

전기비저항탐사 방법에 의한 지중 저장 이산화탄소 누출 가능 경로 탐지

임우리¹ · 함세영^{1*} · 황학수² · 김성욱³ · 전항탁¹

¹부산대학교 지질환경과학과, ²(주)토모리, ³(주)지아이

Detection of Potential Flow Paths of Leaked CO₂ from Underground Storage Using Electrical Resistivity Survey

Woo-Ri Lim¹ · Se-Yeong Hamm^{1*} · Hak-Soo Hwang² · Sung-Wook Kim³ · Hang-Tak Jeon¹

¹Department of Geological Sciences, Pusan National University

²Tomory Co., Ltd.

³GI Co., Ltd.

Abstract

The Korean government attempts to reduce CO₂ emissions by 37% to 314.7 Mt CO₂, down from the estimated 850.6 Mt CO₂ until 2030 in order to confront green house effect. In this context, in 2014, Korean government launched CO₂ Storage Environmental Management Research (K-COSEM) Center for carrying out pilot-scale research on CO₂ leakage from underground CO₂ storage facilities. For the detection of CO₂ leakage, it is necessary to identify hydrogeological and geophysical characteristics of the subject area. In the study site of Naesan-ri, Daeso-myeon, Eumseong-gun, Chungbuk Province, two times injection tests (June 28-July 24, 2017 and August 07-September 11, 2017) of CO₂ and SF₆ dissolved waters, respectively, was conducted to understand the leakage behavior of CO₂ from underground. The injection well was drilled to a depth of 24 m with a 21-m casing and screen interval of 21~24 m depth. Two times resistivity surveys on August 18, 2017 and September 1, 2017, were conducted for revealing the flow of the injected water as well as the electrical properties of the study site. The study results have shown that the high-resistivity zone and the low-resistivity zone are clearly contrasted with each other and the flow direction of the injected water is similar to natural groundwater flow. Besides, the low resistivity zone is widely formed from the depth of injection to the shallow topsoil, indicating that the weathered zone of high permeability has high CO₂ leakage potential.

Keywords: carbon capture and storage (CCS), CO₂ leakage, electrical resistivity survey, hydrogeological characteristics, green house effect

초 록

한국 정부는 온실효과에 대응하기 위해서 이산화탄소 배출을 850.6 Mt에서 2030년까지 314.7 Mt (37%)로 감축하기로 하였다. 이러한 상황에서, 한국 정부는 이산화탄소 지중저장시설로부터 누출되는 이산화탄소를 시험부지 규모로 연구하기 위하여 2014년에 이산화탄소 지중저장 환경관리연구단(K-COSEM)을 발족하였다. 이산화탄소의 누출을 탐지하기 위해서는 대산지역의 수리지질학적, 지구물리학적 특성을 규명하는 것이 필요하다. 본 연구에서는, 충북 음성군 대소면 내산리의 연구부지에서 2017년 6월 28일부터

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Se-Yeong Hamm
E-mail: hsy@pusan.ac.kr

Received: 19 February, 2018

Revised: 15 March, 2018

Accepted: 20 March, 2018

© 2018 The Korean Society of Engineering Geology



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.

7월 24일과 8월 7일부터 9월 11일까지 두 차례에 걸쳐서 각각 CO₂와 SF₆를 용해시킨 물을 지하에 주입하여 지하에서의 이산화탄소 누출 거동을 알아내고자 하였다. 주입정은 심도 24 m, 케이싱은 21 m까지, 스크린 구간은 심도 21~24 m 구간이다. 2017년 8월 18일과 9월 1일의 두 차례 전기비저항탐사로 주입수의 흐름과 전기비저항 특성을 파악하고자 하였다. 연구 결과에 의하면, 고 전기비저항대와 저 전기비저항대가 뚜렷하게 구별되며, 주입수의 유동방향은 자연상태의 지하수 흐름과 비슷하게 나타났다. 또한, 저 전기비저항대는 주입심도로부터 천부 표토층까지 광범위하게 형성되며, 이는 높은 투수성을 가지는 풍화대가 이산화탄소 누출 가능성이 높다는 것을 지시한다.

주요어: 이산화탄소 포집 및 저장, CO₂ 누출, 전기비저항탐사, 수리지질 특성, 온실효과

서론

기후변화로 인하여 해수면의 상승과 홍수, 가뭄 등의 기상이변이 심화하고 있고 대규모 자연재해의 경각심이 고조되고 있다. IPCC (2013)에 의하면 21세기 말 지구 평균기온은 1.8°C, 해수면은 47 cm 상승할 것으로 예상하고 있다. 특히 이산화탄소를 비롯하여 온실가스는 이상기후의 주요 원인으로 지목되며 현재의 추세라면 2100년까지 지구 평균기온은 3.7°C, 해수면은 63 cm 상승하고 경제적 피해는 GDP의 5~20%에 달할 것으로 알려져 있다(Chae, 2010). 이에 따라 선진국들은 기후변화협약과 교토의정서에 대응하고 지속 가능한 발전을 실현하기 위해 신재생에너지 비율 확대, 에너지효율 향상 등의 방안을 통해 온실가스 배출을 감축하고자 노력하고 있다. 그러나 신재생에너지의 기술발전과 가격 경쟁력이 확보되지 않은 상태에서 급작스럽게 화석에너지 기반 산업구조를 신재생에너지 체제로 전환하는 것은 매우 어렵다. 또한 온실가스 저감 정책이 실현될지라도 이미 배출된 이산화탄소의 20% 이상은 오랜 기간 대기 중에 잔류하기 때문에 CO₂ 배출을 획기적으로 줄일 수 있는 기술 개발이 중요하다.

이산화탄소 포집 및 저장(carbon capture and storage, CCS) 기술은 CO₂ 배출량을 줄일 수 있는 효과적이고 현실적인 대안이며, 전 지구적 기후변화에 대응하는 가장 매력적인 기술 중 하나로 간주되고 있다(Kim et al., 2017). CCS 기술은 대량 배출원에서 발생하는 CO₂를 포집, 수송하여 지중이나 해양에 저장하거나 반응축매, 화학소재 및 연료화 등으로 전환처리(고정화)하는 기술을 총칭하며, CO₂ 누출 등에 관한 장기 모니터링을 포함한다. 지중이나 해양에 저장된 이산화탄소 이동과 누출은 환경문제를 유발하며 건강에 미치는 위해성에 대해서 주의를 필요하며 미국과 유럽은 지중저장 관련 환경 관리 지침을 마련하고 있다(Jang et al., 2012). CO₂ 지중 저장부지 선정 및 모니터링에 관한 연구들은 2~50 m 심도에 이산화탄소를 주입한 후 CO₂ 누출에 따른 지화학적 변화(pH, 중금속, 미량원소 등)를 통하여 CCS의 안정성에 대한 정보를 파악하고 있다(Kharka et al., 2006; Apps et al., 2010; Peter et al., 2011; Freifeld et al., 2013; Humez et al., 2014). 대표적인 사례로 노르웨이 스벨비크(svelvik) 시험부지의 천부 20 m에 CO₂를 주입하여 누출에 따른 지구물리 및 지구화학적 변화에 대해 관찰하였고(Humez et al., 2014), 미국 몬태나주의 보즈먼시와 텍사스주의 오스틴시(Apps et al., 2010), 미시시피주의 에스카토파(Freifeld et al., 2013), 독일의 위트스톡(Kharka et al., 2006)에서 CO₂ 누출과 지화학적 반응으로 인한 pH, 전기전도도, 알칼리도 및 미량원소의 경향성을 파악하였다. 한편, 호주는 2004년 오프웨이 지역에 CO₂ CRC (cooperative research centre for greenhouse gas technologies) Otway 사업을 통해서 2008년 CO₂ 주입을 시작하였고 지속적으로 모니터링 자료를 축적하고 있다(Sharma et al., 2009).

한국의 경우 2030년 예상 이산화탄소 배출량을 850.6 Mt CO₂에서 37% 수준(314.7 Mt CO₂)으로 줄이는 것을 목표로 하고 있다(Kwon and Kim, 2017). 이와 관련하여 환경부는 2014년부터 이산화탄소 지중저장 환경관리연구단(Korea CO₂ storage environmental management research center, K-COSEM)을 통해 CO₂ 지하저장과 누출에 대해서 연구를 수행하고 있다. Kim et al. (2009)는 이산화탄소를 지하 심부 염수층에 주입시 압력변화 및 이산화탄소의 거동 특성을 다상 다성분 유체유동 수치모델인 TOUGH2를 이용하여 모의한 바 있다. Yun (2014)은 여러 나라에서 수행된 CO₂ 지중 저장

에 따른 CO₂ 누출과 관련된 지화학적 요소들(pH, 전기전도도, 알칼리도, 중금속, 희유원소 등)을 검토하였고, Lee et al. (2016)은 천부 지층의 CO₂ 누출 모니터링 관측 부지의 결과들을 수리적 불균질성, 광물조성, 누출감시 시스템, 그리고 환경적 변수 측면에서 검토하였다. Choi et al. (2007)은 자연 상태에서 산출되는 탄산수의 수리화학적 거동 및 배경 값과 CO₂ 누출실험을 비교하였다. Kim et al. (2017)은 한국의 여러 암석에서 산출하는 탄산수의 자연유사 연구를 통하여 이산화탄소 누출의 지화학적 지시자를 확률밀도함수로 결정하는 방법을 제시하였다.

연구지역인 충청북도 음성군 대소면 내산리 지역에서 K-COSEM의 일환으로 단기 및 장기 이산화탄소 주입 시나리오에 따라 천부 대수층에 물을 주입하여 CO₂ 누출 모사 시험을 수행하였다(Fig. 1). 이산화탄소를 주입한 후 거동양상을 확인하기 위한 추적자로 He, Ar, Kr, SF₆의 비 반응성 기체가 이용되고 있다(Kim et al., 1998; Peter and Dahmke, 2011). SF₆를 포함한 불소화합물들은 인간의 경제 활동 때문에 발생하는 물질이며 제3차 당사국총회 COP (conference of the parties)에서 지정한 6대 온실가스 중 하나로 SF₆가 전체 온실가스에서 차지하는 비율은 낮지만, 배출량이 폭발적으로 증가하고 있고 같은 양의 CO₂에 비해 2만 배가 넘는 온실효과를 보인다.

2016년 11월 29일 실시한 1차 CO₂ 용존수 시험은 자연구배(0.02)에 의해서 6시간 동안의 단기 주입(pulse type injection) 방식으로 진행되었으며, 2017년 6월 28일부터 7월 24일까지 실시한 2차 시험에서는 가압구배(0.2) 상태에서 30일 동안의 연속적 CO₂를 용해시킨 물을 주입하였다. 이후, 2017년 8월 7일부터 9월 11일까지 SF₆ 용존수 시험이 실시하였다. 이러한 CO₂ 및 SF₆ 용존수의 누출 거동 특성을 파악하기 위해서는 연구지역의 수리적 및 전기적 특성을 파악하여야 한다.

이 연구는 CO₂ 누출 거동 모사 연구부지의 천부 지층에서 SF₆ 용존수를 주입하여, 전기비저항값과 퇴적층의 수리적 특성에 의해서 SF₆ 용존수의 유동 방향과 연구부지 지층의 전기적 물성을 규명하고자 하였다.

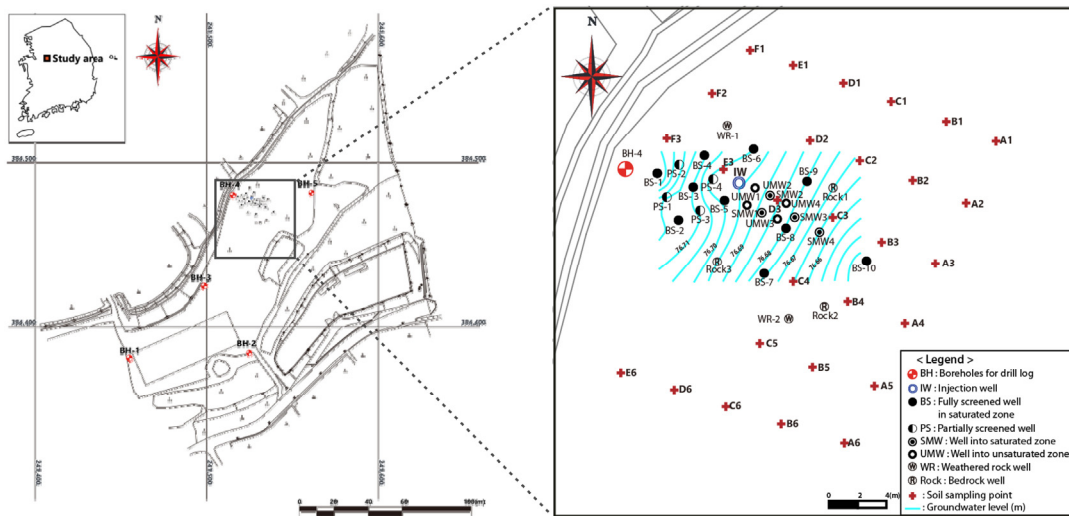


Fig. 1. Boreholes and soil sampling points in the study area.

연구지역 현황

연구 대상 부지는 충청북도 음성군 대소면 내산리(위도 36° 57' 36.9"N~36° 57' 37.5"N, 경도 127° 28' 00.4"E~127° 28' 01.5"E)에 위치하며 중부고속도로에 인접하고 있다. 지형은 완만한 구릉성 산지에 해당하며 대상 부지는 경사도가 거의 없는 평지로 이루어져 있다. 지질은 류라기의 편마상화강암과 이를 관입하는 백악기의 산성 암맥으로 구성되어 있다. 연구지역 일원으로 남-북 방향의 주향이동 단층이 수 매 반복되며 단층과 사교하는 소규모의 단층군이 발달한다(Chwae et al., 1998).

연구부지에는 29개 시추공(암반관정 3개소(R1~3), 풍화암 관정 2개소(WR1~2), 불포화대 관정(wells into unsaturated zone) 4개소(UMW1~4), 포화대 관정(wells into saturated zone) 4개소(SMW1~4), 부분 스크리닝 관정(partially screened well) 4개소(PS1~4), 포화대 내의 완전 스크리닝 관정(fully screened well in saturated zone) 9개소(BS1~9), 주입정(injection well) 1개소(IW))를 굴착하였다(Fig. 1). 연구부지의 시추단면도에 의하면, 풍화토층은 지표면에서 28.5~58 m까지 분포하며, 27~58 m 구간은 중·조립질 모래로 구성되어 있다. 28.5~71.2 m 구간은 풍화암층으로서 흑운모와 중·조립질의 모래가 혼재되어 나타난다. 62 m부터 시추공 최하부까지는 편마상화강암의 연암과 경암이 교대로 나타나고 있다(Fig. 2).

연구부지에서 지하수는 북서에서 남동 방향으로 흐른다. 그러나, 연구부지 지형은 남쪽이 높고 북쪽이 낮다. 따라서 연구부지의 지하수 흐름은 자연상태의 지하수 흐름이 지형경사에 따르는 것에 반한다. 이러한 지하수 흐름은 연구부지의 동남쪽 200 m에 위치하는 공장시설에서 지하수를 사용하기 때문으로 보인다(Fig. 1).

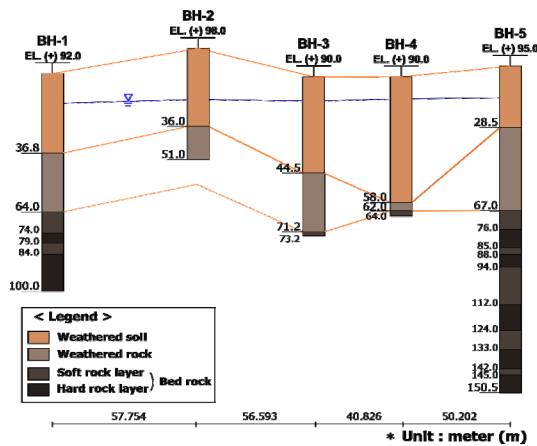


Fig. 2. Geological columns of the boreholes.

연구방법

입도분석과 수리전도도 산정

대상지역의 상부 지층은 풍화토로 구성되어 있고 입도분포는 수리적 특성과 관련된다. 연구에서 퇴적입자의 입경은 체 거름(0.075 mm 이상)과 레이저 입도분석기(laser diffraction particle size analyzer, Beckman Coulter, USA LS 13320)를 이용하여 산정하였다. 레이저 입도분석은 입자들의 크기에 따라 특정 각도로 빛을 회절시키고, 회절각은 입자 크기에 반비례한다는 원리를 이용하는 것으로 특정 각도에서 회절된 빛의 강도는 그 경로의 명확한 단면적 및 입자의 수와 관련된다는 물리학적 원리에 기초한다. 체분석과 레이저 입도분석에 의해서 퇴적물의 각 입도별 무게 백분율을 구하게 된다.

각 입도별 입자의 무게비를 이용하여 입도분포곡선을 그리면 d_{10} , d_{17} , d_{60} 등의 입경을 산출할 수 있고 선행연구의 경험식(Hazen, 1892; Beyer, 1966; Sauerbrei (Kasenow (2002)에서 인용); Kozeny, 1953)을 이용하여 퇴적물의 수리전도도를 산정하였다(Fig. 3; Table 1). d_e 에서 e 는 입도분포곡선에 있어서 무게 백분율의 $e\%$ 에 해당하는 입경으로서, 입도분포곡선에서 누적중량의 $e\%$ 가 통과하는 입자의 직경을 말한다. 본 연구에서는 연구부지내 약 3 m의 등간격으로 28개 지점에서 지표면 아래 30~50 cm 심도에서 퇴적물 시료를 채취하여 퇴적물의 입도를 분석하였다.

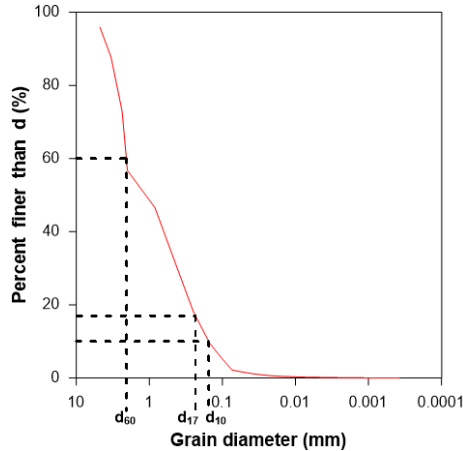


Fig. 3. Grain-size distribution curve.

Table 1. Empirical formulae for calculation of hydraulic conductivity values (cm/s)

Author	Empirical formula
Hazen (1892)	$\kappa = \frac{g}{v} \cdot (6 \times 10^{-4}) \cdot [1 + 10(n - 0.26)] \cdot d_{10}^2$
Beyer (1966)	$\kappa = \frac{g}{v} \cdot \left[(6 \times 10^{-3}) \cdot \log\left(\frac{500}{\eta}\right) \right] \cdot d_{10}^2$
Sauerbrei (1992)	$\kappa = \frac{g}{v} \cdot (3.75 \times 10^{-3}) \cdot n^3 / (1 - n)^2 \cdot \tau \cdot d_{17}^2$
Kozeny (1953)	$\kappa = \frac{g}{v} \cdot (8.3 \times 10^{-3}) \cdot n^3 \cdot (1 - n)^{-2} \cdot d_{10}^2$

κ : Hydraulic conductivity, g : Gravitational acceleration, v : Coefficient of kinematic viscosity, η : Uniformity coefficient, n : Porosity.

전기비저항탐사 방법

연구부지에서 주입된 SF₆ 용존수의 유동 방향과 시험부지 지층의 전기적 물성을 규명하기 위하여 여러 지구물리탐사 방법들 중 전기비저항탐사(direct current resistivity: DC resistivity)를 적용하였다. 전기비저항은 지하수, 포화도, 공극률, 간극수의 전기전도도, 또한 온도 등에 따라 결정되며, 이 중 지하수의 유무에 따라 큰 변화를 보인다. 지하수를 함양한 구간의 전기비저항은 이외의 주변 암석과 비교하여 상대적으로 낮은 값을 가지므로 암석의 전기비저항 대비를 이용하여 지하수 유동을 추정할 수 있다. 일반적으로 파쇄대 및 풍화대는 지표수 유입 및 지하수 유동이 용이한 환경이다.

쌍극자-쌍극자 배열은 전류전극과 전위전극의 거리를 연속적으로 쌍극자 길이의 정수배만큼 증가시킴으로 2차원적 탐사를 수행하는 방법으로써, 광역적으로 지하의 2차원적인 전기전도도에 대한 정보를 얻는데 효과적이다. 쌍극자-쌍극자 배열을 사용한 2차원 전기비저항탐사를 위해 연구지역에 설정한 측선은 총 2개 측선(RES1, RES2)이다. 두 측선의 방향은 N30°E로 서로 평행하며, 탐사시 측선의 진행방향은 서쪽에서 동쪽 방향이다. 쌍극자 길이는 모두 5 m를 사용하여 가탐심도를 25 m 내외로 설정하고 전극전개수를 1에서 17까지 증가시키면서 지질매체의 겉보기 전기비저항값을 측정하였다.

SF₆ 주입관정인 IW는 RES1의 측점 10, 11 사이에 수직으로 약 9~10 m 떨어져 있다. IW의 심도는 총 24 m로, 케이싱 탐에서 21 m 심도까지는 스텐리스 케이싱이 되어있고, 이후 21~24 m 심도에는 스크린이 설치되어 이 구간을 통해 주입이 이루어졌다. 주입전 IW에서의 지하수위는 지하 16~17 m에 위치하였으며 주입 후에 지하수위 변동은 거의 일어나지 않았

다. 주입은 2017년 08월 07일부터 09월 11일까지 실시되었다. 1차 전기비저항탐사는 2017년 8월 18일에 실시되었으며, 2차 전기비저항탐사는 2017년 9월 1일에 실시되었다.

연구결과

수리전도도 분포

연구지역 28개 지점의 입도분포를 체분석과 레이저분석에 의하면, 중량비는 모래가 94.57~99.45%(평균 97.76%), 실트가 0.40~5.17%(평균 2.09%), 그리고 점토가 0.03~0.99%(평균 0.14%)를 보이고 있다(Table 2). Fig. 4와 같이 삼각 다이어그램에 도시하면, 전 지점의 표토는 모래에 속한다. 통일분류법에 의하면 4번 체(4.75 mm)의 통과율이 50% 이상일

Table 2. Weight ratio of sand, silt, and clay fractions

Sampling point	Sand (4.75~0.05 mm)	Silt (0.05~0.002 mm)	Clay (<0.002 mm)	Total (%)
A1	98.38	1.52	0.11	100
A2	99.08	0.86	0.05	100
A3	97.50	2.36	0.14	100
A4	98.84	1.10	0.06	100
A5	97.37	2.49	0.14	100
A6	97.89	2.01	0.10	100
B1	97.19	2.65	0.16	100
B2	98.17	1.28	0.55	100
B3	97.22	2.63	0.16	100
B4	97.77	2.12	0.11	100
B5	97.37	2.49	0.14	100
B6	97.47	2.41	0.13	100
C1	97.37	2.47	0.16	100
C2	97.79	2.09	0.12	100
C3	96.87	2.96	0.17	100
C4	96.54	3.27	0.19	100
C5	97.30	2.57	0.13	100
C6	98.29	1.58	0.12	100
D1	97.01	2.80	0.20	100
D2	97.89	2.00	0.11	100
D3	97.94	1.96	0.09	100
D6	99.40	0.57	0.03	100
E1	98.05	1.84	0.11	100
E3	97.63	2.23	0.14	100
E6	99.20	0.76	0.04	100
F1	96.78	3.02	0.21	100
F2	98.37	1.52	0.11	100
F3	96.74	3.10	0.17	100
Average	97.76	2.09	0.14	100

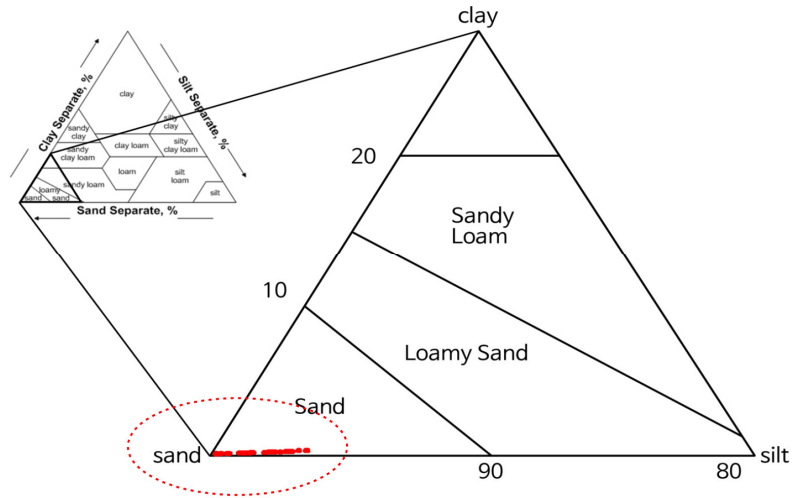


Fig. 4. Ternary diagrams of sand, silt and clay fraction in study site.

Table 3. Calculated hydraulic conductivities (cm/s)

Sampling point	Hazen	Beyer	Sauerbrei	Kozeny	Average value
A1	9.07E-04	5.78E-04	1.21E-03	1.01E-04	6.98E-04
A2	1.23E-03	7.82E-04	1.48E-03	1.37E-04	9.07E-04
A3	4.85E-04	2.88E-04	7.30E-04	5.42E-05	3.89E-04
A4	1.45E-03	9.53E-04	1.83E-03	1.62E-04	1.09E-03
A5	9.98E-04	6.23E-04	2.00E-03	1.12E-04	9.33E-04
A6	4.62E-04	2.81E-04	5.82E-04	5.16E-05	3.44E-04
B1	6.82E-04	4.26E-04	9.51E-04	7.61E-05	5.33E-04
B2	7.70E-04	4.80E-04	1.21E-03	8.60E-05	6.36E-04
B3	3.78E-04	2.28E-04	4.38E-04	4.22E-05	2.71E-04
B4	7.62E-04	4.80E-04	1.02E-03	8.49E-05	5.87E-04
B5	5.33E-04	3.25E-04	7.17E-04	5.94E-05	4.09E-04
B6	3.86E-04	2.33E-04	4.45E-04	4.32E-05	2.77E-04
C1	3.78E-04	2.23E-04	5.59E-04	4.23E-05	3.01E-04
C2	7.86E-04	5.06E-04	1.05E-03	8.79E-05	6.08E-04
C3	5.35E-04	3.37E-04	6.91E-04	5.98E-05	4.06E-04
C4	3.17E-04	1.86E-04	4.10E-04	3.54E-05	2.37E-04
C5	7.61E-04	4.97E-04	9.84E-04	8.48E-05	5.82E-04
C6	8.25E-04	5.30E-04	1.10E-03	9.22E-05	6.35E-04
D1	5.01E-04	2.98E-04	9.28E-04	5.59E-05	4.45E-04
D2	6.61E-04	4.20E-04	8.22E-04	7.38E-05	4.94E-04
D3	5.29E-04	3.33E-04	6.33E-04	5.91E-05	3.89E-04
D6	2.11E-03	1.48E-03	2.56E-03	2.36E-04	1.60E-03
E1	8.79E-04	5.72E-04	1.37E-03	9.79E-05	7.27E-04
E3	3.85E-04	3.32E-04	7.66E-04	5.61E-05	3.84E-04
E6	9.37E-04	6.17E-04	1.02E-03	1.05E-04	6.70E-04
F1	3.87E-04	2.29E-04	5.54E-04	4.32E-05	3.03E-04
F2	9.96E-04	6.72E-04	1.27E-03	1.11E-04	7.64E-04
F3	5.30E-04	3.36E-04	7.04E-04	5.92E-05	4.07E-04

때 모래로, 50% 미만일 때 자갈로 분류한다. 1차 입도분석의 경우 No. 4 통과율이 70.32~98.22%(평균 90.67%), 2차 입도 분석의 경우 73.22~95.92%(평균 87.95%)을 보이므로 통일분류법에 의해서도 연구지역의 표토는 모래에 속한다.

입도분석 자료를 이용하여, Hazen (1892)식, Beyer (1966)식, Sauerbrei식, Kozeny (1953)식 (Table 1)에 의해서 표토 층의 수리전도도를 구하였다(Table 3). Sauerbrei식에 의하면, 모든 지점의 수리전도도는 $4.10E-04 \sim 2.56E-03$ cm/s(평균 $1.00E-03$ cm/s)로서 가장 크게 나타난다. 그리고 Hazen (1892)식에 의하면, 모든 지점에서 수리전도도는 $3.17E-04 \sim 2.11E-03$ cm/s(평균 $7.34E-04$ cm/s)이고, Beyer (1966)식에 의하면, 모든 지점의 수리전도도는 $1.86E-04 \sim 1.48E-03$ cm/s(평균 $4.73E-04$ cm/s)로 서로 비슷한 값을 보인다. 한편, Kozeny (1953)식에 의하면, 모든 지점의 수리전도도는 $3.54E-05 \sim 2.36E-04$ cm/s(평균 $8.25E-05$ cm/s)로서 네 가지 식 중에서 가장 낮은 값을 보인다. 공간적인 수리전도도 분포를 보면, C4를 중심으로 가장 연구지역의 중앙부에서 낮은 수리전도도를 보이고, 남쪽과 동쪽으로 갈수록 높게 나타난다.

연구부지내에 위치하는 BH-4 시추공에서 풍화토의 두께는 58.4 m이고, 다른 4개의 시추공의 풍화토의 두께도 약 30~45 m 범위에 있다. 풍화토는 표토와 비슷하게 주로 모래로 이루어져 있어서 풍화토의 수리전도도는 표토와 비슷한 것으로 보인다.

전기비저항의 시간적, 공간적 분포

전기비저항탐사에서 획득된 자료를 처리하기 위해 유한요소법 수치모델링과 역산(inversion) 프로그램인 DiproWin (Kim, 1998)을 이용하여 지하매질의 심도에 따른 참 전기비저항값 단면도를 구하였다.

Fig. 5는 SF₆ 용존수의 주입 시작 후 11일이 경과한 2017년 8월 18일에 실시한 1차 전기비저항탐사의 측정자료에 대한 역산결과를 보여준다. 전기비저항탐사 측선들은 비교적 평탄한 지대를 따라 설치되었기 때문에 역산과정에서 지형보정은 별도로 하지 않았다. 역산을 통해 작성된 2차원 단면도상에서 RES1 측선의 전체적인 전기비저항값의 분포는 29.9~470.0 Ωm이며, 측점 11~14에서 29.9~46.9 Ωm 범위의 낮은 전기비저항대가 천부에서 심부까지 넓게 분포하고 있다. RES2 측선의 전체적인 비저항값의 분포는 47.7~953.0 Ωm이며, 측점 10~14에서 47.7~68.0 Ωm의 낮은 전기비저항대가 천부에서 심부까지 넓게 분포하고 있다. RES1 측선과 RES2 측선을 서로 비교하면 대체로 RES2 측선상의 단면에서 전기비저항값이 더 높게 나타난다. 이는 RES2 측선이 SF₆ 용존수 주입공(IW 공)으로부터 더 멀리 떨어져 있기 때문이다.

Fig. 6은 연구지역에서 SF₆ 용존수의 주입 시작 후 25일이 경과한 2017년 9월 1일에 실시한 2차 전기비저항탐사의 전기비저항 역산 결과를 보여준다. 1차 전기비저항탐사와 마찬가지로 역산과정에서 별도로 지형보정은 하지 않았다. 역산을 통해 작성된 2차원 단면도상에서 RES1 측선의 전체적인 비저항값의 분포는 32.5~566.0 Ωm이며, 측점 11~15 사이에 32.5~47.1 Ωm 범위의 낮은 전기비저항대가 천부에서 심부까지 넓게 분포하고 있다. RES2 측선의 전체적인 비저항값의 분포는 43.3~890.0 Ωm이며, 측점 12~15에서 43.3~74.8 Ωm 범위의 낮은 전기비저항대가 천부에서 심부까지 넓게 분포하고 있다. RES1 측선과 RES2 측선을 서로 비교하면, 대체로 두 측선상의 단면에서 전기비저항값의 분포가 비슷한 양상을 보인다. 또한, 1차 전기비저항탐사 결과와 2차 전기비저항탐사 결과를 비교하면, SF₆ 용존수의 주입 후 더 많은 시간이 경과하여 SF₆ 용존수의 이동이 일어나서 측선의 오른쪽 부분에서 전기비저항값이 낮아지고 있음을 알 수 있다. 한편, 남서부의 고 저비저항대는 SF₆ 용존수의 영향을 받지 않는 매질의 원래 성질을 보여주는 것으로 판단된다.

SF₆ 용존수의 주입에 의한 전기비저항값의 분포, 수리전도도 분포 그리고 지하수 흐름을 서로 비교하면, SF₆ 용존수의 흐름이 대체로 서에서 동으로 일어나고 있음을 알 수 있다(Figs. 1, 5 and 6).

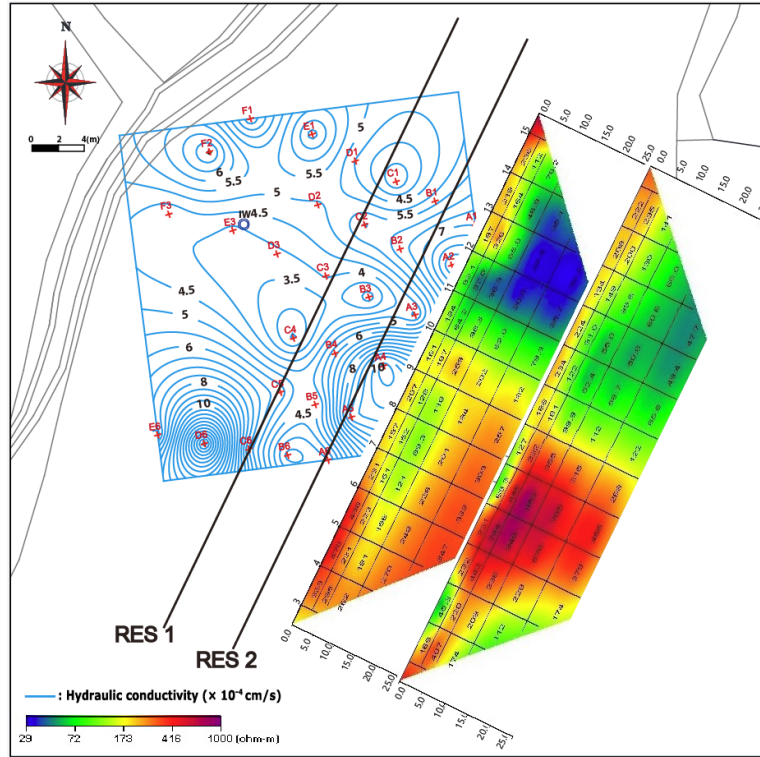


Fig. 5. Resistivity distribution along the resistivity survey lines (RES 1, RES 2) on 18 August, 2017.

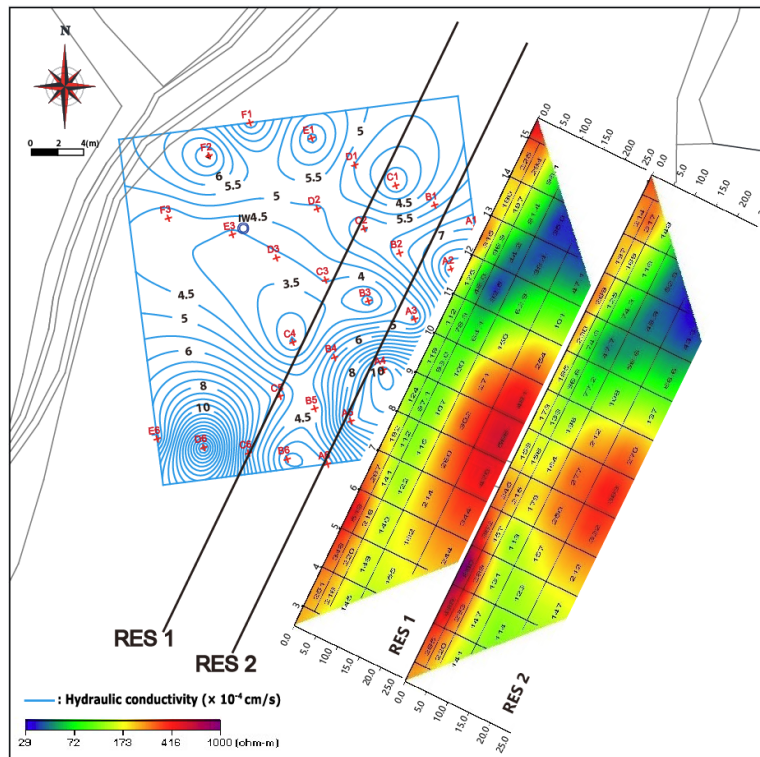


Fig. 6. Resistivity distribution along the resistivity survey lines (RES 1, RES 2) on 1 September, 2017.

결론

이 연구는 충북 음성군 대소면 내산리 연구부지에서 천부 지층의 CO₂누출 거동 모사시험의 일환으로 SF₆ 용존수를 주입하고 그 흐름과 전기비저항 값 그리고 표토층의 수리적 특성에 의해서 SF₆ 용존수의 유동 방향과 연구부지 천부 지층의 전기적 물성을 규명하였다.

입도분석에 의하면, 연구지역 표토는 전반적으로 모래에 해당하며, Hazen, Beyer, Sauerbrei, Kozeny의 입도분석 경험식에 의해서 산정된 수리전도도는 2.37E-04~1.60E-03 cm/s(평균 5.72E-04 cm/s)을 보인다. 연구부지내 공간적인 수리전도도 분포를 보면, 중앙부의 C4 지점에서 낮은 수리전도도를 보이고, 남부와 동부로 갈수록 수리전도도가 높게 나타난다.

1차 전기비저항탐사 결과와 2차 전기비저항탐사 결과에 의해서, SF₆ 용존수의 주입 후 시간이 경과할수록 측선의 오른쪽 부분(동쪽)에서 전기비저항값이 낮아지고 있으므로, SF₆ 용존수가 주입점으로부터 주로 동쪽으로 흐르는 것을 알 수 있다. 또한 SF₆ 용존수 주입에 의한 전기비저항값의 분포, 수리전도도 분포 그리고 지하수 흐름을 종합적으로 검토하면, SF₆ 용존수는 대체로 서에서 동으로 흐르고 있음을 알 수 있다. 아울러서, 주입 심도(21~24 m)부터 표토 가까이까지 SF₆ 용존수에 의해서 저 비항대가가 넓게 형성되어 있다. 이는 풍화가 심하게 진행되고 투수성이 높은 연구부지의 특성상 CO₂ 누출 위험성이 큰 것을 지시한다.

사사

이 연구는 한국환경산업기술원(KEITI)의 ‘CO₂ 저장 환경관리기술개발사업(2014001810003)’의 연구비 지원과 과학기술정보통신부의 한국연구재단 중견연구사업(NRF-2017R1A2B2009033)으로 수행되었습니다.

References

- Apps, J.A., Birkholzer, J.T., Spycher, N., Zheng, L., Ambats, G., Herkelrath, W.N., Kharaka, Y.K., Thordsen, J.J., Kakouros, E., Beers, S., 2010, Groundwater Chemistry Changes as a Result of CO₂ Injection at the ZERT Field Site in Bozeman, Montana, Project Report, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA, 2010, 25-68.
- Beyer, W., 1966, Hydrogeological investigations in the deposition of water pollutants, *Journal of Applied Geology*, 12(1), 599-606.
- Chae, Y.-R., 2010, Preliminary analysis of climate change damage in Korea using the PAGE model, *Environmental Policy Research*, 9(1), 31-55.
- Choi, H., Piao, J., Woo, N.C., Cho, H., 2017, Hydrochemical variations in selected geothermal groundwater and carbonated springs in Korea: a baseline study for early detection of CO₂ leakage, *Environmental Geochemistry and Health*, 39(1), 109-123.
- Chwae, U., Lee, D.Y., Lee, B.J., Ryoo, C.R., Choi, P.Y., Choi, S.J., Cho, D.L., Kim, J.Y., Lee, C.B., Kee, W.S., Yang, D.Y., Kim, I.J., Kim, Y., Yoo, J.H., Chae, B.G., Kim, W.Y., Kang, P.J., Yu, I.H., Lee, H. K., 1998, An Investigation and Evaluation of Capable Fault: Southeastern Part of the Korean Peninsula, *Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, KR-98(C)-22*, 301p.
- Freifeld, B., Zakim, S., Pan, L., Cutright, B., Sheu, M., Doughty, C., Held, T., 2013, Geothermal energy production coupled with CCS: a field demonstration at the SECARB Cranfield Site, Cranfield, Mississippi, USA. *Energy Procedia*, 37, 6595-6603.
- Hazen, A., 1892, Some Physical Properties of Sands and Gravels, with Special Reference to Their Use in Filtration,

Report to Massachusetts State Board of Health.

- Humez, P., Negrel, P., Lagneau, V., Lions, J., Kloppmann, W., Gal, F., Girard, J. F., 2014, CO₂-water-mineral reactions during CO₂ leakage: geochemical and isotopic monitoring of a CO₂ injection field test, *Chemical Geology*, 368, 11-30.
- IPCC, 2013, Technical Report, In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 129p.
- Jang, E., Yun, S.-T., Choi, B.-Y., Chung, D., Kang, H., 2012, Status and Implications of Regulatory Frameworks for Environmental, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 17(6), 9-22.
- Kasenow, M., 2002, Determination of Hydraulic Conductivity from Grain Size Analysis, Water Resources Publications LLC, 47-84.
- Kharka, Y.K., Cole, D.R., Thordsen, J.J., Kakouros, E., Nance, H.S., 2006, Gas-water-rock interactions in sedimentary basins: CO₂ sequestration in the Frio Formation, Texas, USA, *Journal of Geochemical Exploration*, 8, 183-186.
- Kim, J.H., 1998, Dipro 4 for Windows user manual, Hee Song Geotek. Co.
- Kim, K.-K., Hamm, S.-Y., Cheong, J.-Y., Kim, S.-O., Yun, S.-T., 2017, A natural analogue approach for discriminating leaks of CO₂ stored underground using groundwater geochemistry statistical methods, South Korea, *Water*, 9, 960.
- Kim, Y.-S., Cho, S.-H., Kyong, N.-H., Oh, H.-S., Moon, K.-C., 1998, Analysis and simulation of SF₆ tracer experiments for tracking the pollutant transport, *Journal of Korea Air Pollution Research Association*, 14(5), 395-410.
- Kozeny, J., 1953, Das wasser in boden, Grundwasserbewegung, In *Hydraulik*, Springer: Vienna, Austria, 280 – 445.
- Kwon, P.S., Kim, S., 2017, Scenario analysis for the achievement of the 2030 national greenhouse gas reduction goal in the Korean electricity sector, *Environment Policy*, 25(2), 129-163.
- Lee, K.-K., Lee, S. H., Yun, S.-T., Jeon, S.-W., 2016, Shallow groundwater system monitoring on controlled CO₂ release sites: a review on field experimental methods and efforts for CO₂ leakage detection, *Geosciences Journal*, 20(4), 569-583.
- Peter, A., Hornbruch, G., Dahmke, A., 2011, CO₂ leakage test in a shallow aquifer for investigating the geochemical impact of CO₂ on groundwater and for developing monitoring methods and concepts. *Energy Procedia*, 4, 4148-4153.
- Sharma, S., Cook, P., Berly, T., Lees, M., 2009, The CO₂ CRC Otway Project: Overcoming challenges from planning to execution of Australia's first CCS project, *Energy procedia*, 1(1), 1965-1972.
- Yun, S.-T., 2014, K-COSEM, Environmental Management Technology of CO₂ Storage; R & D Planning Report; Ministry of Environment: Sejong City, Korea.