

Short communication

https://doi.org/10.7745/KJSSF.2017.50.6.554  
pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

## Changes in CO<sub>2</sub> Absorption Efficiency of NaOH Solution Trap with Temperature

Se-In Park, Hyun-Jin Park, Hye In Yang, and Woo-Jung Choi\*

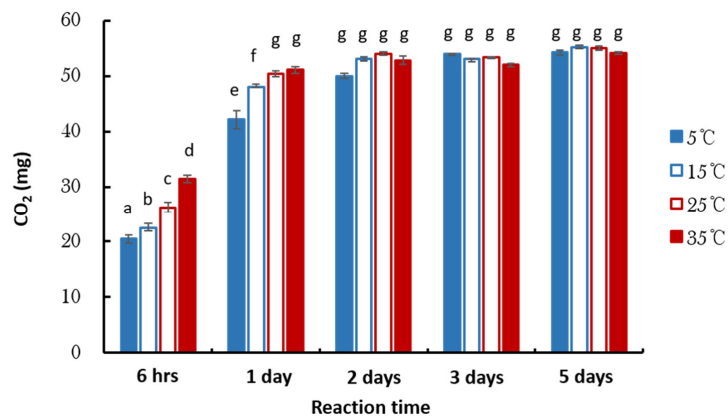
Department of Rural &amp; Biosystems Engineering, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

\*Corresponding author: wjchoi@jnu.ac.kr

### ABSTRACT

**Received:** October 13, 2017**Revised:** November 15, 2017**Accepted:** November 15, 2017

Under the projected global warming, release of carbon as CO<sub>2</sub> through soil organic matter decomposition is expected to increase. Therefore, accurate measurement of CO<sub>2</sub> released from soil is crucial in understanding the soil carbon dynamics under increased temperature conditions. Sodium hydroxide (NaOH) traps are frequently used in laboratory soil incubation studies to measure soil respiration rate, but decreasing CO<sub>2</sub> gas solubility with increasing temperature may render the reliability of the method questionable. In this study, the influences of increasing temperature on the CO<sub>2</sub> capture capacity of NaOH traps were evaluated under 5~35°C temperature range at 10°C interval. Two closed-chamber experiments were performed where NaOH traps were used to capture CO<sub>2</sub> either released from acidified Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> solution or directly injected into the chamber. The sorption of ambient CO<sub>2</sub> within the incubators into NaOH traps was also measured. The amount CO<sub>2</sub> captured increased as temperature increased within 2 days of incubation, suggesting that increased diffusion rate of CO<sub>2</sub> at higher temperatures led to increases in CO<sub>2</sub> captured by the NaOH traps. However, after 2 days, over 95% of CO<sub>2</sub> emitted in the emission-absorption experiment was captured regardless of temperature, demonstrating high CO<sub>2</sub> absorption efficiency of the NaOH traps. Thus, we conclude that the influence of decreased CO<sub>2</sub> solubility by increased temperatures is negligible on the CO<sub>2</sub> capture capacity of NaOH traps, supporting that the use of NaOH traps in the study of temperature effect on soil respiration is a valid method.

**Keywords:** Acid-base titration, CO<sub>2</sub> absorption, CO<sub>2</sub> emission, NaOH trap

Changes in the CO<sub>2</sub> absorption amount of NaOH solution trap with temperature measured using CO<sub>2</sub> emission-absorption method. Standard error bars are provided and some bars are not depicted due to small error. Different letters on the data bars indicate significant ( $P < 0.05$ ) difference among the treatments (temperature and reaction time).



## Introduction

온도 상승에 따른 토양 유기물 분해 속도 변화는 온난 기후 조건에서 토양 유기물 동역학 연구는 물론 지구 탄소 순환 모형에서 중요하게 고려되는 요소이다 (Lindsey et al., 2000; Raich et al., 1992). 토양 유기물 분해 속도는 토양 호흡을 통해 발생하는 이산화탄소 (CO<sub>2</sub>) 플럭스를 측정하여 계산하는데, CO<sub>2</sub> 플럭스는 가스크로마토그래피 (Gas chromatography, GC)나 적외선 분석기 (Infrared analyzer, IR)를 이용하여 가스상의 CO<sub>2</sub>를 직접 측정하거나 (Müller et al., 2010), 발생한 CO<sub>2</sub>를 알칼리 용액 (예를 들면, NaOH)과 반응시켜 중탄산 (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) 형태로 안정화 시킨 후 남은 알칼리를 산으로 역적정하여 분석할 수 있다 (Haney et al., 2008; Rottmann et al., 2009). 분석 방법별로 CO<sub>2</sub> 플럭스를 비교하면, NaOH 방법과 GC의 회수율이 97~102%임에 반해, IR 방법은 104~114%로 다소 과대 평가되지만 밀폐와 같은 인위적인 요인을 제거할 수 있다는 장점이 있다 (Rottmann and Joergensen, 2011).

NaOH 방법은 고가의 장비가 필요 없어 실험실내 향온 배양 실험에서 토양 호흡량을 측정하는 데 가장 빈번하게 이용되지만, 향온 배양 기간 동안 용기를 밀폐시켜야 하기 때문에 토양 미생물에 필요한 산소 공급이 제한적일 수 있다는 단점이 있다 (Lucretia et al., 2012; Rottmann and Joergensen, 2011). 이와 같은 단점에도 불구하고, 특정 처리에 따른 미생물 호흡량 비교 연구에서는 큰 문제 없이 사용된다 (Lim et al., 2012, 2017). 또한, NaOH 방법으로 토양으로부터 방출되는 CO<sub>2</sub>를 100% 포집할 수 있다는 장점이 있어 CO<sub>2</sub>의 탄소동위원소비 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) 분석을 위한 전처리 방법으로도 활용된다 (Harris et al., 1997; Jeon et al., 2017). 토양 호흡 CO<sub>2</sub>의  $\delta^{13}\text{C}$ 를 측정하면 C3 식물과 C4 식물 유래 유기물의 분해 특성을 비교할 수 있다는 장점이 있다 (Boutton, 1996; Bruno, 2005).

하지만, 온도 상승에 따른 토양 호흡 변화 연구에 NaOH 방법을 이용할 경우 CO<sub>2</sub> 가스 용해도가 온도에 반비례하기 때문에 고온 조건에서 CO<sub>2</sub>의 흡수 효율이 낮아 토양 호흡량을 과소평가할 수 있는 우려가 있다 (Fang and Moncrieff, 2001). 1기압에서 CO<sub>2</sub>의 용해도는 온도가 증가함에 따라 0°C, 1.8 cm<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> water에서 20°C, 0.88 cm<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> water 및 40°C, 0.65 cm<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> water로 감소한다 (Shell Internationale Petroleum Maatschappij BV, 1978). 이와 같은 온도에 따른 CO<sub>2</sub>의 용해도 감소는 CO<sub>2</sub>가 순수한 물과 반응하여 탄산(H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)이 생성되고, 약산인 탄산이 이온화 되어 중탄산이온 (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)과 탄산이온 (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)이 생성되는 탄산 평형 시스템의 결과이다 (Reid et al., 1987).



탄산해리상수 (pK<sub>a</sub>)를 고려하면, 강알칼리성 NaOH 용액에서 정반응이 우세하게 되고, 용액의 pH가 12 이상인 조건에서는 대부분 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>로 존재하여 온도 상승시에도 안정적으로 존재할 수 있다 (David, 1990, 1991). 하지만, 온도 상승에 따른 NaOH 용액의 CO<sub>2</sub> 흡수 효율에 대한 연구 결과가 없어 NaOH 방법으로 온도 변화에 따른 토양 호흡량 (CO<sub>2</sub> 발생량) 변화 측정시 결과의 신뢰도에 의문이 제기 되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 이와 같은 의문을 해소하기 위해 온도 변화에 따른 NaOH 용액의 CO<sub>2</sub> 흡수량을 정량하기 위해 1) 온도 상승에 따라 NaOH 용액에서 CO<sub>2</sub>의 용해

도가 감소하여 고온 조건에서 CO<sub>2</sub>의 흡수량이 감소하거나, 2) NaOH 용액은 순수한 물과 달리 탄산 평형에서 정반응이 우세하기 때문에 온도에 따른 CO<sub>2</sub> 흡수량에 차이가 없을 것이라는 두 가지의 상반된 가설을 세워 실험을 실시하였다.

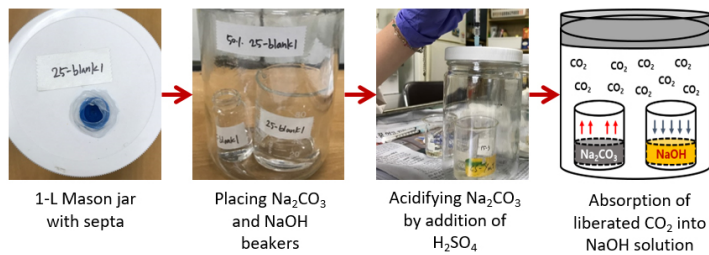
## Materials and Methods

**실험 개요** 본 연구에서는 CO<sub>2</sub> 방출-흡수, CO<sub>2</sub> 주입-흡수, 외기 CO<sub>2</sub> 흡수 등 세 가지 실험을 수행하였다 (Table 1). 각 실험은 5, 15, 25, 35°C에서 5반복 수행하였다. CO<sub>2</sub> 방출-흡수 실험에서는 밀폐 용기에 각각 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 용액과

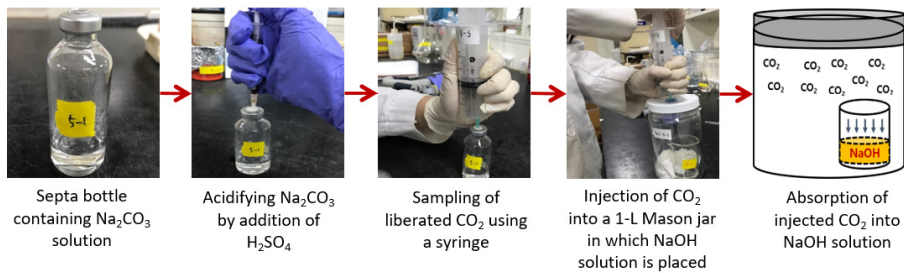
**Table 1.** Experimental outline to determine CO<sub>2</sub> absorption efficiency of NaOH solution.

Experiment	Brief description
1: CO <sub>2</sub> emission-absorption	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> solution was acidified with H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> to liberate CO <sub>2</sub> , and the liberated CO <sub>2</sub> was absorbed into NaOH solution in a closed-top bottle.
2: CO <sub>2</sub> injection-absorption	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> solution was acidified with H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> to liberate CO <sub>2</sub> in a septa bottle, and the liberated CO <sub>2</sub> was collected into a syringe. The CO <sub>2</sub> was injected into a closed bottle in which NaOH solution was contained.
3: Ambient CO <sub>2</sub> absorption	An open-top bottle containing NaOH solution was placed in ambient air conditions and thus ambient CO <sub>2</sub> was absorbed into the NaOH solution.

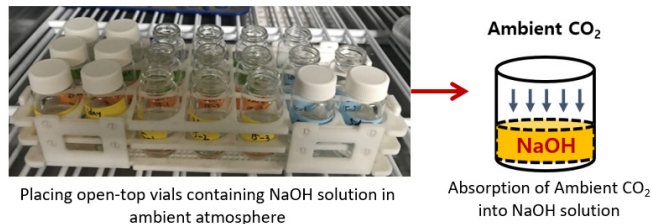
**a. CO<sub>2</sub> emission-absorption method**



**b. CO<sub>2</sub> injection-absorption method**



**c. Ambient CO<sub>2</sub> absorption method**



**Fig. 1.** Experimental procedures for estimation of CO<sub>2</sub> absorption efficiency of NaOH solution with temperature: a. CO<sub>2</sub> emission-absorption method, b. CO<sub>2</sub> injection-absorption method, and c. ambient CO<sub>2</sub> absorption method. More details of the experiment are described in Table 1.

NaOH 용액이 담긴 비이커를 넣고 황산으로 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 용액을 산성화 시켜 CO<sub>2</sub>를 방출 시키고, 방출된 CO<sub>2</sub>가 NaOH에 흡수되도록 하였다 (Fig. 1(a)). 하지만, CO<sub>2</sub> 방출-흡수 실험에서는 NaOH 용액에서의 CO<sub>2</sub> 용해도 뿐만 아니라, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 용액에서의 CO<sub>2</sub> 용해도도 온도 민감성을 나타낼 수 있다. 따라서, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 용액에서의 CO<sub>2</sub> 발생 속도에 대한 온도의 영향을 배제하고 NaOH 용액에서의 CO<sub>2</sub> 용해도의 온도 민감성을 독립적으로 조사하기 위해 CO<sub>2</sub> 주입-흡수 실험을 추가하였다. CO<sub>2</sub> 주입-흡수 실험에서는 별도의 septa 병에 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 용액을 넣고 황산으로 산성화 시킨 후 방출된 CO<sub>2</sub>를 주사기로 포집하여 NaOH 용액이 담긴 별도 용기에 주입하여 NaOH 용액의 CO<sub>2</sub> 흡수 효율을 조사하였다 (Fig. 1(b)). 마지막으로, 외기 CO<sub>2</sub> 흡수 실험에서는 인위적인 CO<sub>2</sub> 발생이나 주입 없이 NaOH 용액을 외기에 노출시켜 NaOH 용액의 CO<sub>2</sub> 흡수 효율을 조사하였다 (Fig. 1(c)).

**CO<sub>2</sub> 방출-흡수 실험** 1 L Mason 병 뚜껑에 구멍을 뚫고 septa cap을 실리콘으로 고정하였다. 6.25% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 용액 20 mL (CO<sub>2</sub> 55 mg, 0.5 N NaOH 10 mL가 포집할 수 있는 CO<sub>2</sub>의 50%에 해당)가 담긴 비이커와 0.5 N NaOH 용액 10 mL가 담긴 바이얼을 Mason 병에 넣고 밀봉한 후 각각의 온도 (5, 15, 25, 35°C)가 설정된 항온배양기에 미리 넣어 용액의 온도를 항온 배양 온도와 평형을 이루도록 하였다. 1시간 후 1 mL 주사기로 진한 황산 0.1 mL를 septa cap을 통해 주입하여 Eq. 1~3의 탄산 평형의 역반응에 의해 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>가 CO<sub>2</sub>로 방출되도록 하였다 (Fig. 1(a)). 0.5 N NaOH에 포집된 CO<sub>2</sub>는 반응 6시간, 1일, 2일, 3일, 5일째에 0.5 N HCl로 적정하여 정량하였다. 각 반응시간별로 별도의 Mason 병을 준비하여 실험하였다.

**CO<sub>2</sub> 주입-흡수 실험** 50 mL septa 바이얼에 0.25 N Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 용액 10 mL를 넣고, septa를 끼우고 클램프를 이용해 밀봉한 후 50 mL 주사기로 바이얼 내부 공기를 제거하였다. 1 mL 주사기로 진한 황산 0.1 mL를 주입하여 CO<sub>2</sub>를 발생시켰고, 1시간 후에 50 mL 주사기로 CO<sub>2</sub>를 포집하였다. 포집된 CO<sub>2</sub>의 NaOH 흡수량을 조사하기 위해, Mason 병에 0.5 N NaOH 용액 10 mL를 담은 비이커를 넣고 CO<sub>2</sub> 방출-흡수 실험에 사용한 septa cap이 장착된 뚜껑을 닫았다. CO<sub>2</sub> 방출-흡수 실험과 동일하게 NaOH 용액의 온도 평형을 위해 Mason 병을 항온배양기에 미리 넣었다. 1시간 후 50 mL 주사기로 Mason 병 안의 공기를 제거하여, 주사기로 포집한 CO<sub>2</sub> 가스를 주입하였다 (Fig. 1(b)). 0.5 N NaOH에 포집된 CO<sub>2</sub>는 반응 6시간, 1일, 2일, 3일, 5일째에 0.5 N HCl로 적정하여 정량하였다. 각 반응시간별로 별도의 Mason 병을 준비하여 실험하였다.

**외기 CO<sub>2</sub> 흡수 실험** 25 mL 바이얼에 0.5 N NaOH 10 mL를 담고 뚜껑을 닫은 상태로 각각의 온도가 설정된 항온배양기에 넣어 NaOH 용액의 온도가 항온 배양 온도와 동일하도록 하였다. 1시간 후 외기 CO<sub>2</sub>가 NaOH에 흡수되도록 바이얼의 뚜껑을 제거하였고, 반응 6시간, 1일, 2일, 3일, 5일째에 0.5 N HCl로 적정하여 정량하였다 (Fig. 1(c)). 각 반응시간별로 별도의 바이얼을 준비하여 실험하였다.

**계산 및 통계분석** CO<sub>2</sub> 농도는 다음의 식으로 계산하였다.

$$\text{CO}_2 = (\text{B}-\text{S}) \times \text{N} \times \text{E} \quad (\text{Eq. 4})$$

여기서, B는 Blank 적정 시 들어간 HCl 양 (ml)으로 본 연구에서는 2반복 하여 평균값을 사용하였다. S는 시료 (Sample) 적정 시 소비된 HCl 양 (mL)이며, N은 적정 시약 (HCl)의 노르말 농도 (0.5 N), E는 CO<sub>2</sub>의 당량 (22 mg)이다.

모든 분석 결과는 Shapiro-Wilkt 검정과 Levene's 검정으로 정규성 및 등분산성을 검정하였다. 모든 분석 값이 정규성을 보이며 이질성이 나타나지 않아 데이터 변환은 하지 않았다. 항온배양기간 중 온도에 따른 CO<sub>2</sub> 흡수량 차이는 SPSS 21.0 (SPSS Inc., Chicago)의 일반선형모형을 이용하여 ANOVA로 평가하였으며, 처리 효과가 인정될 경우 Duncan의 다중 비교를 통해 처리 간 차이를 비교하였다. 모든 통계분석은 95% 수준에서 유의성을 검토하였다.

## Results and Discussion

CO<sub>2</sub> 방출-흡수 실험에 의하면 반응 초기에 해당하는 6시간과 1일째에는 온도가 상승함에 따라 CO<sub>2</sub> 흡수량이 증가하였다 ( $P < 0.001$ ) (Fig. 2(a), Table 2). 구체적으로 반응 6시간째에는 5°C에서 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>의 형태로 투입된 CO<sub>2</sub> (55 mg)의 37%, 35°C에서는 57%가 흡수되었고, 반응 1일째에는 5°C에서 77%, 35°C에서 93%가 흡수되었다. 이와 같은 경향은 온도 상승에 의해 CO<sub>2</sub>의 용해도가 감소하여 NaOH 용액의 CO<sub>2</sub> 흡수능이 감소할 수 있다는 가설 그리고 고온 조건에서 알칼리 용액의 CO<sub>2</sub> 흡수능이 급격하게 감소한다는 Edwards and Sollins (1973)의 보고와 상반된다. 이와 같은 온도 상승에 따른 NaOH 용액의 CO<sub>2</sub> 흡수능 증가는 CO<sub>2</sub> 주입-흡수 실험의 반응 6시간째 (Fig. 2(b))와 외기 CO<sub>2</sub> 흡수 실험의 전체 반응 시간에서도 관찰 되었다 (Fig. 2(c)). 비록 CO<sub>2</sub> 주입-흡수 실험의 반응 1일째 5°C를 제외한 온도 구간에서 온도가 상승함에 따라 CO<sub>2</sub> 흡수량이 감소하는 경향이 나타났지만, 통계적으로 유의하지 않았다 ( $P > 0.05$ ) (Fig. 2(b), Table 2).

**Table 2.** *F* statistics and *P* values for CO<sub>2</sub> absorption of NaOH with temperature during different reaction times in three experiment; CO<sub>2</sub> emission-absorption, CO<sub>2</sub> injection-absorption, and ambient CO<sub>2</sub> absorption<sup>†</sup>.

	Emission-absorption			Injection-absorption			Ambient absorption		
	<i>F</i>	df <sup>‡</sup>	<i>P</i> <sup>§</sup>	<i>F</i>	df	<i>P</i>	<i>F</i>	df	<i>P</i>
Reaction time (RT)	1556	4	< 0.001	728	4	< 0.001	4035	4	< 0.001
Temperature (Temp)	43	3	< 0.001	1	3	0.334	260	3	< 0.001
RT × Temp	16	12	< 0.001	7	12	0.070	19	12	< 0.001

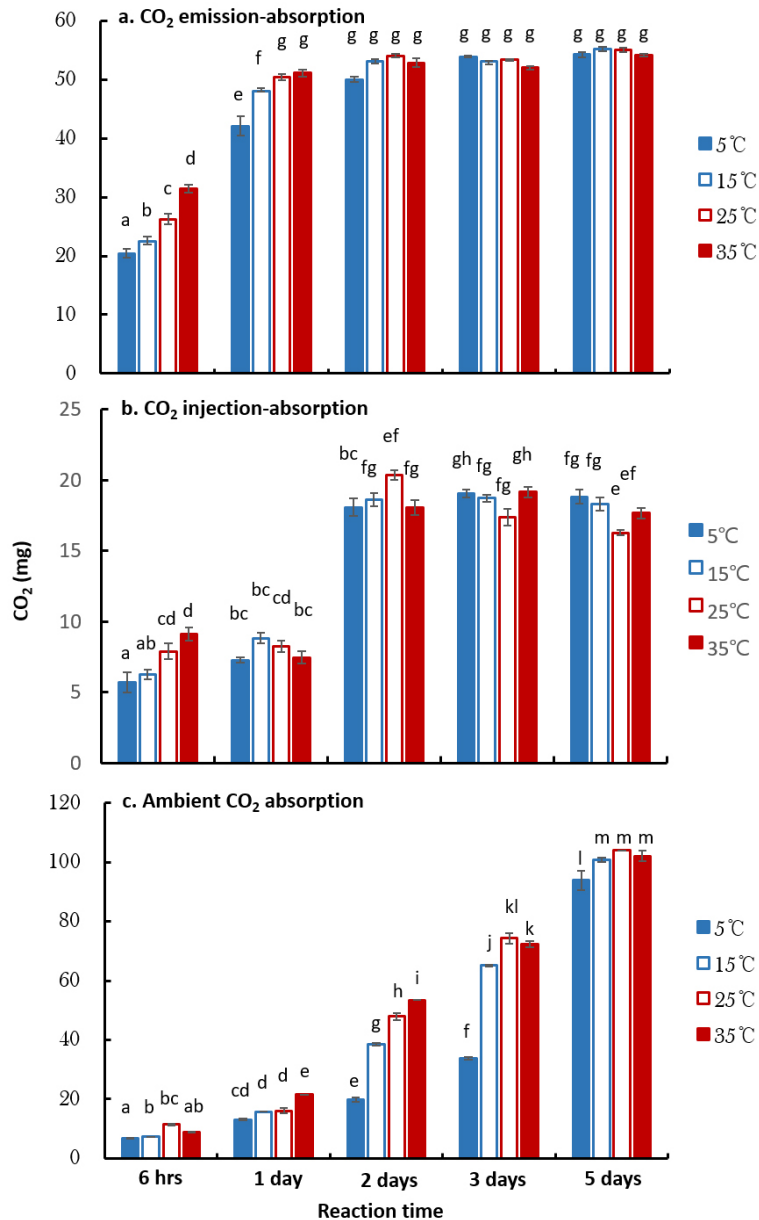
<sup>†</sup>Details of the experiment are described in Table 1 and Fig. 1.

<sup>‡</sup>df is the degree of freedom used in the derivation of the *F* and *P* statistics.

<sup>§</sup>The bold indicates that the effects are significant at  $\alpha = 0.05$ .

CO<sub>2</sub> 방출-흡수 실험에서 이와 같은 온도 상승에 따른 NaOH 흡수량 증가는 일차적으로 온도가 상승함에 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 용액에서의 CO<sub>2</sub> 용해도가 감소하여 CO<sub>2</sub> 방출 속도가 빨라졌기 때문으로 판단된다 (Fig. 2(a)). 즉, NaOH 용액의 CO<sub>2</sub> 흡수능이 온도와 무관하다 하더라도 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 용액에서의 CO<sub>2</sub> 방출 속도가 증가하면 더 많은 CO<sub>2</sub>가 NaOH 용액에 흡수될 수 있기 때문이다. 하지만, 가스상 CO<sub>2</sub>를 직접 주입한 CO<sub>2</sub> 주입-용해 실험 (Fig. 2(b))과 NaOH 용액을 외기 CO<sub>2</sub>에 노출시킨 실험에서도 (Fig. 2(c)) 유사한 경향이 나타났기 때문에 온도 상승에 의한 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 용액에서의 CO<sub>2</sub> 용해도 감소만으로 결과를 설명하기에는 제한이 있다. CO<sub>2</sub> 가스는 확산에 의해 NaOH 용액으로 이동되어 일련의 탄산평형과정을 통해 최종적으로 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>로 안정화되는데, 가스의 확산 속도는 온도에 비례하기 때문에 상승 온도

조건에서 NaOH 용액의 CO<sub>2</sub> 흡수량이 증가할 수 있다 (Belgodere et al., 2015; Cadogan et al., 2014). 예를 들면, Maharajh and Walkley (1972)는 CO<sub>2</sub>의 확산 계수 ( $10^5 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ )가 5°C 0.085, 15°C 1.09, 25°C 1.44, 그리고 35°C 1.82로 온도에 따라 증가한다고 하였다. 따라서, 이상의 결과에 의해 온도가 상승함에 따라 CO<sub>2</sub>의 용해도가 감소하여 NaOH 용액의 CO<sub>2</sub> 흡수능이 감소하지 않고 오히려 CO<sub>2</sub> 분자의 확산 속도가 증가하여 NaOH 용액의 CO<sub>2</sub> 흡수능이 높아졌다.



**Fig. 2.** Changes in the CO<sub>2</sub> absorption amount of NaOH solution trap with temperature measured using a. CO<sub>2</sub> emission-absorption method, b. CO<sub>2</sub> injection-absorption method, and c. ambient CO<sub>2</sub> absorption method. Standard error bars are provided and some bars are not depicted due to small error. Different letters on the data bars indicate significant ( $P < 0.05$ ) difference among the treatments (temperature and reaction time).

한편, CO<sub>2</sub> 방출-흡수 실험에서 반응 2일째부터는 투입한 CO<sub>2</sub>의 95% 이상이 흡수되어 NaOH 용액의 CO<sub>2</sub> 흡수 효율이 높은 것으로 나타났다. Lim et al. (2017)도 퇴비화 기간 동안 방출된 CO<sub>2</sub>를 NaOH 용액으로 포집하여 정량한 결과, 포집된 탄소의 양이 퇴비화 기간 동안 손실된 탄소의 양과 동일함을 확인하여 NaOH 용액의 CO<sub>2</sub> 포집능이 우수함을 보여준 바 있다. 이와 같은 결과는, 토양 호흡에서 발생된 CO<sub>2</sub>의  $\delta^{13}\text{C}$  분석시 NaOH 용액을 이용한 CO<sub>2</sub> 포집 방법의 타당성을 간접적으로 제시한다.

## Conclusions

온도 변화에 따른 토양 호흡량 (CO<sub>2</sub> 발생량) 변화 측정시 NaOH 용액의 CO<sub>2</sub> 흡수능 변화를 조사한 결과, 온도가 높아짐에 따라 CO<sub>2</sub>의 용해도가 감소한다는 이론과는 달리 온도 상승에 따라 NaOH의 CO<sub>2</sub> 흡수량이 많아졌다. 이는 온도가 상승함에 따라 CO<sub>2</sub>의 확산 속도가 증가하여 NaOH 용액에 의한 CO<sub>2</sub> 흡수가 빠르게 일어났기 때문으로 해석되었다. 따라서, 일부의 우려와 달리 NaOH 용액을 이용하여 온도 상승에 따른 토양 호흡량 변화 연구시 온도 상승에 의한 CO<sub>2</sub>의 용해도 감소가 연구 결과에 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 하지만, 일반적으로 알려지고 있는 온도 상승에 따른 토양 호흡량 증가 경향이 단순히 유기물 분해 속도 증가만을 반영하지 않고, 생성된 CO<sub>2</sub>의 확산 속도 증가도 함께 반영할 수도 있기 때문에 이에 대한 추가적인 검토가 필요하다.

## Acknowledgement

This work was supported by the Korea Foundation for Advancement of Science & Creativity (KOFAC) funded by the Korean Government (MOE).

## References

- Belgodere, C., J. Dubessy, D. Vautrin, D.M.C. Caumon, J. Sterpenich, J. Pironon, P. Robert, A. Randi, and J.P. Birat. 2015. Experimental determination of CO<sub>2</sub> diffusion coefficient in aqueous solutions under pressure at room temperature via Raman spectroscopy: impact of salinity (NaCl). *J. Raman Spectrosc.* 46:1025-1032.
- Boutton, T.W. 1996. Stable Carbon Isotope Ratios of Soil Organic Matter and their Use as Indicators of Vegetation and Climate Change, p. 47-82. In T.W. Boutton, S.-I. Yamasaki (eds.) *Mass Spectrometry of Soils*. Marcel Dekker, New York, USA.
- Bruno, G. 2005. Compound-specific stable-isotope ( $\delta^{13}\text{C}$ ) analysis in soil science. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168:633-648.
- Cadogan, S.P., G.C. Maitland, and J.P. Martin Trusler. 2014. Diffusion coefficients of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> in water at temperatures between 298.15 K and 423.15 K at pressures up to 45 MPa. *J. Chem. Eng. Data* 59:51-525.
- David, R.L. 1990-1991. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 71th ed., Boca Ration, Ann Arbor, Boston, CRC Press.
- Edwards, N.T. and P. Sollins. 1973. Continuous measurement of carbon dioxide evolution from partitioned forest components. *Ecology* 54:406-412.
- Fang, C. and J.B. Moncrieff. 2001. The dependence of soil CO<sub>2</sub> efflux on temperature. *Soil Biol. Biochem.* 33:155-165.
- Haney, R.L., W.F. Brinton, and E. Evans. 2008. Soil CO<sub>2</sub> respiration: Comparison of chemical titration, CO<sub>2</sub> IRGA analysis and the Solvita gel system. *Renewable Agric. Food Syst.* 23(2):171-176.

- Harris, S., L.K. Porter, and E.A. Paul. 1997. Continuous flow isotope ratio mass spectrometry of carbon dioxide trapped as strontium carbonate. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal.* 28:747-757.
- Jeon, B.J., H.J. Park, W.J. Choi, Y.S. Park, S.M. Lee, and K.S. Yoon. 2017. Comparison of solidification pretreatment methods for the determination of  $\delta^{13}\text{C}$  of dissolved organic carbon: alkaline persulfate oxidation-carbonate precipitation vs. freeze drying. *Korean J. Environ. Agric.* 36:113-118.
- Lim, S.S., H.J. Park, X. Hao, S.I. Lee, B.J. Jeon, J.H. Kwak, and W.J. Choi. 2017. Nitrogen, carbon, and dry matter losses during composting of livestock manure with two bulking agents as affected by co-amendments of phosphogypsum and zeolite. *Ecol. Eng.* 102:280-290.
- Lim, S.S., K.S. Lee, S.I. Lee, D.S. Lee, J.H. Kwak, X. Hao, H.M. Ro, and W.J. Choi. 2012. Carbon mineralization and retention of livestock manure composts with different substrate qualities in three soils. *J. Soils Sediments* 12:312-322.
- Lindsey, E.R., G.H. Thomas, and D.B. Richard. 2000. Controls on soil respiration: Implications for climate change. *Biogeochemistry* 48:1-6.
- Lucretia, A.S., J.D. Reeder, W. Hunter, and L.R. Ahuja. 2012. Rapid and cost-effective method for soil carbon mineralization in static laboratory incubations. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal.* 43:958-972.
- Müller, E., N. Rottmann, A. Bergstemann, H. Wildhagen, and R.G. Joergensen. 2010. Soil CO<sub>2</sub> evolution rates in the field—a comparison of three methods. *Arch. Agron. Soil Sci.* 57(6):597-608.
- Raich, J.W. and W.H. Schlesinger. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus Ser. B-Chem. Phys. Meteorol.* 44(2):81-99.
- Reid, R.C., J.M. Prausnitz, and B.E. Poling. 1987. *The Properties of Gases and Liquids*. 4th ed., McGraw-Hill, Boston.
- Rottmann, N. and R.G. Joergensen. 2011. Measuring the CO<sub>2</sub> production from maize-straw-amended soil columns—a comparison of four methods. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 174:373-380.
- Rottmann, N., J. Dyckmans, and R.G. Joergensen. 2009. Microbial use and decomposition of maize leaf straw incubated in packed soil columns at different depths. *Eur. J. Soil Biol.* 46:27-33.
- Shell Internationale Petroleum Maatschappij BV, 1978. *Physical and Engineering Data*. Hague, The Netherland.