

## 전기비저항에 의한 지중저장 이산화탄소 거동관측 모의실험

박미경<sup>1)</sup>, 장한누리<sup>1)</sup>, 김희준<sup>1)</sup>, 왕수균<sup>1)</sup>, 이민희<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>부경대학교 환경탐사공학과, [mikyung@pknu.ac.kr](mailto:mikyung@pknu.ac.kr)

<sup>2)</sup>부경대학교 환경지질학과

### Electrical resistivity monitoring of a scale model experiment for geological CO<sub>2</sub> sequestration

Mi Kyung Park<sup>1)</sup>, Hannuree Jang<sup>1)</sup>, Hee Joon Kim<sup>1)</sup>,  
Soogyun Wang<sup>1)</sup>, and Minhee Lee<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Environmental Exploration Engineering, Pukyong National University

<sup>2)</sup> Dept. of Environment Geology, Pukyong National University

**Abstract:** Time-lapse electrical resistivity measurements have been made in a scale model experiment for geological CO<sub>2</sub> sequestration in aquifer. Three types of CO<sub>2</sub> injection are tested in a water tank filled with glass beads. These are CO<sub>2</sub> dissolved into filtered tap water, CO<sub>2</sub> gas, and mineral oil. The mineral oil is a substitute for liquid phase of supercritical CO<sub>2</sub>. For reconstructing three-dimensional resistivity images, we measure potential differences at 32 potential dipoles on the top surface of the tank due to two current dipoles on the front and back sides. The resultant resistivity images clearly show the movement of injected CO<sub>2</sub> in aquifer.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> sequestration, CO<sub>2</sub> injection, electrical resistivity, time-lapse

#### 1. 서론

최근 세계 각국에서 화석에너지 사용의 효율성 증가, 저탄소 함량의 에너지원, 대체 에너지원 개발 등 이산화탄소 배출량을 조절하고 줄이기 위한 기술개발에 상당한 노력을 하고 있다 (Bachu, 2000; Korbol and Kaddour, 1995). 하지만 교토의정서에서 제시한 배출량을 만족하기 위해서는 이산화탄소의 처분기술의 개발이 더욱더 필요한 실정이다. 특히, 지중 저장된 이산화탄소의 거동관측을 비파괴적인 방법으로 지하구조를 파악하여 그 결과를 영상화하는 물리탐사 기술개발(Christensen et al., 2006; Dhu and Heinson, 2004; Slater et al., 2002; Wilt and Alumbaugh, 1998)은 국내에서는 아직 그 연구(Kim and Song, 2003)가 미흡한 단계이다.

전기비저항법은 전류전극과 전위전극을 지하매질의 전기비저항 분포를 알아내는 탐사법으로 지표뿐만 아니라 시추공이나 터널을 비롯한 지하공간에서도 실시할 수 있다. 일반적으로 이 방법은 땅에 박은 전류전극 사이에 전류가 흐르면서 생기는 전위의 공간적 변화를 측정하여 지하의 체적 (bulk) 전기비저항을 결정하는데 사용되며, 공극수의 양과 화학성분의 변화가 민감하기 때문에 전도성 물질을 추적하는

데 유용하다 (Gasperikova and Hoversten, 2006; 김희준, 2006; Dhu, 2004).

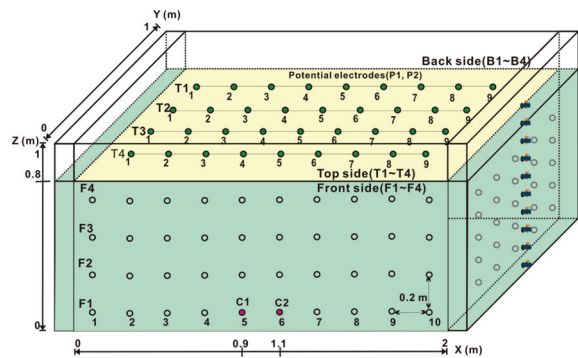
본 연구는 이산화탄소의 지중저장 시스템을 개발하기 위한 기초단계로서 지중(특히 대수층)에 주입된 이산화탄소의 용존상, 기체상, 자유상의 거동을 Pilot box를 사용하여 모사환경을 구현하여, 전기비저항에 의한 지중저장 이산화탄소의 거동관측(모니터링)을 실시하여 그 특성을 파악하고자 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. Pilot-box를 이용한 모사환경 구현

대수층 내 이산화탄소의 지중저장 환경을 규명하기 위하여 Pilot-box를 이용하여 이산화탄소의 용존상, 기체상, 자유상으로 환경을 구현하였다. 먼저, 이산화탄소의 용존상은 이산화탄소 가스를 증류수에 포화시킨 상태이며, 기체상은 이산화탄소 가스를 Pilot-box내에 직접 주입시킨 상태이며, 자유상은 초임계 이산화탄소와 비슷한 대체유체인 광유(mineral oil: KF-50)를 주입하여 이산화탄소 농도와 전기비저항의 거동 관측(모니터링)을 실시하였다.

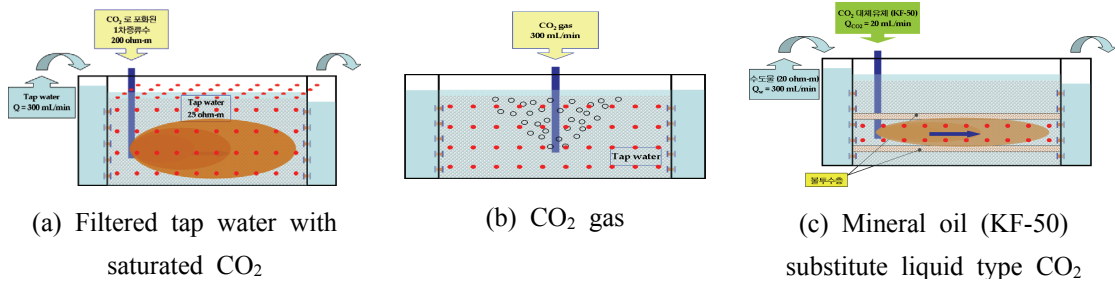
Pilot-box는 Fig. 1과 같이 두께 0.02 m의 아크릴 재질의 박스(2m × 1m × 1m)를 사용하였으며, 직경이 1 mm인 유리구슬(glass bead)를 지반의 균질매질로 상정하여 0.8 m 깊이까지 충전하였다. 2일 동안 정체시킨 수돗물을 이용하여 박스를 포화시킨 수조(water tank)를 제작하였다. 좌측 수위조에 300 ml/min의 수돗물을 주입하여 수두차에 의하여 7.3 cm/hr의 유속을 발생하도록 조절하였다. Pilot-box에 설치한 전극봉은 스텐레스 소재의 철봉(직경 0.002 m)를 사용하였으며 pilot-box에 삽입되어지는 부분은 방수용 수축튜브로 코팅하여 샘플링 포트에 이산화탄소 농도변화를 측정하기 위해 삽입한 teflon 재질의 튜브와 함께



**Fig. 1.** All sides of the pilot-box is an acrylic plate, material of inside is saturated galss beads with tap water.

설치하였다. 이 튜브를 가로와 세로 0.2 m의 일정한 간격의 격자형태로 5 cm와 35 cm의 길이로 관입하여 설치하였다.

Pilot box 내 이산화탄소가 포화된 증류수의 거동 관측실험에서 이산화탄소가 포화된 증류수 주입장치는 Fig. 2 (a)와 같이 박스 왼쪽에서 0.15 m 지점 중앙에 깊이 65 cm되는 지점까지 PVC 재질의 주입정을 설치하였으며, 이산화탄소로 포화된 1차 증류수( $1.3 \times 10^5$  mg/L)를 1 ml/min으로 주입하였다. Pilot box 내 이산화탄소 가스 거동 관측실험에서 Fig. 2 (b)와 같이 이산화탄소 주입장치는 박스 정중앙에 깊이 65 cm 되는 지점까지 PVC 재질의 주입정을 설치하고, 주입정 하부에 graphite 재질의 기포발생기를 튜브에 연결하여 설치하였으며, 이산화탄소 가스는 공기유량계(air flow meter: Cole-Parmer Company 제품)를 설치하여 300 ml/min으로 주입하였다. Pilot box 내 이산화탄소 대체유체 인 광유의 거동 관측 실험에서는 Fig. 2 (c)하부 0.15 m와 0.6 m 지점에 골관지를 사용하여 불투수층을 만들었으며, 광유 주입장치



**Fig. 2.** CO<sub>2</sub> sequestration types, which three injection types in pilot-box are (a) filtered tap water with saturated CO<sub>2</sub>, (b) CO<sub>2</sub> gas and (c) mineral oil (KF-50) substitute liquid type CO<sub>2</sub>.

는 박스 왼쪽에 PVC 재질의 주입정을 설치하였으며, Sudan IV로 붉게 염색된 광유를 20 ml/min으로 주입하였다. 시료는 실험 시작 후 12시간 간격으로 10 ml씩 채취하였으며, 가스크로마토그래피(GC: Thermo Focus GC with TCD)로 이산화탄소의 농도를 분석하였고, 광유는 중량법을 이용하여 농도를 측정하였다.

## 2.2. 전기비저항 모니터링 개요

본 연구에서는 지하내부에 전위전극을 설치하고 전류전극을 지표면상에 설치하는 3차원 전기비저항 모델링 및 역산 프로그램(Yang, et al., 2004)을 이용하여 이산화탄소 지중저장 거동관측을 수행하고자 한다.

전기비저항 거동관측을 위한 전극배열은 쌍극자배열(dipole-dipole array)을 기본으로 사용하였으나 3차원 전기비저항 모니터링을 실시하기 위하여 전류전극(C1, C2)을 앞판(front side, F15 와 F16)과 뒤판(back side, B15와 B16)의 하단부에 각 1조를 설치하고, 전류전극 각 1조에 전위전극을 Fig. 1과 같이 상판(top side)에 평행한 4개의 측선(T1~T4)에서 총 32개조로 설치하여 측정하였다. 이러한 전극배열법을 통해 작업의 편이성에 비해 효율적인 탐사결과가 도출할 수 있도록 시도하여 이산화탄소 거동관측을 수행하고자 한다. 각 전극간의 간격은 0.2 m 이다.

본 연구에 이용한 전극배열은 지표상에 전위전극들을 설치하고, 지하에 전류전극을 설치한 뒤 쌍극자배열을 변형시킨 전극배열로 겘보기 비저항을 계산하기 위해 3차원 전기비저항 해석 프로그램을 실행하여 전류전극과 전위전극간의 거리계수(geometric factor, G)를 먼저 구하였다. 이렇게 구해진 각 전위전극에 대한 거리계수와 전기비저항 측정에서 얻어진 전위값과 전류값에서 구해진 저항( $\Delta\phi/I$ )으로 식 (1)과 같이 겘보기 비저항을 계산하였다.

$$\rho_a = G \frac{\Delta\phi}{I} \quad (1), \quad G = \frac{\rho_h I h}{\Delta\phi h}$$

여기서,  $\phi$  는 전위차,  $I$ 는 전류,  $h$ 는 이상체가 없는 균질상태를 의미하며, 일반적으로는  $\rho_h$  는 100 ohm-m 으로 설정하지만, pilot-box에서의 실험에서는 약 30 ohm-m 정도의 수돗물을 주입하는 경우가 많으므로 30 ohm-m 으로 설정하였다. 이렇게 얻어진 겘보기 비저항값을 3차원 전기비저항 역산(Yang et al, 2004)을 통해 해석을 실시하였다.

이러한 지표-지하의 3차원 전극배열에 대한 3차원 전기비저항 역산 프로그램의 결과를 검증하기 위해 pilot-box 내에 수돗물 (30 ohm-m)로 포화시킨 유리구슬을 채워둔 뒤,  $X = 20$  cm 위치에서 수돗물을 필터링한 고비저항 (약 5,000 ohm-m) 의 물(1차 증류수로 상징)을 주입해서 전기비저항 모니터링을 실시하였다. 이때 유동 수돗물의 속도는 300 ml/min 이며, 고비저항의 주입수는 약 10 ml/min 으로 설정하였다. Fig. 3은 고비저항으로 필터링된 주입수에 의한 전기비저항 모니터링 결과이다. Fig. 1.과 같은 3차원 전극배열에 의해 전기비저항 모니터링 결과는 고비저항의 분포가 시간이 경과함에 따라 수돗물의 유동에 따라 미약하게 유동하고 있음을 파악할 수 있었다. 따라서 이러한 결과에 의해 고비저항 이상체의 유동현상을 측정할 수있음에 따라 이산화탄소의 거동관측에도 그 활용성을 검증할 수 있었다.

### 3. 실험 결과

Fig. 4는 Fig. 2(a)에서 총 72시간 동안 이산화탄소 용존 증류수를 pilot-box에 주입하고 모니터링한 결과이다. Fig. 4(a)는 박스내 샘플링포트에서 채취한 물시료의 이산화탄소 농도를 분석한 결과이다. 시간이 지남에 따라 이산화탄소로 포화 된 용액은 공극수의 흐름에 따라 우상향으로 이동하면서 공극수에 희석되는 현상을 나타내고 있다. Fig. 4(b)는 전기비저항 역산 결과이다. 이 단면도를 통해 이산화탄소 용존 증류수는 상단부에서 점점 비저항값이 증가해 가면서 퍼져나가는 현상이 나타나 이산화탄소 농도변화와 유사한 현상이 나타남을 확인할 수 있었다. 따라서 전기비저항 탐사로 지중 저장 이산화탄소 거동관측의 유용성을 확인할 수 있었다.

Fig. 5는 Fig. 2(b)에서 박스내 공극수의 이동이 없는 상태에서 총 72시간 동안 이산화탄소 가스를 300 ml/min으로 주입하여 모니터링을 실시한 결과이다. Fig. 5(a)는 48, 72시간 경과 후 정면에서 35 cm 지점의 샘플링포트에서 채취한 시료를 분석한 결과와 전기비저항을 모니터링 한 결과이다. 이산화탄소 가스의 거동 경로 부근의 공극수는 접촉과 용해로 인하여 농도가 증가되고 있음을 알 수 있었다. 주입된 이산화탄소 가스는 초기에는 공극 내 표면장력에 의해 주입정 부근에 잔류하다가 부피가 증가함에 따라 서서히 상부로의 이동을 확인하였으며, 공극수의 흐름이 제한된 상태에서 이러한 농도 분포는 이산화탄소 가스 거동 경로를 간접적으로 나타낼 수 있다. Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)에 상응하는 전기비저항 모니터링 해석 결과로, 주입정 부근에서 시간이 경과함에 따라 이산화탄소 가스의 거동이 중심부에서 상부로 가스체로 상징되어 지는 고비저항대가 변화하는 양상을 확인할 수 있었다. 이러한 결과에 의해 박스 내 이산화탄소의 가스상에 대한 거동 관측은 전기비저항 분포와 이산화탄소 가스 농도분포가 비슷한 양상을 나타낼 수 있었다.

Fig. 6은 Fig. 2(c)에서 총 30시간 동안 대체유체인 광유를 20 ml/min으로 주입하여 모니터링을 실시한 결과이다. Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)는 정면에서 35 cm 지점의 샘플링포트에서 채취한 시료를 분석한 결과와 65 cm, 5 cm 샘플링포트에서의 전기비저항 모니터링 결과이다. Fig. 6(a)에서는 12시간이 지나면서 광유 주입의 영향이 나타나기 시작하며, 주입량이 증가함에 따라 광유농도가 상승하여 상부층의 불투수층 위로 퍼져 나가는 현상을 확인할 수 있었다. 전기비저항 분포도인 Fig. 6(b)에서는 Fig. 6(a)와 같이 광유의 이동이 명확히 나타나지는 않지만, 시간이 경과함에 따라

광유를 상징하는 고비저항체가 상부로 이동하는 현상을 확인하였다.

#### 4. 결론

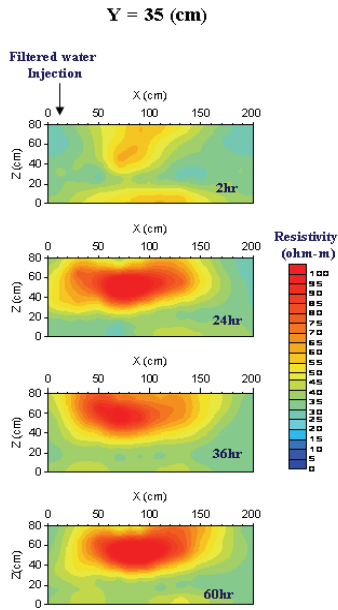
본 실험을 통하여 대수층내 이산화탄소의 용존상, 가스상, 자유상에서의 거동 모니터링 박스실험을 실시함으로써 실제 이산화탄소를 지중 저장하였을 경우 용존상, 가스상, 자유상 형태의 이산화탄소 거동특성을 농도변화와 전기비저항에 의해 규명하였으며, 이러한 결과는 비파괴적인 전기비저항 탐사법이 지중내 이산화탄소 거동 관측의 기법의 하나로 활용될 수 있음을 검증하였다.

#### 감사의 글

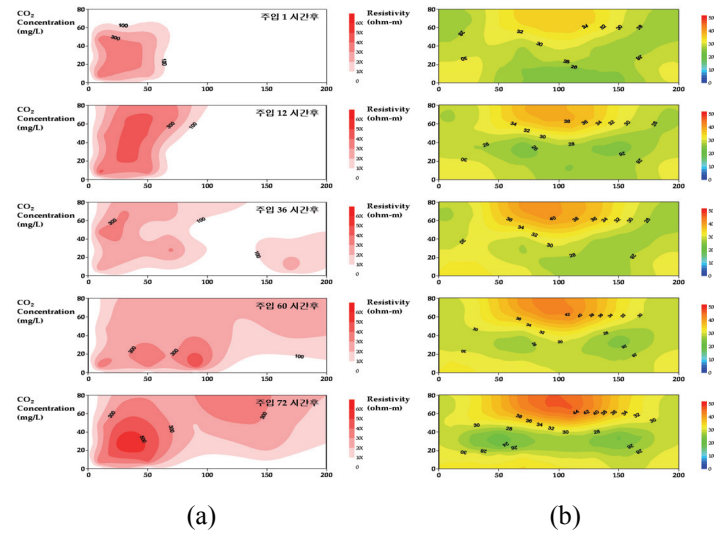
본 연구는 과학기술부의 21세기 프론티어 연구개발사업인 이산화탄소 저감 및 처리 기술개발 사업단의 지원(DJ2-101-1-0-0)으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

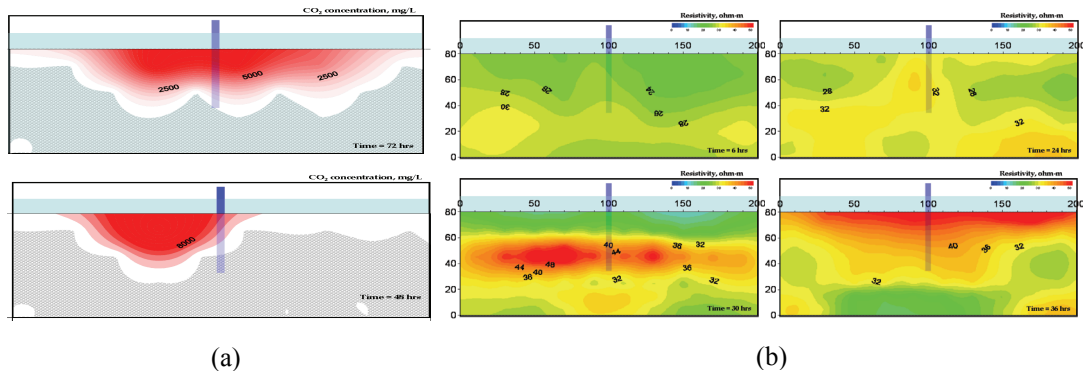
- 김희준, 2006, 한국의 전기비저항탐사, *자원환경지질*, **39**, 473-483.
- Bachu, S., 2000, Sequestration of CO in geological media: criteria and approach for site selection in response of climate change, *Energy Conservation and Management*, **41**, 953-970.
- Christensen, N. B., Sherlock, D. and Dodds., K., 2006, Monitoring CO<sub>2</sub> injection with cross-hole electrical resistivity tomography, *Exploration Geophysics*, **37**, 44-49.
- Dhu. T. and Heinson. G., 2004, Numerical and laboratory investigations of electrical resistance tomography for environmental monitoring, *Exploration Geophysics*, **35**, 33-40.
- Gasperikova E. and Hoversten, M., 2006, A feasibility study fo nonseismic geophysical methods for monitoring geologic CO<sub>2</sub> sequestration, *Leading Edge*, 1282-1288.
- Kim, H. J. and Song, Y. H., 2003, Efficient crosswell EM tomography for monitoring geological sequestration of CO<sub>2</sub>, *Geosystem Eng*, **6**, 13-18.
- Korbol, R. and Kaddour, A., 1995, Sleipner vest CO<sub>2</sub> disposal injection of removed CO<sub>2</sub> into the Utsira Formation, *Energy Conservation and Management*, **36**, 509-512.
- Law, D.H.S. and Bachu, S., 1996, Hydrogeological and numerical analysis of CO<sub>2</sub> disposal in deep aquifers in the sedimentary basin, *Energy Conservation and Management*, **37**, 1167-1174.
- Slater, L., Brinley, A., Versteeg, R., Cassiani, G., Birken, R. and Sandberg, S., 2002, A 3D ERT study of solute transport in a large experimental tank, *Jour. of Appllied Geophysics*, **49**, 211-229.
- Wilt, M. and Alumbaugh, D., 1998, Electromgnetic methods for development and production: State of the art, *Leading Edge*, 487-490.
- Yang, J. S., Park, M. K. and Kim, H. J., 2004, Nondestructive imaging of rock sample using electrical resistance tomography: theoretical approach, *Geosystem Engineering*, **41**, 265-270.



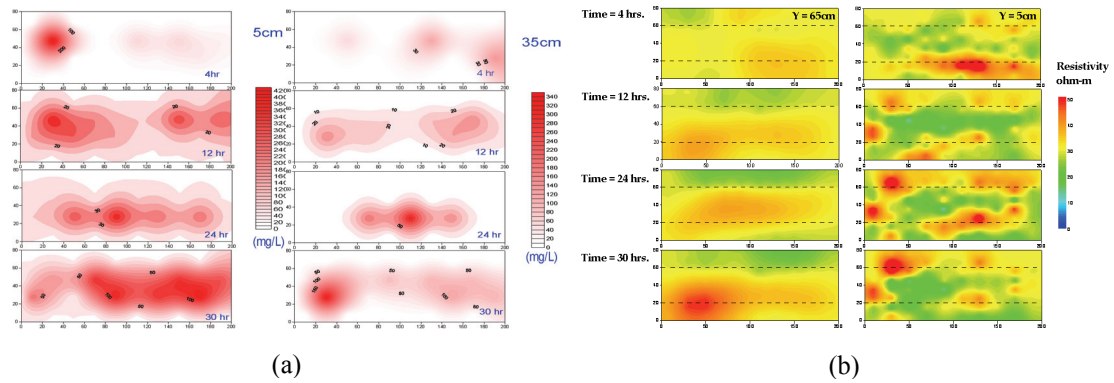
**Fig. 3.** Resistivity sections at 2, 24, 36 and 60 hours after the injection of filtered water.



**Fig. 4.** Monitoring results of injection of filtered tap water with saturated CO<sub>2</sub>. (a) CO<sub>2</sub> concentration distribution (mg/L), (b) Resistivity distribution (ohm-m)



**Fig. 5.** Monitoring results of CO<sub>2</sub> gas injection. (a) CO<sub>2</sub> concentration distribution (mg/L), (b) Resistivity distribution (ohm-m)



**Fig. 6.** Monitoring results of mineral oil injection. (a) CO<sub>2</sub> concentration distribution (mg/L), (b) Resistivity distribution (ohm-m)