

해설

시간 경과에 따른 반복적 물리탐사 기법을 이용한 이산화탄소의 지중처리 모니터링

김희준¹ · 최지향^{2*} · 한누리² · 남명진² · 송윤호³ · 이태종³ · 서정희²

¹부경대학교 환경탐사공학과

²서울대학교 지구환경시스템공학부

³한국지질자원연구원 지하수지열연구부

Time-lapse Geophysical Monitoring of CO₂ Sequestration

Hee Joon Kim¹, Jihyang Choi^{2*}, Nuree Han², Myung Jin Nam²,
Yoonho Song³, Tae Jong Lee³ and Jung Hee Suh²

¹Department of Environmental Exploration Engineering, Pukyong National University

²Department of Civil, Urban and Geosystem Engineering, Seoul National University

³Groundwater and Geothermal Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

요약 : 장기적인 관점에서 이산화탄소 지중처리는 대기 중의 온실 가스를 제거하는 가장 효과적인 방법 중 하나이다. 본 해설에서는, 이산화탄소 지중처리를 위한 세 가지 모니터링 프로젝트에 대해 살펴보고자 한다. 먼저 북해 Sleipner West 필드의 경우로, 여기에서는 염류대수층에 이산화탄소를 주입하고, 해수면에서 반복적으로 탄성파탐사를 실시하였다. 이를 통해, 대수층 내에서 이산화탄소 기포가 확산된 범위와 형태를 파악하였다. 다음은 Weyburn 유전의 경우로, 복잡한 파쇄 구조로 된 탄산염 저류층에 대규모의 이산화탄소를 주입하고 있던 이 유전에서 시간 경과에 따른 고해상도 P파 탐사를 실시하여 각기 다른 암석으로 이루어진 두 지층 사이의 이산화탄소 거동특성을 파악하였다. 마지막으로, 미국 캘리포니아 중부에 위치한 Lost Hills 유전의 경우는 시간 경과에 따라 시추공간 전자탐사 영상화 기법을 적용하여 동일한 시추공에서 얻은 유도 검층 자료와 잘 일치하는 전기전도도 영상을 얻고, 전기전도도가 시간 경과에 따라 감소하는 것으로부터 이산화탄소가 염수를 대체했다는 사실을 확인하였다.

주요어 : 이산화탄소, 지중처리, 대수층, 저류층, 모니터링, 시추공간 탐사, 시간 경과

Abstract : Geological sequestration of carbon dioxide (CO₂) is one of the most effective strategies for long-term removal of greenhouse gas from atmosphere. This paper reviews three projects for the CO₂ sequestration in geological formation. A unique CO₂ injection into a marine aquifer has been successfully monitored with repeated surface seismic measurements in the North Sea Sleipner West field. The seismic images reveal the extent and internal shape of the CO₂ bubble. Massive miscible CO₂ has been injected into a complex fractured carbonate reservoir at the Weyburn oil field. High-resolution time-lapse P-wave data were successfully obtained to map the features of CO₂ movements within the two thin zones of different lithology. From the time-lapse crosswell EM imaging at the Lost Hills oil field in central California, U.S.A., the replacement of brine with CO₂ has been confirmed through a decrease of conductivity. The conductivity image was successfully compared with induction logs observed in the two wells.

Keywords : CO₂ sequestration, aquifer, reservoir, monitoring, crosswell, time-lapse

서론

1997년 12월에 온실가스 배출량을 2012년까지 1990년 배출량의 5% 이하로 감소시키기로 회원국들이 합의한 교토의

2005년 10월 21일 접수; 2005년 11월 24일 채택

*Corresponding author

E-mail: cecile@gpl.snu.ac.kr

Address: School of Civil, Urban and Geosystem Engineering,
Seoul National University, Seoul, 151-742 Korea

정서(Kyoto Protocol)가 최근 발효되었다. 에너지에 대한 엄청난 수요를 충족하기 위해서 세계 곳곳에서 엄청난 양의 화석 연료를 소비함으로써, 이산화탄소의 대기 방출량은 전 지구적으로 급격한 증가를 보이고 있다. 이산화탄소를 대규모로 처분하기 위한 여러 연구들이 있었지만, 대기 중의 이산화탄소를 지속적으로 제거하는 가장 직접적인 방법 중 하나는 이산화탄소를 지하구조 내에 격리, 처분하는 것(CO₂ sequestration in geological formation, 이하 '지중처리')이다. 지중처리는 비용이

적게 들 뿐 아니라 환경적 견지에서도 안전하다(Torraca, 2005). 이산화탄소를 지중처리를 하기에 이상적인 장소로는 천해 염류대수층(Mckenna *et al.*, 2003), 석유 저류층(Li, 2003), 석탄층(Van Bergen *et al.*, 2005) 등이 있다. 최근 채기탁 등(2005)은 지중처리기술의 지구화학적 개념과 국내외 연구개발 동향에 대해 상세히 보고하였다.

이산화탄소를 지중처리하기 위해서는 주입 과정 전후의 이산화탄소 거동을 정밀하게 모니터링하는 기법이 필요하다. 모니터링 기법으로는 크게 세 가지 방법이 있을 수 있다. 첫째, 관측정을 이용한 모니터링이다. 이는 직접 측정이 가능하지만 비용이 많이 들고 광역적 정보를 얻을 수 없으며 관측정을 통해 이산화탄소가 누출될 위험이 있다. 둘째, 회수율 증가를 목적으로 저류층의 탄화수소 유동을 모니터링하기 위해 개발한 방법으로, 이미 석유 산업 분야에서 적용하고 있는 탐사법인 시간 경과(time-lapse) 3차원 탄성파탐사법(4-D seismic)이 있다. 이 기술은 이산화탄소 저장을 포함한 일반적인 모니터링 기법의 기초가 되리라 예상되지만(Eiken *et al.*, 2000; Li, 2003; Raef, 2005; Terrel *et al.*, 2004; Benson and Davis, 2005), 역시 비용이 많이 든다. 마지막으로, 전자기파를 이용한 시추공간 토모그래피 분야(Zhou *et al.*, 1993; Wilt *et al.*, 1995; Alumbaugh and Morrison, 1995; Newman, 1995; Alumbaugh and Newman, 1997)에서 다양한 연구와 응용이 이루어지고 있는 고해상도 전기전도도 영상화 기술이 있다. 시추공간 전자탐사(crosswell electromagnetic(EM))법은 이론적 완성도가 높고 실제 탐사 분야에서도 많이 응용되고 있지만 탐사 자료를 처리하기 위한 빠르고 안정적인 역산 방법을 개발하여야 한다는 과제가 남아있다. 최근에 적분 방정식 해에 대한 비선형 근사법(Habashy *et al.*, 1993)을 단일 시추공(Kim *et al.*, 2003)과 시추공간 전자탐사(Song *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2004) 자료의 역산에 적용한 사례가 있다.

본 해설에서는 이산화탄소 지중처리의 세 가지 예를 통해서 지중처리를 위해 시행했던 모니터링 기법에 대해 고찰해보고자 한다. 첫 번째로, 북해 Sleipner West 필드의 천해 염류대수층(saline aquifer)에 주입한 이산화탄소를 모니터링한 예로서(Eiken *et al.*, 2000), 1994년과 1999년에 일반적인 스트리머를 이용해 고해상도 탄성파탐사를 실시하여 좋은 결과를 얻었다. 나머지 두 사례는 석유 저류층 내에 이산화탄소를 지중처리한 경우로, 예로부터 석유 산업에서 석유 회수율을 높이기 위해 일반적으로 이용해온 이산화탄소 주입법(CO₂ flooding)이다. 이는 유전 개발이 계속되는 한 이산화탄소의 지중처리가 지속될 수 있는 방법으로, 캐나다 Weyburn 유전과 미국 Lost Hills 유전에서 적용한 사례를 소개한다. 캐나다 Weyburn 유전에서는 모니터링을 위해 1999년부터 수평 시추공간 탄성과 영상화 기법을(Li, 2003; Terrell *et al.*, 2004), 미국 Lost Hills 유전에서는 1999년부터 탄성파와 전자탐사 영상화 기법을 함께 적용하였다(Patzek *et al.*, 2000).

이산화탄소 거동특성(Lifecycle)

Johnson *et al.* (2001)은 천해 염류대수층에 주입한 이산화탄소의 거동특성을 정리하였다. 염수(brine)로 포화된 사암층 내에 이산화탄소를 주입하면 저류층에 많은 변화가 일어난다. 주입한 이산화탄소는 전기비저항이 약 100 ohm-m 정도로 0.3 ohm-m 이하인 염수보다 월등히 높다. 또한 이산화탄소는 임계압력(critical pressure)이 7.4 MPa, 임계온도가 31 °C로, 임계온도 이하이면서 임계압력 이상일 때에는 액체 상태인 반면, 임계온도 이상에서는 항상 기체와 같은 양상을 보인다. 이산화탄소 주입에 따른 암석의 탄성파속도 변화는 이산화탄소 포화도 뿐만 아니라 암석의 공극압 상승에도 크게 영향을 받는다(Wang *et al.*, 1999; Xue and Ohsumi, 2004).

지층 내부에 이산화탄소를 주입하면, 지층수에 용해되지 않은 기체 상태의 이산화탄소(free CO₂, 이하 '유리이산화탄소')는 부력으로 인해 저류층 위쪽으로 이동하면서 염수를 대체한다. 위쪽으로 이동하던 유리이산화탄소는 저류층 상부에 있는 불투수층(impermeable seal)으로 인해 저류층에 포유되게 된다. 이를 첫번째 포유(trapping) 메커니즘인 '구조적 포유(structural trapping)'라 한다. 이렇게 구조적으로 포유된 이산화탄소는 염수에 녹기 시작하여 '용해 포유(solubility trapping)'가 이루어진다. 이산화탄소에 의해 포화된 염수는 무거워져 아래로 이동하게 되므로, 결과적으로 용해 포유에 의해 이산화탄소는 저류층 하부에 용해된 상태로 있게 된다. 이로 인해 지층수 내의 이온함량이 늘어나게 되므로 반복적인 전자탐사를 통해 이온함량을 모니터링 하면 용해된 이산화탄소(dissolved CO₂, 이하 '용해이산화탄소')를 탐지할 수 있을 것이다.

이산화탄소가 염수에 용해될 때 지층수에 과잉 수소와 중탄산염(bicarbonate)이 방출되어 저류층의 pH가 감소한다. 이와 같이 형성된 산성적 환경 하에서는 암석공극률의 작은 증가를 야기하면서, 산성에 약한 광물들이 지층수에 용해된다. 광물이 용해되면서 지층수에는 칼슘, 마그네슘, 철 등의 금속 양이온이 방출되고, 이 양이온은 중탄산 음이온(bicarbonate anion)과 결합함으로써 방해석(calcite), 백운석(dolomite), 능철광(siderite) 등과 같은 탄산염광물(carbonate mineral)을 형성한다. 이와 같은 과정으로 이산화탄소가 광물에 포유되는 것을 '광물 포유(mineral trapping)'라 하며, 이산화탄소를 가장 조밀한 상태로 포유하여 고정하기 때문에 이 광물 포유가 가장 안전한 형태라 할 수 있다. 또한 탄산염광물이 계속해서 생성됨에 따라, 지층의 공극률과 유체투과율(permeability)은 감소하고 암석조적은 더욱 강하게 결합하게 된다.

Sleipner West 필드에서의 SACS (Saline Aquifer CO₂ Storage) 프로젝트

북해에 있는 Sleipner West 필드의 탄화수소 가스(hydrocarbon

gas)에는 이산화탄소가 10% 가까이 함유되어 있다. Statoil사와 그 협력 회사들은 이산화탄소를 대기에 방출하지 않고, 해저 800~1000 m 깊이의 염류대수층인 Utsira 층에 재주입하기로 함으로써(Fig. 1), 유전 운영기간 동안 약 2천만 톤에 이르는 이산화탄소가 대기에 방출되는 것을 막을 수 있을 것으로 기대하고 있다. 두꺼운 셰일층으로 둘러싸여 있는 이 Utsira 층은, 공극률이 35~40%이고 유체투과율이 1~8 Darcy 인, 사암 사이사이에 두께가 1 m 이하인 얇은 셰일층들이 협재된 형태이며, 이층의 상하부는 다시 두꺼운 셰일층에 의해 차폐되어 있다. 이 층은 북해의 매우 넓은 지역에 걸쳐 나타난다.

주입된 이산화탄소의 온도와 압력은 거의 임계점(온도 35~40°C, 압력 8.0~11.0 MPa)에 가까울 것이다. 수치 유동 모델링에 의하면, 주입된 이산화탄소는 대부분 기체 상태로 존재하고, 유리이산화탄소와 용해이산화탄소의 공간적 분포는 큰 차이가 없을 것으로 예측되었다. 사암 사이에 얇은 셰일층이 있으므로, 이산화탄소는 일단 셰일층 아래에 10 m 이상으로 두꺼운 기포 상태로 축적되고, 25년 이상의 장기적인 관점에서 보면 이산화탄소의 이동은 상부 불투수층의 기복과 수평 유체투과율 차이에 의해 주로 좌우될 것으로 예상된다.

주입된 이산화탄소의 거동특성을 모니터링하고 예측하기 위한 연구 프로젝트인 SACS에서는, 이산화탄소 주입전인 1994년에 고심도 탄화수소 가스 저류층 영상화를 위한 기초 탐사를 미리 수행하였으며, 3년 동안 약 200만 톤의 이산화탄소를 주입한 후인 1999년 10월에 모니터링을 위한 탄성파탐사를 실시하였다. Fig. 2에서 두 탄성파탐사의 영상을 비교하였다. 이산화탄소 주입 전의 자료에 비해, 주입한 후의 자료에서 Utsira 층 내의 반사면이 크게 증가된 것을 볼 수 있다. 주입 후 자료의 반사면 진폭이 주입 전 진폭의 3배에 가깝다. 이 반사계수(reflectivity)의 변화는 사암층 하부에서 더 크므로, 대부분의 이산화탄소가 아직 사암층의 상부까지 이동하지 못하였음을 알 수 있다.

이산화탄소 주입법

Li (2003)는 캐나다 Saskatchewan 지역의 Weyburn 유전에서 행해진 이산화탄소 주입법(CO₂ flooding)에 대해 해설하였다(Fig. 3). 이산화탄소 주입법을 이용한 석유 회수는 석유 산업에서는 잘 알려진 기술이지만, 혼화(miscible) 이산화탄소 주입법의 과정은 매우 복잡하다. 성분적인 견지에서, 석유와 초임계점의(supercritical) 이산화탄소 상태는 시간, 압력, 저류층 내에서의 위치에 따라 복합적으로 변화한다. 이러한 변화는 시간 경과 탄성파 반응의 해석에 많은 영향을 끼치므로, 어떤 매커니즘을 통해서 주입된 이산화탄소에 의해 석유의 상태가 변화하는지를 파악하는 것은 무척 중요하다.

임계점 이상의 이산화탄소와 석유가 만나면서, 이산화탄소

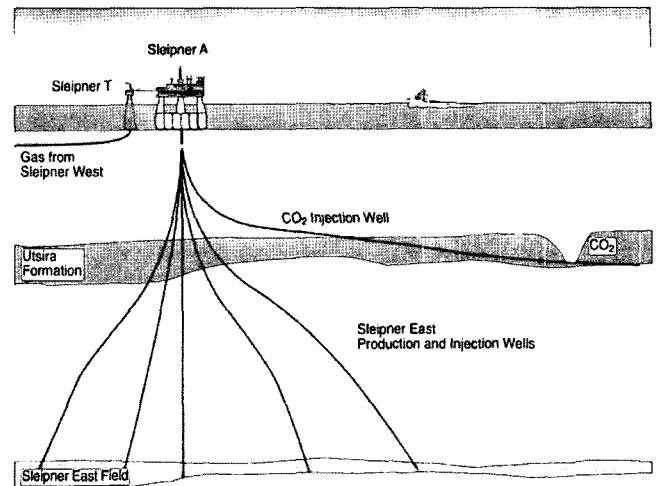


Fig. 1. Cross-section through the injection well in a Sleipner aquifer CO₂ storage project (after Eiken *et al.*, 2000).

의 물분율(mole fraction)이 약 66% 가까이 될 때까지 이산화탄소는 용해되고, 용해된 이산화탄소로 인해 석유상(oil phase)은 팽창하게 된다. 이산화탄소가 많이 용해된 석유다량상(oil-rich phase)에 비해, 이산화탄소에 석유가 기화된 탄화수소가 섞인 이산화탄소다량상(CO₂ rich phase)은 상대적으로 점성(viscosity)이 낮아 유동성이 더욱 커진다. 만약 압력이 임계점 이상으로 높게 유지되면, 최소혼화도압력(minimum miscibility pressure)이 될 때까지 이산화탄소다량상은 계속적으로 석유에 용해된다. 동시에 이산화탄소다량상이 석유에 용해되면서 계속 석유가 기화하므로, 결과적으로는 이산화탄소와 석유가 불규칙한 비율로 섞인 혼합 유체가 존재하는 혼합상(miscible phase)이 된다. 석유와 이산화탄소 혼합상은, 물에 비해서 저류층 내의 석유와 주입된 이산화탄소 사이에서 작은 표면장력을 받으므로, 더욱 자유롭게 흐를 수 있다. 반면에 저류층 압력이 너무 낮으면, 이산화탄소다량상은 비교적 무거운 탄화수소보다는 메탄 등 가벼운 탄화수소에만 선별적으로 용해된다. 따라서, 이산화탄소가 처음 주입되었을 때에 비해 석유에 용해되는 양이 감소하여, 석유 회수율은 낮아지게 된다. 이산화탄소는 석유보다 점성이 매우 낮아서, 이산화탄소다량상은 점성 수지 현상(viscous fingering)에 의해 석유와 섞이지 않고 흘러가는 경향을 보일 것이고, 이로 인해 평면적인 침투 효율이 감소한다. 그 결과 공극 부피의 5%가 주입되기 전에 불균질 저류층 내에서 이산화탄소가 생산정으로 새어나가는 현상이 일어날 수 있다. 또한, 이산화탄소는 탄화수소보다 수용성이 훨씬 크므로, 물 속에 확산되어 남아있는 석유를 팽창시켜서 유동시킬 수 있다.

Weyburn 필드에서의 고해상도 4-D P파 탐사

Weyburn 필드에서는, 수반 가스캡(gas cap)이 없는 낮은

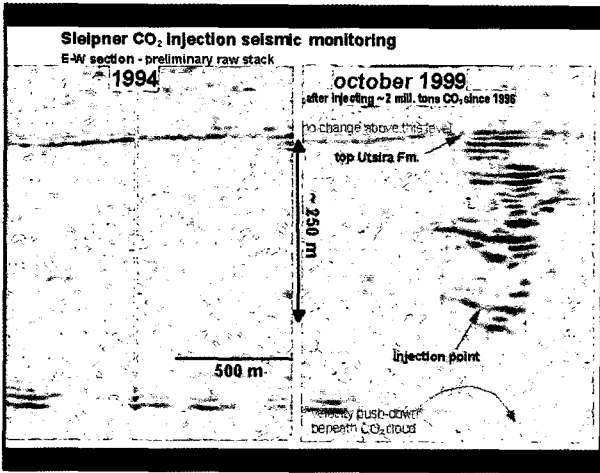


Fig. 2. Seismic section through the injection point, in 1994 (left) and 1999 (right) (after Eiken et al., 2000).

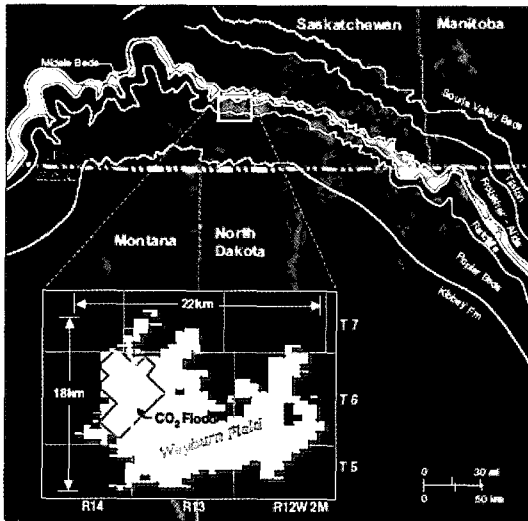


Fig. 3. Location of Weyburn Field (after Li, 2003).

GOR (<math><30 \text{ m}^3/\text{m}^3</math>) 석유정에서의 석유 생산과 회수를 극대화하기 위해서, 75개의 주입정을 설치하여 주입 패턴을 적용한다. 현재는 그 중 6개에는 WAG (water alternating gas) 패턴을, 13개에는 SSWG (simultaneous but separate water and gas injection) 패턴을 약 26 km² (Fig. 3) 넓이의 지역에 적용하고 있다. 일반적인 SSWG 패턴을 적용하기 위해서는, 중심부의 수직 물 주입정 라인으로부터 대략 50~60 m 떨어진 지점에 두 개의 수평 이산화탄소 주입정이 추가로 필요하다. Fig. 4는 SSWG 패턴의 절반을 보여주는 투시도이다. 이 지역의 저류층 상부는 백운석층(이하 'Marly층'), 하부는 석회암층(이하 'Vuggy층')으로 이루어져 있다. Marly층에 대량 주입한 96%의 순수 이산화탄소는 수평방향으로 이동할 뿐 아니라, Marly층과 Vuggy층 사이의 압력과 유체투과율의 차이에 의해, 수직

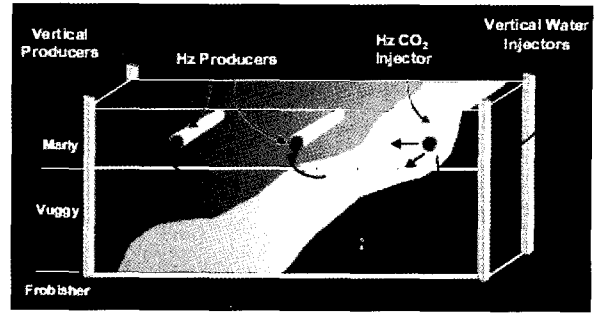


Fig. 4. The simultaneous but separate water and CO₂ injection method used in Weyburn Field's miscible CO₂ flood. The crosswell seismic survey was recorded between a horizontal producer and a horizontal injector (after Li, 2003).

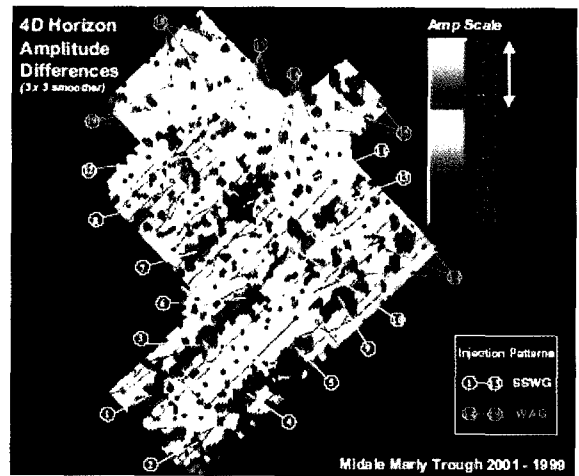


Fig. 5. Time-lapse amplitude difference map from horizon amplitudes extracted at the upper reservoir unit, porous dolomites, into which CO₂ has been injected (after Li, 2003).

방향인 아래쪽으로도 이동한다. Marly층에 이산화탄소를 주입한 이후, 수직적으로 물을 주입하여 이산화탄소의 주입 방향과 유동 방향을 조정하면, Vuggy층의 이산화탄소는 부력과 점성력에 의해 Marly층으로 유도되면서 석유를 밀어내, 수평정과 수직정 모두에서 석유를 회수할 수 있다. 석유회수와 동시에 회수되는 이산화탄소는 다시 주입한다.

기초 탐사와 관측 탐사 사이의 시간 경과에 따른, Marly층에서의 진폭 변화를 Fig. 5에서 나타내었다. Fig. 5에 현재 적용하고 있는 19개의 주입 패턴을 표시하였다. 이산화탄소 주입법을 적용한 지역에서, 몇몇 경우를 제외하고 시간 경과에 따른 이상은 대부분 주 과쇄 방향인 NE-SW 방향으로 배열한 수평, 수직 주입정의 방향과 평행하게 나타났다. 진폭 이상은 각 주입정 근처, 특히 이산화탄소 농도가 증가하게 되는 SSWG 주입정 근처에서 크게 나타난다. 수평적으로 이산화탄소 가스는 주입정에서 생산정으로 가는 방향을 따라 지속적으로 확산되며, 이런 경향은 남쪽 지역에서 두드러진다.

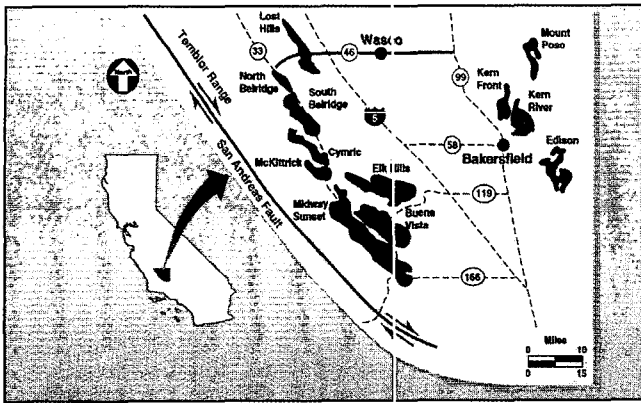


Fig. 6. Major oil fields in San Joaquin valley in central California, U.S.A. (after Patzek *et al.*, 2000).

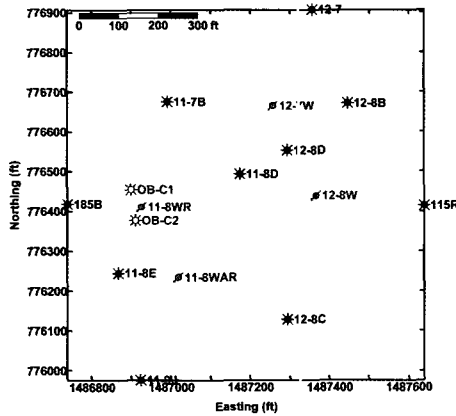


Fig. 7. Site map for the Ellis pilot located at the southern margin of Lost Hills oil fields (modified from Patzek *et al.*, 2000). CO₂ is injected through well 11-8WR and monitored by two observation wells of OB-C1 and OB-C2.

Lost Hills 유전에서의 전자탐사 모니터링

Lost Hills 유전(Fig. 6)은 미국 캘리포니아주 중앙의 San Joaquin 분지 서쪽 끝에 있으며, Belridge Diatomite로 알려진 마이오세의 Monterey 지층의 상부에서 석유 생산이 이루어진다(Patzek *et al.*, 2000). 이 저류층은 평균 800 ft 두께의 규조토성 이암(diatomaceous mudstone)으로, 유체투과율은 매우 낮고 공극률은 높으며(30~65%), 석유 포화율(oil saturation)은 양호하다(50%). 석유 저류층을 모니터링 하기 위해 유리섬유(fiberglass)로 케이싱한 관측정 두 개를 24.536 m의 간격으로 시추했다(Fig. 7의 OB-C1과 OB-C2). 관측정 사이에는 현재 물과 이산화탄소를 주입하고 있는 주입정(Fig. 7의 11-8WR)이 있는데, 이 주입정은 수압파쇄에 의해 일어나 약 N 60°E 방향의 수직 파쇄대가 발달되어 있다. 두 개의 관측정을 포함한 지역에서 시추공간 전자탐사와 탄성파탐사를 수행하였다. Kim and Song (2003)은 시추공간 전자탐사 자료 중 759 Hz의 수직방향 자기 송신원에 의한 수직방향 자기장만을 이용

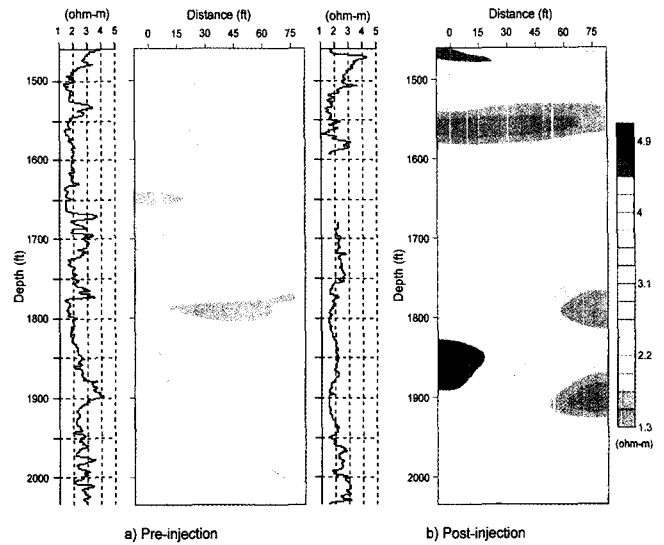


Fig. 8. Time-lapse CO₂ injection images derived from the 2.5-D inversion of crosswell EM data collected at the Lost Hills oil field (modified from Kim and Song, 2004). The pre-injection resistivity image is compared with induction resistivity logs. The pixel size for these images is 2.5 × 2.5 m. The images are horizontally elongated by a factor of 2.3.

하여 2.5차원 역산한, 이산화탄소 주입 전(1999년 8월)과 후(2001년 4월)의 전기비저항 단면도를 제시했다(Fig. 8). 주입 전의 2.5차원 단면도는 송신정과 수신정에서 측정한 유도 검층 결과와 잘 일치한다(Fig. 8(a)). 석유/염수 혼합 저류층에 이산화탄소를 주입한 결과 전기비저항이 변하였으며 이로부터 이산화탄소가 염수를 대체한 것으로 간접적으로 해석할 수 있다. Fig. 8를 보면, 전기비저항 분포에 있어서 많은 변화를 관찰할 수 있으며, 전기비저항 범위가 이산화탄소 주입 전에는 1.5~3.9 ohm-m이지만, 주입 후에는 1.3~4.9 ohm-m로 크게 변화된 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 주입된 이산화탄소가 이동하면서 전기비저항의 증가를 유발하였다는 것을 분명히 보여준다.

결론

북해 Sleipner West 필드의 염류대수층에 이산화탄소를 주입하면서 반복적 지표 탄성파탐사를 통해 이산화탄소의 거동을 성공적으로 모니터링하여 이산화탄소 기포의 내부 형태 및 외부 확산 범위를 파악할 수 있었다. 이로부터 반복적 지표 탄성파 탐사가 지중처리한 이산화탄소의 거동을 파악하는 데 매우 효과적임을 확인할 수 있었다. Weyburn 유전에서는 막대한 양의 이산화탄소를 계속적으로 복잡한 파쇄 구조 탄산염 저류층에 주입하여 왔다. 고해상도 4-D P파 탐사를 적용하여 모니터링 한 결과, 다른 암석으로 이루어진 두 지층 사이에서의 이산화탄소 거동특성을 성공적으로 파악할 수 있었다. 이와 같은 저류층 특성 평가(characterization), 모니터링, 거동 예측은 최

적의 저류층 관리를 위한 중요한 요소들이 된다. 마지막으로, 미국 캘리포니아 중부 Lost Hills 유전에서는 석유 회수를 증가를 위해 석유/염수 혼합 저류층에 이산화탄소를 주입하였다. 시간 경과에 따른 시추공간 전자탐사 결과, 주입된 이산화탄소로 인해 저류층의 전기전도도가 변화하고, 이로부터 이산화탄소가 염수를 대체한 것을 간접적으로 확인하였다. 이 전기전도도 영상은 두 관측점의 유도 검층 자료와 잘 일치하였다.

이산화탄소의 지중처리에 대한 대규모 연구는 선진국을 중심으로 많이 행해지고 있다. 반면에, 주입된 이산화탄소의 지층 내 거동을 모니터링하는 프로그램에 대한 보고는 최근 감소추세에 있다. 이는 시간과 비용이 많이 드는 4-D 탄성파탐사가 모니터링 프로그램에서 차지하는 비중이 그만큼 높다는 것을 반영하고 있는지도 모른다. 지층 내의 유체 거동에 따른 물성 변화에 대한 연구도 주로 탄성파속도에 집중되어 있다. 그러나 암석의 물성 변화에서 전기적 물성 변화가 탄성적 물성 변화보다 훨씬 크다는 점을 생각해 보면 전자탐사의 적용 가능성은 매우 희망적이다. 또한 전자탐사는 그 적용분야가 급격히 넓어지는 추세이며 그 단적인 예가 가스 하이드레이트를 비롯한 해저 탄화수소 자원의 직접 탐지(e.g., marine CSEM)이다. 우리나라는 여느 나라 못지 않게 전자탐사 분야에 우수한 인적자원이 많지만 그 연구 대상이 주로 소규모 토목 공사의 지반 조사 분야나 환경 분야에 치우친 경향이 있다. 이산화탄소 지중처리이나 해저 탄화수소 탐사와 같은 대규모 프로젝트에 전자탐사를 더욱 적극적으로 적용하려는 노력이 필요하다.

사 사

이 연구는 2005년도 한국지질자원연구원의 일반사업 심부 지열에너지 개발사업 및 한국과학재단(R05-2004-12529-0)의 연구비 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- 채기탁, 윤성택, 최병영, 김강주, Shevalier, M., 2005, 이산화탄소 저감을 위한 지중처분기술의 지구화학적 개념과 연구개발, *자원환경지질*, **38**, 1-22.
- Alumbaugh, D. L., and Morrison, H. F., 1995, Theoretical and practical considerations for crosswell electromagnetic tomography assuming a cylindrical geometry, *Geophysics*, **60**, 846-870.
- Alumbaugh, D. L., and Newman, G. A., 1997, Three-dimensional massively parallel electromagnetic inversion-II. Analysis of crosswell electromagnetic experiment, *Geophys. J. Int.*, **128**, 355-363.
- Benson, R., and Davis, T., 2005, CO₂ sequestration in a depleted oil reservoir - west Pearl Queen field, *67th EAGE Conference & Exhibition, Extended Abstracts*, 137 p.
- Eiken, O., Brevik, I., Arts, R., Lindeberg, E., and Fagervik, K., 2000, Seismic monitoring of CO₂ injected into a marine aquifer, *70th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys.*, Expanded Abstracts, 1623-1626.
- Habashy, T. M., Groom, R. M., and Spies, B. R., 1993, Beyond the Born and Rytov approximations: a nonlinear approach to electromagnetic scattering, *J. Geophys. Res.*, **98**, 1795-1775.
- Johnson, J. W., Nitao, J. J., Steefel, C. I., and Knauss, K. G., 2001, Reactive transport modeling of geologic CO₂ sequestration in saline aquifers: the influence of intra-aquifer shales and the relative effectiveness of structural, solubility and mineral trapping during prograde and retrograde sequestration, *Proc. 1st Nat. Conf. on Carbon Sequestration*, Washington, D.C.
- Kim, H. J., Lee, K. H., and Wilt, M., 2003, A fast inversion method for interpreting borehole electromagnetic data, *Earth Planets Space*, **55**, 249-254.
- Kim, H. J., and Song, 2003, Efficient crosswell EM tomography for monitoring geological sequestration of CO₂, *Geosystem Eng.*, **6**, 13-18.
- Kim, H. J., Song, Y., Lee, K. H., and Wilt, M., 2004, Efficient crosswell EM tomography using localized nonlinear approximation, *Expl. Geophys./Butsuri-Tansa/Mulli-tamsa*, **35/57/7**, 51-55.
- Li, G., 2003, 4D seismic monitoring of CO₂ flood in a thin fractured carbonate reservoir, *Leading Edge*, **22**, 690-695.
- McKenna, J., Gurevich, B., Urosevic, M., and Evans, B., 2003, Estimating bulk and shear moduli for shallow saline aquifers undergoing CO₂ injection, *Proc. 6th SEGJ Int. Symp.*, 490-497.
- Newman, G. A., 1995, Crosswell electromagnetic inversion using integral and differential equations, *Geophysics*, **60**, 899-911.
- Patzek, T., Wilt, M., and Hoverstern, G. M., 2000, Using crosshole electromagnetics (EM) for reservoir characterization and waterflood monitoring, *2000 SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference*, Texas, SPE 59529.
- Raef, A. B., Miller, R. D., Franseen, E. K., Byrnes, A. P., Watnet, W. L., and Harrison, W. E., 2005, 4D seismic to image a thin carbonate reservoir during a miscible CO₂ flood: Hall-Gurney Field, Kansas, USA, *Leading Edge*, **24**, 521-526.
- Song, Y., Kim, J.-H., and Chung, S.-H., 2001, An efficient 2.5-D inversion of loop-loop EM data, *Proc. 5th SEGJ Int. Symp.*, 153-160.
- Terrell, M., Galikeev, T., Yamamoto, H., Davis, T., and Benson, R., 2004, Weyburn Field: from integrated 4D 9C seismic analysis to flow simulation, *66th EAGE Conference & Exhibition, Extended Abstracts*, A003.
- Torraca, L. C., 2005, Carbon dioxide final disposal from plants of amines treatment and gas fields, *67th EAGE Conference & Exhibition, Extended Abstracts*, 138 p.
- Van Bergen, F., Winthagen, P., Pagnier, H., Jura, B., Kobiela, Z., and Skiba, J., 2005, Monitoring techniques applied for CO₂ injection in coal, *67th EAGE Conference & Exhibition*,

Extended Abstracts, A018.

- Wang, Z., Cates, M. E., and Langan, R. T., 1999, Seismic monitoring of a CO₂ flood in a carbonate reservoir: A rock physics study, *Geophysics*, **63**, 1604-1617.
- Wilt, M. J., Alumbaugh, D. L., Morrison, H. F., Becker, A., Lee, K. H., and Deszcz-Pan, M., 1995, Crosshole electromagnetic tomography: System design considerations and field results, *Geophysics*, **60**, 871-885.
- Xue, Z., and Ohsumi, T., 2004, Seismic wave monitoring of CO₂ migration in water-saturated porous sandstone, *Expl. Geophys./Butsuri-Tansa/Mulli-Tansa*, **35/57/7**, 25-32.
- Zhou, Q., Becker, A., and Morrison, H. F., 1993, Audio-frequency electromagnetic tomography in 2-D, *Geophysics*, **58**, 482-495.