가 있다. 연통의 설치로 결로현상을 대부분 방지하였으나, 여전히 챔버 내벽에 물방울이 관찰되었다. 디자인 개선 등으로 추가적인 비용/장치 없이 물방울을 제거할 필요가 있다. 셋째, 다양한 측정 범위를 가지는 센서를 동시 활용이 필요하다. 본 연구에서 챔버 1의 경우 주입 시험 직후 CO<sub>2</sub> 농도가 NDIR 센서의 측정한계 이상으로 나타났다. Schlömer et al.(2014)와 Bernardo and de Vries (2011)는 다양한 측정한계를 지닌 센서를 동시에 사용하여 측정의 신뢰도와 활용도를 높인 바 있다. 또한 N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Ar, CH<sub>4</sub> 등 주요 기체 성분을 동시에 측정할 경우, CO<sub>2</sub> 기원을 밝힐 뿐만 아니라 누출의 지시자로도 활용할 수 있다(Beaubien et al., 2013; Romanak et al., 2012). 마지막으로, 주입 시험 시, 일광, 기온, 상대습도, 풍향, 풍속 등 기상을 주입시험 부지에서 측정할 필요가 있다.

#### 4.2. 누출 평가 통계 기법

CO<sub>2</sub> 지중저장 부지 또는 그 인근에서 CO<sub>2</sub> 누출 탐지를 목적으로 지표토양 CO<sub>2</sub>를 모니터링 할 경우, 배경농도의 시간적인 변화로 인하여(Fig. 6), 측정 데이터에서 누출 신호를 판별하는 것이 쉽지 않다. 대량으로 누출된 경우가 아니라면, 대부분의 경우 누출 신호는 매우 작을 수 있기 때문이다(예: 본 연구의 주입 시험 시 챔버 2, 5의 신호). 이러한 작은 이상값은 자연배경 값에 묻힐 수 있고, 측정의 오차로 오인될 수도 있기 때문에 모니터링 전에 충분한 시간동안 자연배경 값에 대한 조사가 필요하며, 측정의 정도관리(QAQC) 및 자료의 분석 및 처리에 대한 연구가 필요하다. 뿐만 아니라 이러한 자료처리 방법에 대한 규정이 필요하며 이에 대한 이해당사자들의 합의 또는 동의를 선행되어야 한다.

본 연구에서는 지표토양 CO<sub>2</sub> 농도 측정 방법을 이용하여 8일이라는 짧은 기간이지만 자연배경농도를 측정하였

고, 소규모 주입시험을 통해 CO<sub>2</sub>의 지표 누출을 탐지하였다. 누출의 신호가 매우 약한 챔버 2, 5의 자료(10시 28분부터 15시 00분까지)를 활용하여 누출을 판별할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

#### 4.2.1. 측정 주기 결정

누출 판별에 대한 토의에 앞서 지표토양 CO<sub>2</sub> 농도의 측정 주기를 제안하고자 한다. 측정 주기가 짧아질수록 CO<sub>2</sub> 농도의 시간변화는 뚜렷이 관찰되나, 저장용량이 늘어나고, 데이터 분석 속도가 감소하게 된다. 한편 측정 주기가 길어지면 데이터가 무더지고 결국 누출이 감지되지 못할 수도 있다. 본 연구에서 배경농도는 5분 주기로 측정되었으며, 주입 시험 시에는 1초 주기로 지표토양 CO<sub>2</sub>가 측정되었다. 주입 시험에서 측정된 챔버 2와 5의 1초 당 측정 자료와 이 자료에서 30초, 1분, 5분, 30분 간격으로 추출된 자료를 Fig. 11a와 b에 비교하였다. 측정주기가 30초와 1분인 경우, 1초 주기로 측정된 자료와 비교하였을 때 CO<sub>2</sub> 농도 변화 경향이 크게 다르지 않았다. 반면, 5분 주기로 측정 할 경우 CO<sub>2</sub> 농도 변화가 무더졌고, 30분으로 측정할 경우에는 누출 신호를 판별하기 매우 어려운 자료가 되었다. 따라서 1분 간격으로 측정하는 것이 적당할 것으로 보인다. 이 경우 데이터 용량은 1초 주기로 측정할 경우보다 약 60분의 1로 줄어들게 된다. 다만, 1분 간격의 측정이 적당한 것은 본 연구의 CO<sub>2</sub> 주입량과 주입기간 등의 조건에서만 적용될 수 있는 특수한 사항일 수 있다는 점을 고려하여야 한다. Schlömer et al. (2014)는 불포화대 토양 가스 농도를 5분 간격으로 측정하고 1일 평균자료를 제시하였다. 이는 약 4년간의 자료를 효과적으로 도시하기 위함이었다. Garcia-Anton et al. (2014)은 CRDS(Cavity Ringdown Spectroscopy) 장비로 2초마다 CO<sub>2</sub>와 δ<sup>13</sup>C<sub>CO2</sub>를 측정하였다. 측정기간이 37시간으로 비교적 짧았기 때문에, 2초간 측정 자료를 모두 제시하였다. Lewicki et al.(2010)은 토양 4 cm 상부의 대기 CO<sub>2</sub> 농도를 1초 간격으로 측정하고 3분간 평균값으로 나타낸 바 있다.

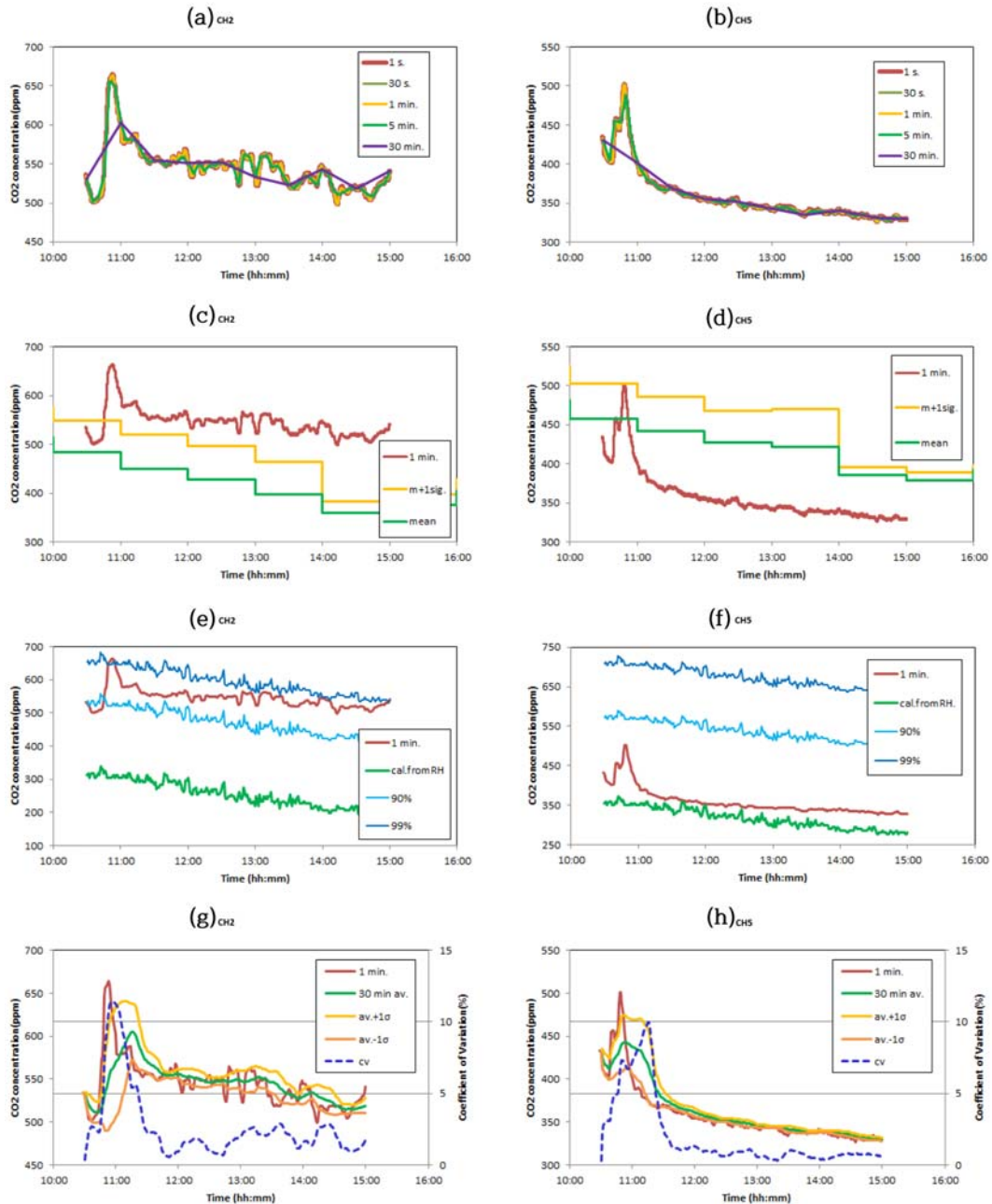
#### 4.2.2. 이상 신호 판별

지표토양의 CO<sub>2</sub> 농도 측정으로 누출여부를 판별하기 위해서는 사회적으로 합의된 판별 방법을 이용할 필요가 있다. 누출여부 또는 누출 기능여부를 판단하는 것은 사회적으로 엄중한 사항이기 때문에 대중이 쉽게 이해할 수 있고, 명료한 판단을 도울 수 있는 통계기법을 활용하는 것이 바람직하다고 생각한다. 이러한 방법으로 자연배경

값을 이용하여 문턱값(threshold value)을 설정하고, 문턱값이 넘는 경우를 누출의심, 누출경고 등 단계적인 경고와 대응이 필요하다. 이 경우, 문턱값 설정의 어려움이 있는데, 특히 토양 CO<sub>2</sub> 농도는 토양특성, 식생, 계절, 날씨 등의 요인에 따라 시공간적으로 변동이 매우 심하기 때문에 넓은 지역에 대하여 자연배경농도를 대표하는 하나의 문턱값을 설정하는 것이 매우 어렵다. 본 연구에서 측정된 지표토양 CO<sub>2</sub>의 자연 배경농도의 경향을 살펴보면, 측정지점마다 측정 농도의 범위가 다른 것은 물론이고, 변동의 폭도 차이가 있었다. 또한 강우 여부에 따라 배경농도의 범위가 달라졌다. 게다가 배경농도 측정을 여름철 8일간만 수행하였기 때문에 계절에 따른 계절별 대표값을 설정하는 것은 불가능하다. 이러한 한계에도 불구하고 다음과 같은 통계적인 방법을 제안하고자 한다.

##### 4.2.2.1. 배경농도의 시간별 평균 + 표준편차

지표토양 CO<sub>2</sub>의 배경농도는 일변화를 나타내기 때문에 특정 시간간격 동안의 평균값 또는 평균값에 표준편차를 더한 값( $m + 1\sigma$ )을 문턱값으로 설정하고, 측정 시 이 문턱값을 넘을 경우 이상값으로 판별하는 방법을 이용할 수 있다. Fig. 11c와 d는 주입 시험 시 챔버 2와 5에서 측정된 CO<sub>2</sub> 농도와 배경농도의 시간별 평균과 평균값에 표준편차를 더한 값을 비교하였다. 챔버 2의 경우 주입 후 모든 데이터가 시간별 평균과 평균에 표준편차를 더한 값을 넘어서고 있어, 주입에 따른 CO<sub>2</sub> 농도의 증가를 분별하기 어렵다(Fig. 11c). 반대로 챔버 5의 경우 CO<sub>2</sub> 주입에 따라 증가된 CO<sub>2</sub> 농도가 시간별 평균을 넘어서고 있으나, 평균에 1 $\sigma$ 를 더한 값을 넘어서지 못하기 때문에 챔버 2와 마찬가지로 자연적인 변화와 분별하기 어렵다(Fig. 11d). 즉 배경농도의 평균값 또는 평균값에 표준편차를 더한 값을 문턱값으로 설정한다면, 측정지점마다 일관적이지 않으며, 따라서 그 효율성도 낮다고 할 수 있다. 기후 조건에 민감한 지표토양 CO<sub>2</sub>에 대하여, 8월에 측정된 시간별 평균과 편차를 이용하여 10월에 측정된 값을 평가하는 것도 문제일 수 있다. 이와 같은 방법을 이용하기 위해서는 배경농도 측정을 계절별로 최소한 1년 이상할 필요가 있다. Schloemer et al.(2013)은 배경농도를 3년 간 모니터링 할 것을 제안한 바 있다. 또한 각 챔버마다 평균과 표준편차가 다르기 때문에 챔버 별로 배경농도의 변화 특성을 분석해야 해서 불편함과 동시에 일관적인 적용이 어려운 단점이 있다. 이와 함께, 강우, 풍향, 풍속 등 다양한 CO<sub>2</sub> 변화 요인에 대한 사전 분석이 필요하다.



**Fig. 11.** These diagrams show comparison of measurement frequency (a: Chamber 2; b: Chamber 5), comparison of surface soil CO<sub>2</sub> concentration with the mean and +1 standard deviation of hourly data measured in baseline (c: CH2; d: CH5), comparison with prediction intervals from a simple linear regression (e: CH2; f: CH5) and comparison with the mean, ± 1 standard deviation, and CV calculated using data for 30 minutes before the measurement (g: CH2; h: CH5)

4.2.2.2. CO<sub>2</sub>-상대습도 회기분석

지표토양 CO<sub>2</sub> 농도와 유관한 상대습도로부터 지표토양 CO<sub>2</sub>의 농도를 예측하고 예측의 경향을 벗어나는 경우를 CO<sub>2</sub>의 이상신호로 판별할 수 있다. 이러한 방법의 유효성을 검증하기 위해, 먼저 배경농도 조사 시 획득된 상대습도(비강우 시 시간별 측정 자료)와 챔버 2(CO<sub>2(CH2)</sub>=7.1 ×

RH - 28.5; r = 0.92; p = 0.00), 챔버 5(CO<sub>2(CH5)</sub>=4.5 × RH + 137; r = 0.89; p = 0.00)의 관측 결과를 이용하여 각각 회기분석을 수행한 후, 얻어진 회기식에 주입 시험 시의 기상자료(상대습도, 1분당 측정 자료)를 대입하여 챔버 2와 5의 지표토양 CO<sub>2</sub> 농도값을 예측하였다(Fig. 11e, f). 챔버 2와 5에서 예측된 CO<sub>2</sub> 농도는 감소하는 경향을 나



타내고 있다. 그러나 전 구간에서 실제 측정된 농도값보다 낮은 예측 결과를 나타내어, 예측된 CO<sub>2</sub> 값으로는 CO<sub>2</sub> 농도의 이상신호를 판별하기 어려웠다. Fig. 11e와 f에는 회기식으로부터 예측된 값의 90, 99% 신뢰구간을 각각 나타내었다. 가령 회기식의 신뢰구간을 넘어서는 데이터가 있을 경우, 이를 예측한 회기식으로 설명하기 어려운 이상값으로 여길 수 있다. 챔버 2의 경우 주입 시 나타난 이상신호가 99% 신뢰구간 밖에 위치하고 있어(Fig. 11e) 회기식의 99% 신뢰구간을 이상신호 판별의 기준으로 삼을 수 있으나, 챔버 5의 경우 측정된 CO<sub>2</sub> 값이 모두 예측된 값의 90%, 99% 신뢰구간 안에 있어(Fig. 11f) 회기식의 90%, 99% 신뢰구간을 이상신호의 판별기준으로 삼을 수 없다. 이와 같이 상대습도로 예측된 CO<sub>2</sub> 값과 신뢰구간으로 이상값을 판별하는 방법은 앞서 설명된 '배경농도의 시간별 평균 및 표준편차와 비교' 방법과 마찬가지로 측정 지점마다 기준을 다르게 적용하여야 하는 단점이 있다. 본 연구에서 상대습도는 연구부지에서 멀리 떨어진(약 5 km, 금강 너머) 지점의 자료를 이용하였고, 회기분석자료(8월)와 예측시점(10월) 간 계절적 차이가 있었다. 또한 배경자료를 살펴보면(Fig. 6) 상대습도와 CO<sub>2</sub> 농도 간에 약간의 지연(lag)이 있는데, 이를 고려하지 않았다. 그러나 지표토양 CO<sub>2</sub>에 영향을 주는 다양한 요소들(기상, 토양 특성 등)에 대한 자료가 충분히 쌓이면 이와 같은 방법도 누출 판별 방법으로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 특히 다양한 기상 파라미터를 이용한 다중회기 분석 등을 적용하면 누출 판별 방법으로 활용도가 높아질 것으로 보인다.

#### 4.2.2.3. 30분 평균 및 변동계수

마지막으로 측정 시점 이전 30분간의 지표토양 CO<sub>2</sub> 농도의 평균, 표준편차, 변동계수(CV(%): coefficient of variation =  $\sigma/\mu \times 100$ )를 활용하여 이상신호를 판별하여 보았다(Fig. 11g, h). 이는 앞서 30분 간격으로 측정 자료를 취득할 경우 CO<sub>2</sub> 측정값이 무너지는 경향을 보고 착안하였다(Fig. 11a, b 참조). 주입 시험 시 주입 전 측정 시간이 30분에 미치지 않아(7분) 10시 58분까지는 30분보다 짧은 구간의 평균, 표준편차, 변동계수를 계산하였다. Fig. 11g와 h는 주입 시험 시 챔버 2와 5의 1분당 측정 자료와 측정 시점의 30분 이전 자료들의 평균, 표준편차, 변동계수(CV<sub>30min</sub>)를 나타내고 있다. 지표토양 CO<sub>2</sub> 농도가 최고점에 도달하는 시점인 약 10시 53분 보다 22분 늦은 11시 15분 경 30분 평균값은 최고점에 도달하였다. 반면 CV<sub>30min</sub>는 10시 54분에 최고에 도달하여 최고 CO<sub>2</sub>

농도 시간보다 1분 정도의 시간 차이 밖에 없었다. 챔버 5의 경우 측정값이 최고 농도에 도달하는 시점(10시 48분) 보다 약 4분 지연된 52분에 30분 평균값이 최고점에 도달하였다. 반면 CV<sub>30min</sub>값은 11시 13분 경(25분 후)에 최고점에 도달하였다. 챔버 2의 경우, 주입 후 1분 간격의 측정값이 주입 전 CO<sub>2</sub> 농도와 차이가 크고 급격한 증가/감소가 나타난 반면, 챔버 5는 주입 전 CO<sub>2</sub> 농도와 주입 후 측정된 최고 농도의 차이가 상대적으로 작고, 완만한 증가/감소가 나타나서 평균과 변동계수의 지연시간의 각각 다르게 나타난 것으로 사료된다. 한편, 측정 시점 이전 30분간의 CV<sub>30min</sub> 값이 10% 또는 5%가 넘어설 때를 이상신호의 판별 기준으로 삼을 수 있다. 가령, 측정 시점 이전 30분 동안 많은 변화가 발생할 경우 CV<sub>30min</sub> 값이 증가하게 되는데, 주입에 따른 CO<sub>2</sub> 농도 증가가 상대적으로 두드러지지 않은 챔버 2, 5의 경우에도 CV<sub>30min</sub>는 10%를 넘게 되어 이상신호의 지시자로 활용 가치가 높다고 할 수 있다. 또 하나의 장점은 비교적 평이한 통계방법을 이용하기 때문에 누구나 받아들일 수 있을 뿐만 아니라, 측정 즉시 계산 값을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 만약 CV<sub>30min</sub>의 기준을 5%로 할 경우 챔버 2와 5는 각각 10시 48분(CO<sub>2</sub> 최고 도달 5분 전)과 41분(CO<sub>2</sub> 최고 도달 6분 전)에 5%를 넘게 되어 조기 경보에 적합할 수 있다. 그러나 자연배경농도 측정 자료에서도 CV<sub>30min</sub>가 5%가 넘는 경우는 챔버 2에서 6회, 챔버 4에서 4회 나타났다(챔버 1, 3, 5에서 자연배경농도의 CV<sub>30min</sub>는 모두 5%를 넘지 않았다). 따라서 CV<sub>30min</sub> 5%는 자연적인 변화의 결과일 수도 있기 때문에 CV<sub>30min</sub>가 5% 이상일 때는 다른 요소도 검토하여 누출 여부를 판단할 필요가 있다. 가령 CV<sub>30min</sub>가 5% 이상일 때 누출의심 경보를 내고, 배경 자료와 비교, 기상 등 환경자료 분석, 현장조사(불포화대 토양 가스, 환경추적자 정밀 조사 등)를 수행하고, 10% 또는 그 이상일 경우 주입 중단 및 정밀 조사 등의 단계별 조치를 취할 수 있다.

## 5. 결 언

한국지질자원연구원에서 개발한 SCM 시스템은 지표토양 CO<sub>2</sub> 농도를 효율적으로 모니터링 할 수 있고, 특히 소규모 주입 시험(4.2 kg CO<sub>2</sub>/30 min)을 통해 토양으로 주입된 CO<sub>2</sub>가 지표로 누출되는 신호를 성공적으로 감지하였다. 측정된 5개의 챔버 중에서 2, 4, 5번 챔버에서는 주입 종료 약 4시간 후부터 자연적인 변화 경향을 나타내었다. 주입 전에 측정된 자연배경농도는 대기의 상대습도

와 부의 상관관계, 기온과는 정의 상관관계를 나타내며, 강우 시 이러한 상관관계는 약해졌다. 지표토양 CO<sub>2</sub> 농도는 1분 간격으로 측정되는 것이 효율적이며, 측정 시점 전 30분간의 변동계수(CV<sub>30min</sub>)가 5%를 넘어갈 경우 자연적인 변동이 아닌 것으로 의심할 수 있는 이상값으로 판별할 수 있다.

지표토양 CO<sub>2</sub> 농도 모니터링 시스템을 개발하고 소규모 주입 시험을 수행한 결과를 토대로 다음과 같이 CO<sub>2</sub> 지중저장 부지 주변에서의 토양 CO<sub>2</sub> 모니터링 방법을 제안하고자 한다.

1) 측정 방법 및 데이터 QC 표준화: 지표토양 CO<sub>2</sub> 농도 측정 방법(챔버의 형상, 센서, 설치 방법)을 표준화하여 다양한 특성의 토양으로부터 획득된 데이터를 비교할 수 있어야 한다. 또한 모니터링 자료의 신뢰성을 높이고, 데이터의 품질을 지속적으로 관리할 필요가 있다. 모니터링 자료는 투명하게 공개되어야 할 필요가 있다. 뿐만 아니라 누출이 의심될 경우 단계별 조치 지침 등을 미리 합의하여 이에 따라 조치가 이루어져야 한다.

2) 모니터링 범위: 광역적으로 최대한 많은 지점에서 지표토양 CO<sub>2</sub> 농도를 측정하는 것이 CO<sub>2</sub> 누출을 감시하는데 효과적이다. 불포화대 토양 CO<sub>2</sub> 농도 측정으로는 누출지점으로부터 10 m 정도 벗어나도 누출을 감지하기 어렵다(Lewicki et al., 2010). 본 연구의 지표토양 CO<sub>2</sub> 농도 측정의 경우에도 누출지점에서 2 m 밖에서는 이상값이 매우 작게 나타나서 판별이 쉽지 않다. 따라서 되도록 많은 지점에서 자주 측정이 이루어져야 한다. 본 연구 결과 1분 간격으로 지표토양 CO<sub>2</sub> 농도를 측정하는 것이 누출 탐지와 데이터 관리에 효율적이라는 결론을 얻었다.

3) 누출 의심 시 단계별 조치: 측정 주기가 짧고 광역에 걸쳐 실시간으로 적용할 수 있는 지표토양 CO<sub>2</sub> 측정을 우선하고, 누출이 의심되는 지역에 대해서는 불포화대에서 다성분 가스 분석(N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Ar, CH<sub>4</sub>, 동위원소)과 추적자 분석을 수행하여 누출을 판별하는 단계별 누출 탐지 전략이 필요하다(Annunziatellis et al., 2008). 따라서 누출이 의심되는 이상신호 판별방법과 그에 따른 조치 요령을 주입 전에 합의하는 것이 필요하다. 가령 지표토양 CO<sub>2</sub> 농도 측정 시 이전 30분간의 변동계수가 5% 이상일 경우, 누출의심 경보를 발령하고 정밀 조사 등의 단계별 조치를 할 수 있다.

4) 모니터링 지점의 선정 및 각 지점 특성화(baseline): 누출이 의심되는 지점(지질구조, 폐관정 주변 등)을 우선적으로 선정할 필요가 있다. 또한 측정 지점의 특성화(지형, 지하수위, 토양 유기물, 미생물 등)를 통하여 이상값

을 충분히 설명할 수 있는 준비가 되어야 한다. 자연배경 농도 측정은 최소 1년 이상 수행하여 계절에 따른 자연적인 CO<sub>2</sub> 농도 변화 데이터를 확보하고 해석 기술을 갖추어야 한다.

6) 주변 환경 모니터링: 기상 등 지표토양 CO<sub>2</sub> 농도에 영향을 줄 수 있는 환경 파라미터들은 CO<sub>2</sub> 측정 지점 인근에서 수행되어야 한다.

## 사 사

본 연구는 한국지질자원연구원에서 수행중인 주요사업인 “지중주입된 이산화탄소 거동 및 누출 모니터링 현장 적용 기술개발(15-3417)”의 일환으로 수행되었습니다.

## References

- Annunziatellis, A., Beaubien, S.E., Bigi, S., Ciotoli, G., Coltella, M., and Lombardi, S., 2008, Gas migration along fault systems and through the vadose zone in the Latera caldera (central Italy): implications for CO<sub>2</sub> geological storage, *Int. J. Greenh. Gas Con.*, **2**, 353-372.
- Beaubien, S.E., Jones, D.G., Gal, F., Barkwith, A.K.A.P., Braibant, G., Baubron, J.C., Ciotoli, G., Graziani, S., Lister, T.R., Lombardi, S., Michel, K., Quattrocchi, F., and Strutt, M.H., 2013, Monitoring of near-surface gas geochemistry at the Weyburn Canda, CO<sub>2</sub>-EOR site, 2001-2011, *Int. J. Greenh. Gas Con.*, **16**, 236-262.
- Bernardo, C. and de Vries, D. F., 2011, Permanent shallow subsoil CO<sub>2</sub> flux chamber for monitoring of onshore CO<sub>2</sub> geological storage sites, *Int. J. Greenh. Gas Con.*, **5**, 565-570.
- Cook, P.J., 2014, Clean Energy, Climate and Carbon, CIR Pub., Seoul(Korean translation version), 273 p.
- Feitz, A., Jenkins, C., Schacht, U., McGrath, A., Berko, H., Schroder, I., Noble, R., Kuske, T., George, S., Heath, C., Zegelein, S., Curnow, S., Zhang, Hui, Sirault, X., Jimenez-Berni, J., and Hortle, A., 2014, An assessment of near surface CO<sub>2</sub> leakage detection techniques under Australian condition, *Energy Procedia*, **63**, 3891-3906.
- Garcia-Anton, E., Cuezva, S., Fernandez-Cortes, A., Benavente, D., and Sanchez-Moral, S., 2014, Main drivers of diffusive and advective processes of CO<sub>2</sub>-gas exchange between a shallow vadose zone and the atmosphere, *Int. J. Greenh. Gas Con.*, **21**, 113-129.
- IPCC (International Panel on Climate Change), 2005, IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Cambridge Univ. Pub., 431 p.

- Jenkins, C., 2013, Statistical aspect of monitoring and verification, *Int. J. Greenh. Gas Con.*, **13**, 215-229.
- Johnson, J.W. and Rostron, B.J., 2012, Geochemical monitoring, in: *B. Hitchon(ed.), Best Practices for Validating CO<sub>2</sub> Geological Storage: Observations and Guidance from the IEAGHG Weyburn-Midale CO<sub>2</sub> Monitoring and Storage Project*, Geoscience Pub., Alberta, Canada, p. 119-154.
- Jung, N.H., Han, W.S., Watson, Z.T., Graham, J.P., and Kim, K.Y., 2014, Fault-controlled CO<sub>2</sub> leakage from natural reservation in the Colorado Plateau, East-Central Utah, *Earth Planet Sc. Lett.*, **403**, 358-367.
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2013, Development of CO<sub>2</sub> Behavior Monitoring Technologies in Deep Geological Media, KIGAM GP2012-011-2013(2), Daejeon, 125 p.
- Krevor, S., Perrin, J.C., Esposito, A., Rella, C., and Benson, S., 2010, Rapid detection and characterization of surface CO<sub>2</sub> leakage through the real-time, measurement of  $\delta^{13}\text{C}$  signature in CO<sub>2</sub> flux from the ground, *Int. J. Greenh. Gas Con.*, **4**, 811-815.
- Lewicki, J.L., Hilley, G.E., Dobeck, L., and Spangler, L., 2010, Dynamics of CO<sub>2</sub> fluxes and concentrations during a shallow subsurface CO<sub>2</sub> release, *Environ. Earth Sci.*, **60**, 285-297.
- NETL (National Energy Technology Laboratory), 2012, Best practices for monitoring, varification, and accounting of CO<sub>2</sub> stored in deep geologic formation-2012 update, DOE/NETL-2012/1568, 136 p.
- Romanak, K.D., Bennett, P.C., Yang, C., and Hovorka, S.D., 2012, Process-based approach to CO<sub>2</sub> leakage detection by vadose zone gas monitoring at geologic CO<sub>2</sub> storage sites, *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L15405.
- Scanlon, B.R., Nicot, J.P., and Massmann, J.W., 2001, Soil gas movement in unsaturated systems, in: *A.W. Warrick(ed.), Soil Physics Companion*, CRC Press, Boca Raton, Florida, p. 297-341.
- Schacht, U. and Jenkins, C., 2014, Soil gas monitoring of the Otway project demonstration site in SE victoria, Austria, *Int. J. Greenh. Gas Con.*, **24**, 14-29.
- Schloemer, S., Furche, M., Dumke, I., Poggenburg, J., Bahr, A., Seeger, C, Vidal, A., and Faber, E., 2013, A review of continuous soil gas monitoring related to CCS - Technical advances and lessons learned, *Appl. Geochem.*, **30**, 148-160.
- Schlömer, S., Möller, I., and Furche, M., 2014, Baseline soil gas measurements as part of a monitoring concept above a projected CO<sub>2</sub> injection formation - A case study from Northern Germany, *Int. J. Greenh. Gas Con.*, **20**, 57-72.
- Zhang, Y., Oldenburg, C.M., and Benson, S.M., 2004, Vadose zone remediation of carbon dioxide leakage from geologic carbon dioxide sequestration, *Vadose Zone J.*, **3**, 858-866.