

## 이산화탄소 지중저장 시설의 잠재적 누출 판단을 위한 DGCI(Dark Green Color Index) 적용 가능성 평가

유신이 · 송윤진 · 오희주 · 김유진 · 유가영<sup>†</sup>

경희대학교 환경학 및 환경공학과

### Applicability of DGCI (Dark Green Color Index) to Assess Potential Impacts of CO<sub>2</sub> Leakage from the Geological Storage Site

Yoo, Sin Yee, Song, Yoon Jin, Oh, Hee Joo, Kim, You Jin and Yoo, Ga Young<sup>†</sup>

Dept. of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University, Yongin 446-701, Korea

#### ABSTRACT

The carbon capture and storage (CCS), which collects and stores carbon dioxide in a geological site, is a promising option to mitigate climate change. However, there is the possibility of carbon dioxide leakage from the soil in the steps of collecting, transporting, and storing. To ensure the feasibility of this technology, it is important to monitor the leakage of carbon dioxide and to assess the potential impacts. As plants are sensitive to the changes in carbon dioxide in the soil environment, we can utilize plant parameter to detect the carbon dioxide leakage. Currently, chlorophyll a content is a conventional index indicating the changes in plants, however, this method is labor intensive and it only utilizes a small portion of leaves. To overcome its limitations, a simple spectroscopic parameter, DGCI (dark green color index), was suggested as an easy and quick indicator. In this study, we compared the values of chlorophyll a contents with DGCI from the experiment investigating the impacts of high underground CO<sub>2</sub> on grape plants. Results suggest that DGCI had high correlation with chlorophyll a contents and it has high potential to be utilized as an easy indicator to monitor plants' responses to CO<sub>2</sub> treatment.

**Key words:** CCS (Carbon Capture and Storage), DGCI (Dark Green Color Index), Chlorophyll a Content, CO<sub>2</sub> Leakage, Environmental Impact Assessment

#### 1. 서 론

현재 기후변화 완화기술로 제안된 이산화탄소 포집 및 저장(Carbon Capture and Storage; CCS) 기술은 석유화학공장, 화력발전소, 시멘트공장, 제철소 등 화석연료를 주 에너지원으로 사용하는 이산화탄소 대량 배출원에서 발생하는 이산화탄소를 대기로 배출되기 전에 포집한 후, 파이프라인과 선박 등을 이용하여 수송하고, 다시 이를 영구적으로 격리하는 기술이다. 전 세계적으로 영구적인 격리를 위해서 여러 방안이 제시되고 있는데, 그 중에서 육상 저층 내에 이산화탄소를 주입하여 저장하는 기술이 가장 활발하게 시도되고 있다(IEA, 2012). 하지만 CCS의 각 단계, 즉 포집, 수송, 저장과정 중에서 자

연적 지층교란이나 파이프라인 자체의 부식, 접합부의 손실 등 토양으로의 이산화탄소 누출이 발생 가능하며, 이는 환경 안전성 문제를 유발시킬 수 있다. 특히 식물의 경우, 토양에서의 이산화탄소 누출에 민감하게 반응한다. 고농도 지중 이산화탄소에 식물이 노출된 경우, 광합성 능력은 감소하고, 어린잎은 빠른 노화가 진행되며, 산소부족현상으로 인해 식물의 영양분 섭취 및 발아 억제가 발생한다고 보고되고 있다(Wu Y *et al.*, 2014; Janice A Lake, 2013; Manal Al-Traboulsi *et al.*, 2012; Patil RH, 2012). 이는 잎의 변색 현상과 함께 바이오매스 감소로 이어지게 된다(Lake JA *et al.*, 2013; Ravi H. Patil *et al.*, 2010). 따라서 식물의 변화를 통해 이산화탄소 누출을 간접적으로 감지할 수 있다. 현재 식물의 변화를 대표적으로 나타내는

<sup>†</sup> Corresponding author: [gayoo@khu.ac.kr](mailto:gayoo@khu.ac.kr)

Received August 30, 2016 / Revised September 12, 2016 / Accepted September 23, 2016

민감한 지표로는 엽록소 함량이 널리 활용되고 있다.

엽록소함량 측정법에는 직접 측정법과 간접 측정법이 있다. 직접 측정법의 대표적인 방법인 아세톤 추출법은 일반적으로 가장 많이 사용되어 흡광계수가 잘 측정되어 있고, 엽록소를 정밀하게 측정할 수 있는 것이 장점이다(Park *et al.*, 2015). 하지만 추출용매로 아세톤을 사용하면 흡광도를 측정하는 과정에서 혼탁이 일어날 수 있으며, 엽 시료를 갈거나 원심분리한 후 곧바로 흡광도를 측정해야 하는 단점이 있다(Barnes *et al.*, 1992). 간접측정법 중 하나인 간이 엽록소 측정기법(SPAD chlorophyll meter)은 간편하게 엽록소 함량을 측정할 수 있으나, 비용이 많이 들고 SPAD가 6 mm<sup>2</sup>의 좁은 면적을 다루고 있다는 점에서 식물 개체의 대표성을 보여주기엔 충분하지 않다는 한계를 가지고 있다(Zhang *et al.*, 2008).

Rorie *et al.*(2011)은 이러한 한계들을 보완하면서 간편하고 저렴한 방법으로 DGCI(Dark green color index) 지표를 제안하였다. DGCI는 카메라로 식물체의 잎을 촬영하고, 그것으로 잎의 광학적 특성(색도, 채도, 명도)을 추출하여 계산하는 디지털 분석이다. Rorie *et al.*(2011)의 연구에서 DGCI가 식물의 수확량 및 SPAD로 측정된 엽록소 함량과 양의 상관관계가 있었다. 이는 DGCI가 식물의 성장 및 생리적 특성의 변화를 보여주는 유용한 지표였음을 보여준다.

본 연구는 CCS 저장시설의 잠재적 이산화탄소 누출을 온실 규모(mesocosm)에서 모의하여 이에 따른 식물체의 반응을 잎의 광학적 특성변화를 통해 관찰하였다. 연구목적은 카메라를 이용하여 얻은 디지털 광학정보를 간단한 소프트웨어를 통해 변환시킨 색지수인 DGCI의 타당성을 분석하는 것이다. 또한 이 지수가 이산화탄소 처리에 따른 식물의 반응을 잘 구별할 수 있는 지표로 현장에서 적용 가능한지 판단하는 데 있다.

## 2. 실험방법

### 2.1 토양과 식물 준비

토양은 육모용 상토와 무기질 토양을 준비하였다. 육모용

상토는 경기도 수원시 농자재 마트에서 구입하였으며, 무기질 토양은 경기도 수원시 골재 판매처에서 구입하였다. 육모용 상토와 무기질 토양의 기초분석은 각각 pH, 총 탄소 및 질소, 구성성분 비율 및 토성에 대해 실시하였다. pH는 토양과 증류수를 1:5(w/v)의 비율로 혼합하여 1시간 교반 후 pH meter (Orion 3Star, Thermo, USA)로 측정하였다. 총 탄소 및 질소 함량은 Carlo Erba NS 1500 C/N analyzer(Carlo Erba, Milan, Italy)를 이용하여 분석하였다. 육모용 상토의 구성성분 비율은 제조사로부터 제공받았으며, 무기질 토양의 토성은 비중계법에 따라 분석한 후 USDA의 기준에 따라 분류하였다. 토양 기초 분석 결과는 Table 1에 나타내었다.

본 연구에서 사용된 식물 종은 머루(*Vitis coignetiae*)이며, 과중 후 2년간 생육시킨 묘목을 경기도 수원시 농자재 마트로부터 구입하였다. 머루는 중성 및 알칼리 토양에서 잘 자라며, 주로 일본과 한국 등 동아시아에서 자생하는 것으로 알려져 있다. 따라서 머루가 이산화탄소 누출로 인해 예상되는 산성화된 토양에서 그 생장이 다른 식물들에 비해 보다 민감하게 영향을 받을 것으로 예상되어 선정하였다.

### 2.2 온실관리 및 기체 주입

본 실험은 자체 제작한 성장 실험 용기에서 진행되었는데, 이는 식물을 기를 수 있는 세 개의 공간(길이 20 cm, 너비 20 cm, 높이 30 cm)과 그 아래쪽에 기체 순환 및 확산을 돕는 큰 공간으로 구성되어 있다(Fig. 1(a)). 각 화분 공간 아랫면에는 9개의 구멍(2 cm in diameter)이 존재하는데, 이는 토양 입자가 유실되는 것을 막고, 기체가 토양 내로 유입될 수 있도록 mesh를 이용하여 덮어주었다. 화분 공간에는 준비한 육모용 상토와 무기질 토양을 Fig 1(a)와 같이 층을 이루도록 조성하였다. 머루 묘목은 비교적 건강 상태가 유사한 개체를 선별하여 2015년 7월 15일에 성장 실험 용기에 식재하였으며, 선별 개체들은 실험 시작 전 약 한 달간 적응시켰다.

기체 주입 실험은 2015년 8월 20일부터 9월 22일까지 경희대(경기도 용인시) 내에 설치된 온실에서 진행되었다. 처리구

Table 1. Basic characteristics of the potting soil and mineral soil

Soil	pH	TN	TC	Composition					
				----- % -----					
				- g · kg <sup>-1</sup> soil -	Zeolite	Pearlite	Vermiculite	Coco peat	Peat moss
Potting	6.87	6.30	390.32	4	7	6	68	14.73	0.27
Mineral	6.80	0.19	3.02	4	26	70			

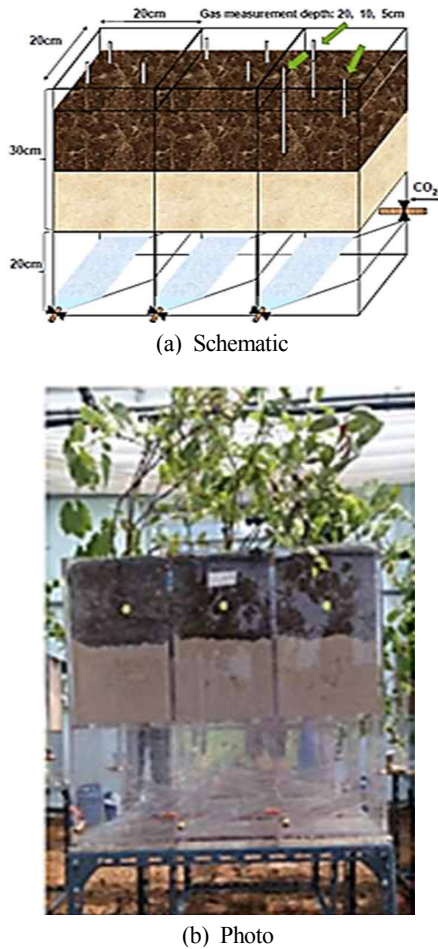


Fig. 1. CO<sub>2</sub> injection box (from Ko *et al.*, 2016).

(CG: CO<sub>2</sub> Gas)는 99.99%의 CO<sub>2</sub> 기체를 400 mL min<sup>-1</sup>의 유량으로 주입하였으며, 대조구(BG: Blank Gas)는 어떠한 기체도 처리하지 않은 상태로 준비하였다. 처리구 및 대조구에 대해서 9개의 머루를 이용하여 아홉 번 반복하였다. 또한 토양 수분은 20~30%(v/v) 유지할 수 있도록 물을 공급하였으며, 온실 내의 온도는 28±4℃를 유지하였다.

### 2.3 잎 촬영, 이미지 분석 및 DGCI 계산

잎 채취는 각 그루별 동일 높이에서 크기가 유사한 것으로 한 장에서 두 장을 실험 시작 후 일주일 간격으로 진행하였다. 채취한 시료를 조도 300 Lux의 환경에서 standard disk(표준 촬영판) 위에 올려놓고, 시료로부터 35 cm 거리에서 디지털 카메라(Sony DSC-HX9V)를 이용하여 촬영하였다. Standard disk(표준 촬영판)는 210 × 297 mm(가로 × 세로) 크기로 지름이 9 cm이고, RGB 값이 192/184/49인 노란색 표준원과 43/

92/63인 초록색 표준원, 그리고 210 × 160 mm(가로 × 세로)의 분홍색 촬영 section으로 구성하였다. 촬영된 이미지는 JPEG (Joint photographic experts group) 형태로 저장하였고, 이미지 평가 프로그램(Image J Ver. 1.4.3.67, USA)을 이용하여 RGB (Red-Green-Blue) 광량을 분석하였다. 분석된 RGB 광량에 의해 Hue(색상), Saturation(채도) 및 Brightness(명도)를 아래의 식에 따라 계산하였다.

Hue(색상)

$$\text{If } \max(\text{RGB}) = \text{R}, 60 \times \{(\text{G}-\text{B})/[(\max(\text{RGB})-\min(\text{RGB}))]\} \quad (1a)$$

If  $\max(\text{RGB}) =$

$$\text{G}, 60 \times \{2 + \{(\text{B}-\text{R})/[(\max(\text{RGB})-\min(\text{RGB}))]\}\} \quad (1b)$$

If  $\max(\text{RGB}) =$

$$\text{B}, 60 \times \{4 + \{(\text{R}-\text{G})/[(\max(\text{RGB})-\min(\text{RGB}))]\}\} \quad (1c)$$

Saturation(채도)

$$\{[(\max(\text{RGB})-\min(\text{RGB}))/\max(\text{RGB})]\} \quad (2)$$

Brightness(명도)

$$\max(\text{RGB}) \quad (3)$$

위 과정을 통해 구한 HSB(Hue-Saturation-Brightness) 값을 DGCI 값으로 변환하기 위해 Rorie(2010)와 Karcher and Richardson(2003)의 방법으로 진행하였다.

$$\text{DGCI} = [(\text{Hue}-60)/60 + (1-\text{Saturation}) + (1-\text{Brightness})]/3 \quad (4)$$

식 (4)를 통해 산출된 카메라 촬영 DGCI 값은 이미지 프로그램의 표준 DGCI 값과 비교하여 변환식을 도출하였다. 도출된 변환식을 이용하여 카메라 촬영 DGCI 값을 표준 DGCI 값으로 전환하였다(Rorie *et al.*, 2011).

$$\text{Slope} = (\text{Known Green DGCI} - \text{Observed Green DGCI}) \times (\text{Known Yellow DGCI} - \text{Observed Yellow DGCI})^{-1} \quad (5)$$

$$\text{Y intercept} = \text{Known Yellow DGCI} - (\text{Slope} \times \text{Observed Yellow DGCI}) \quad (6)$$

$$\text{Corrected leaf DGCI} = (\text{Slope} \times \text{Observed Leaf DGCI}) + Y \text{ intercept} \quad (7)$$

2.4 엽록소 α 함량 측정

잎 촬영이 진행된 동일 날짜에 잎 시료를 1,000 mm<sup>2</sup> 이하의 크기로 자른 뒤, 0.1 g 채취하여 90% 아세톤 3 mL와 섞은 후 막자사발을 이용하여 분쇄하였다. 분쇄된 잎 시료는 15 mL 튜브에 옮기고, 막자사발에 남은 잔여물들은 남지 않을 때까지 아세톤으로 여러 번 씻어내어 튜브에 옮겼다. 시료가 담긴 튜브를 24시간 동안 세워둔 후, 원심분리를 통해 상등액을 분리하였다. 분리한 상등액은 spectrophotometer로 663 nm, 645 nm, 470 nm의 파장에서 흡광도를 측정하였고, 이 값을 이용하여 식 (8)에 따라 엽록소 α 함량을 계산하였다.

$$\text{Chlorophyll } \alpha \text{ [milligrams/milliliter (mg/mL)]} = 12.7 A_{663} - 2.69 A_{645}$$

A<sub>645</sub> = absorbance at a wavelength of 645 nm.

A<sub>663</sub> = absorbance at a wavelength of 663 nm.

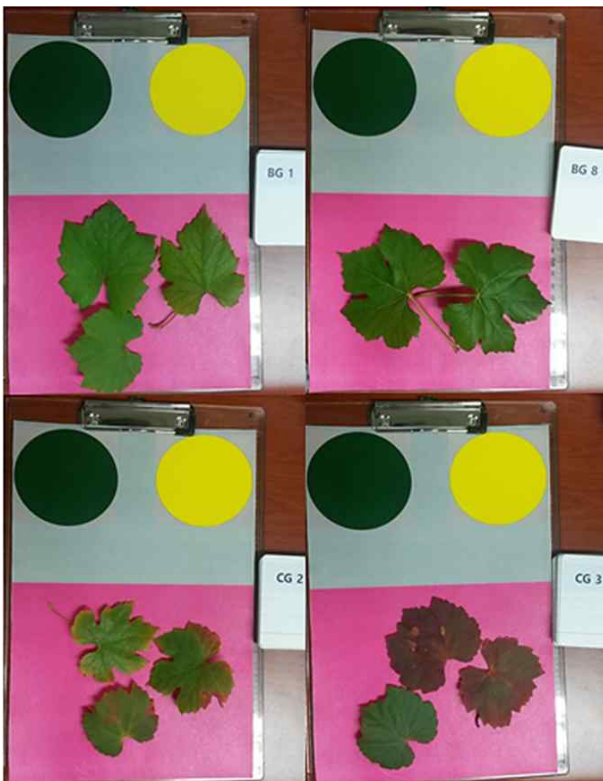


Fig. 2. Photos of leaves.

$$\text{Total chlorophyll } \alpha \text{ (mg) in original tissue sample} = \text{Chlorophyll } \alpha \text{ (mg/mL)} \times \text{final volume (mL)} \quad (8)$$

2.5 상관 및 통계분석

머루의 엽록소 α 함량과 DGCI의 관계, 이산화탄소 처리방법별 DGCI 통계분석은 R version 3.2.3(R Development Core Team, 2015)을 이용하여 95% 신뢰수준에서 통계분석을 수행하였다. 분석은 머루의 엽록소 α 함량, DGCI 및 이산화탄소 처리법(BG, CG)에 대해 실시하였고, 이를 통해 머루의 엽록소 α 함량과 DGCI의 Pearson 상관관계를 분석하였으며, DGCI에 이산화탄소 처리가 미치는 영향은 분산분석법을 활용하였다.

3. 결과 및 고찰

이산화탄소를 누출시킨 처리구(CG)와 대조구(BG)에서 DGCI와 엽록소 α 함량 간의 상관관계는 측정 날짜 별로 변화하였다. 주입초기(8월 20~27일) 및 주입후기(9월 9~22일)에서는 BG와 CG 처리구 모두에서 두 변수 간의 유의한 상관관계를 볼 수 없었다. 이는 실험이 시작된 직후 식물이 변화된 환경에 적응하는 시기가 필요하였고, 실험이 지속되어감에 따라 특히 이산화탄소 처리구(CG)에서는 식물이 고사하는 등 생장속도가 저해되었기 때문으로 사료된다.

DGCI와 엽록소 함량간의 상관계수는 일반 환경(BG)에서 이산화탄소가 누출된 환경(CG)보다 더 높았는데(Fig. 3), 이는 이산화탄소 누출로 식물의 생장이 저해되어 고사된 잎이 많아짐으로 인해 엽록소 함량 추출의 한계가 존재했기 때문이다. 한편, 카메라를 이용한 광학적 지수인 DGCI는 고사된 식물체 잎의 광학적 성질도 그대로 포함하고 있으므로 처리구에 따른 형태적 변화가 이 지수를 계산하는 데에 문제가 되지 않았다. 이 이유로 DGCI는 식물체의 반응을 종합적으로 보여주는 유용한 지표로의 가능성이 있다고 판단하였다. 이와 일관성 있는 결과는 Fig. 4에서 보여진다. DGCI 및 엽록소 α 함량은 시간이 지남에 따라 전반적으로 감소하는 패턴을 보였다. 이는 식물체의 생장이 8월 20일에서 9월 22일 사이, 일평균 기온이 26.1℃에서 22.0℃로 변함에 따라 점차 느려지고 있음을 의미한다. 그러나 시간에 따른 두 변수의 변화패턴은 서로 차이가 있었다. 시간에 따른 DGCI의 변화는 8월 28일부터 9월 1일 사이에 크게 감소한 반면, 같은 기간 엽록소 α의 함량은 소량만 감소하였고, 엽록소 α의 큰 감소는 오히려 9월 1일에서 9월 8일 사이에 보여졌다. 이는 DGCI가 엽록소 α 함량에 비하여 계절적 변화를 민감하게 반영하고 있음을 의미한다. 또한 이산화탄소 처리 영향에 대해서도 DGCI 변화가 엽록소 α 함량 변화보

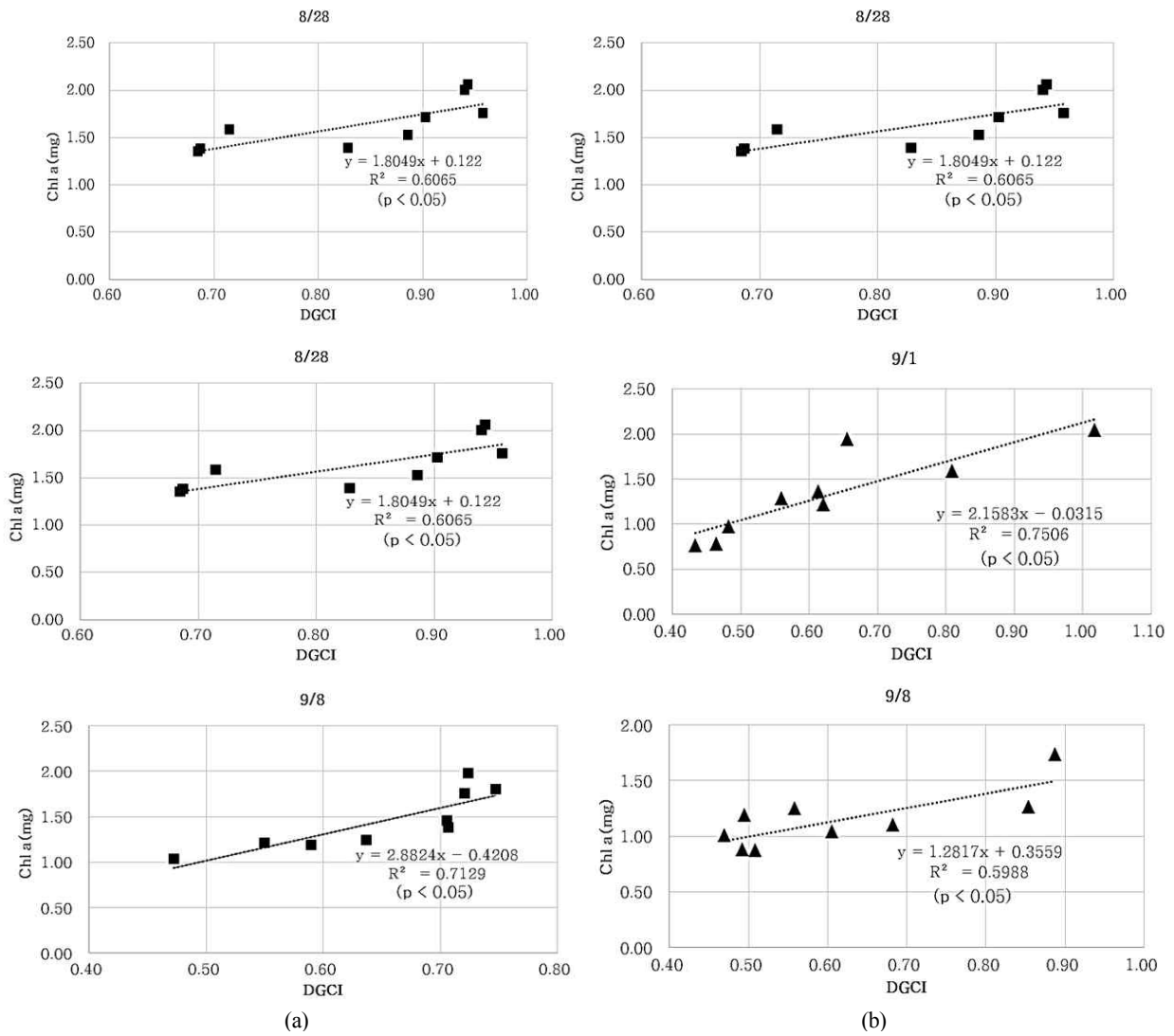


Fig. 3. Correlations between DGCI and chlorophyll a content in the (a) BG (no gas injection) and (b) CG (CO<sub>2</sub> injection) treatments on August 28th, September 1st, and September 8th.

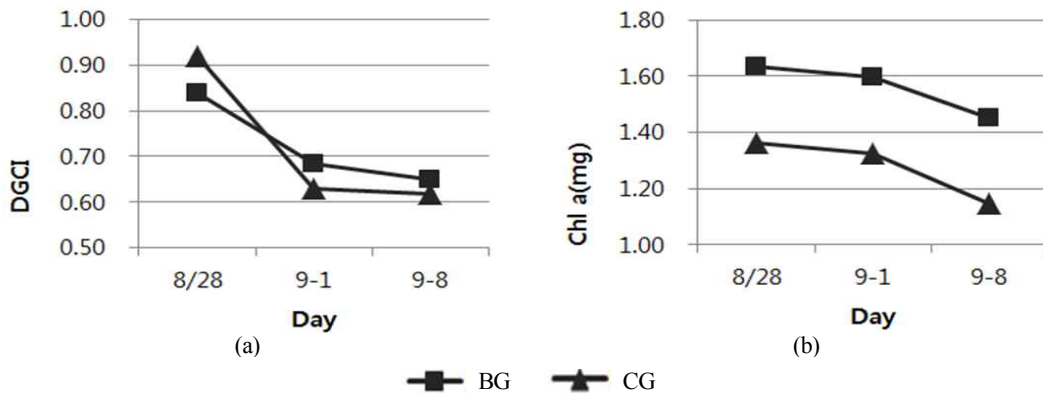


Fig. 4. Temporal change in the (a) DGCI and (b) chlorophyll a content during August 28th and September 8th.

다 더 민감하였는데, 엽록소  $\alpha$  함량의 경우는 BG 및 CG의 시간적 변화 패턴이 동일하여 처리구 별 차이를 보기 힘들었던 반면, DGCI는 9월 1일부터 BG에 비해 CG에서 유의하게 낮은 수치를 보임으로써 이산화탄소 처리에 따른 영향을 보기에 적합한 변수임을 알 수 있다. 그러나 처리구에 따른 DGCI의 차이가 9월 8일 자료에서는 보이지 않는데, 이는 이미 식물이 성장속도가 느린 단계에 진입하여 두 처리구별 차이를 보기 어려웠기 때문으로 사료된다.

따라서 향후 연구에서는 식물의 성장 속도가 가장 활발한 시기에 DGCI와 엽록소  $\alpha$  함량간의 상관관계가 높았던 점을 고려하여, 현장에서 이산화탄소 누출에 따른 차이를 모니터링하기 위해서는 DGCI 측정시기를 신중히 결정해야 할 것이다. 또한 다양한 광도조건의 변화를 통해 DGCI와 엽록소  $\alpha$  함량간의 높은 상관관계를 보이는 조건을 찾아 이를 통제, 유지할 수 있는 환경 설계가 함께 병행되어야 할 것이다. 환경 설계는 실제 산림분야에서 인공위성 및 드론을 이용한 광학적 자료 도출에서 적용하는 카메라 측정원리 및 기기의 사용을 적용하여 실시할 수 있을 것이다.

## REFERENCES

- IEA(OECD).2012. Energy technology perspectives 2012: Pathways to a clean energy system. France.
- Barnes JD, Balaguer L, Manrique E, Elvira S, Davison AW. 1992. A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls a and b in lichens and higher plants. Environmental and Experimental Botany. Doi:10.1016/0098-8472(92)90034-Y
- Park JH, Lee KJ, Cho JW, Kang SH. 2015. A study on comparison analysis of chlorophyll sensor with acetone extraction for chlorophyll measurement in the Nakdong River. Journal of Korean Society of Water and Wastewater 29 (3):325-335.
- Zang J, AM Blackmer, JW Ellsworth, KJ Koehler. 2008. Sensitivity of chlorophyll meters for diagnosing nitrogen deficiencies of corn in production agriculture. J Agron 100:543-550.
- Rorie RL. 2010. Characterizing leaf N with digital images in corn and the association of "greenness" with yield. M.S.thesis. University of Arkansas(Fayetteville).
- Karcher DE, Richardson MD. 2003. Quantifying turfgrass color using digital image analysis. Crop Science. Doi: 10.2135/cropsci2003.9430.
- Lake JA, Smith KL, Steven MD, Lomax BH. 2013. COOLTRANS-environmental impacts of CO<sub>2</sub> leakage into the soil environment. The 4th International Forum on the Transportation of CO<sub>2</sub> by pipeline. Gateshead(UK).
- Patil RH, Colls JJ, Steven MD. 2010. Effects of CO<sub>2</sub> gas as leaks from geological storage sites on agro-ecosystems. Energy 35:4587-4591.
- Rorie RL, Purcell LC, Morteza M, Karcher DE, Andy KC, Marsh MC, Longer DE. 2011. Association of "Greenness" in corn with yield and leaf nitrogen concentration. Agronomy Journal volume 103(2):529. Doi: 10.2134/agronj 2010.0296
- Manal Al-Traboulsi, Sofie SjÖgersten, Jeremy Colls, Michael Steven, Colin Black. 2012. Potential impact of CO<sub>2</sub> leakage from carbon capture and storage systems on field beans (*Vicia faba*). Physiologia Plantarum 146:261-271. Doi: 10.1111/j.1399-3054.2012.01620.x
- Janice A lake, Smith KI, MD Steven, Barry H Lomax. 2013. COOLTRANS-Environmental impacts of CO<sub>2</sub> leakage into the soil environment. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Forum on the Transportation of CO<sub>2</sub> by Pipeline. Gateshead(UK).
- Wu Y, Ma X, Li YE, Wan F. 2014. The impacts of introduced CO<sub>2</sub> flux on maize/alfalfa and soil. International Journal of Greenhouse Gas 23:86-97.
- Patil RH. 2012. Impacts of carbon dioxide gas leaks from geological storage sites on soil ecology and above-ground vegetation. Diversity of Ecosystems, Prof. Mahamane Ali (Ed.), In Tech, Doi:10.5772/35495