

이산화탄소 지중저장 Pilot 부지 선정을 위한 의성지역 MT 탐사

이태종^{1*} · 한누리¹ · 고광범² · 황세호¹ · 박권규¹ · 김형찬¹ · 박용찬¹

¹한국지질자원연구원
²(주)지오맥스

Site Investigation for Pilot Scale CO₂ Sequestration by Magnetotelluric Surveys in Uiseong, Korea

Tae Jong Lee^{1*}, Nuree Han¹, Kwang Beom Ko², Seho Hwang¹, Kwon Gyu Park¹, Hyung Chan Kim¹, and Yong Chan Park¹

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)

²Geomax Consultant Co.

요 약: 이산화탄소 지중저장을 위한 pilot 시험 부지선정을 목적으로, 그 후보지 중 하나인 경상북도 의성 지역에서 2 차원 및 3차원 자기지전류(MT) 탐사를 수행하였다. MT 탐사의 목적은 주입된 이산화탄소의 누출통로로 작용할 수 있는 심부 파쇄대를 사전에 탐지하고자 하는 데에 있다. 탐사지역에 분포한 전자기적 잡음원의 영향에 의해 1 Hz 이상의 자료만을 이용하여 2차원 및 3차원 역산을 수행한 결과, N55~65°W 방향으로 약 1.6 km 심도까지 발달한 파쇄대가 저비 저항 이상으로 뚜렷이 나타났으며 이는 백악기 주향이동 단층인 가음단층과 금천단층과 연관이 있는 것으로 해석되었다. 반면 연구지역의 동쪽에는 비록 천부에 소규모 파쇄대가 존재하나 약 2 km 심도까지는 전반적으로 균질한 층을 보이는 것으로 나타났다. 향후 시험시추 및 시추공을 이용한 정밀 탐사가 이루어져야 할 것이며, 대상지의 암석인 일직층의 공극률이 평균 1.47%로 매우 낮으므로 수압파쇄를 통한 인위적인 저류 공간의 생성이 필요할 것으로 판단된다.

주요어: 이산화탄소, 지중저장, 심부 파쇄대, 공극률, 자기지전류 탐사

Abstract: A magentotelluric (MT) survey at the Uiseong area has been performed for the site investigation of pilot scale CO₂ sequestration. The purpose of the MT survey is to delineate deeply extended fracture systems that can act as a leakage path of injected CO₂ plume. Since the target area is extremely noisy in electromagentic sense, low frequency data below 1 Hz cannot be used for inversion. Two- and three-dimensional interpretation of the MT data showed a very clear conductive anomaly, which has the direction of N55~65°W and is extended roughly down to 1.6 km. It have the same direction with the strike-slip faults, the Gaeum and Geumcheon Faults. On the contrary, the eastern part of the survey area shows relatively homogeneous to the depth of 2 km though some small fractures at shallow depths can be found. Test drilling and high-definition borehole surveys should be followed at the eastern part of the survey area and hydraulic fracturing is required for injection of CO₂, because mean porosity of the sedimentary rock in the area is only 1.47%.

Key words: Carbon Dioxide, CO₂, sequestration, fracture system, porosity, magnetotelluric survey

서 론

지구 온난화의 주요 원인으로 거론되는 온실가스의 배출 억제는 교토의정서의 단계적 발효에 따라 세계적인 화두가 되고 있다. 이에 따라 대표적인 온실가스로 지목되고 있는 이산화탄소(CO₂)의 배출억제 혹은 감축을 위한 세계 각국의 노력이 경

2009년 9월 23일 접수; 2009년 10월 18일 채택

*Corresponding author

E-mail: megi@kigam.re.kr

Address: KIGAM, 92 Gwahang-no Yuseong-gu,
Daejeon, 305-350, Korea

주되고 있다. 우리나라에서도 이산화탄소 지중저장을 위한 다양한 연구기관이 이루어져, 2002년부터 과학기술부의 지원으로 지중저장을 위한 기초기술 개발로서 주입된 이산화탄소의 거동을 해석하기 위한 수치모델링 기술(김중휘와 김준모, 2007; 2008)과 모니터링 기술(박미경 등, 2007)에 대한 연구가 이루어진 바 있다.

이산화탄소의 지중저장 기술은 그 대상 지질구조에 따라 원유 회수율 증대를 위한 CO₂-EOR(Emberley *et al.*, 2004; White *et al.*, 2004), 혹은 고갈된 유전을 이용하는 유전/가스전처분(Li, 2003), 석탄층에 CO₂를 주입하고 메탄을 회수하는 CBM (coal bed methane)을 포함하는 석탄층 처분(Van Bergen

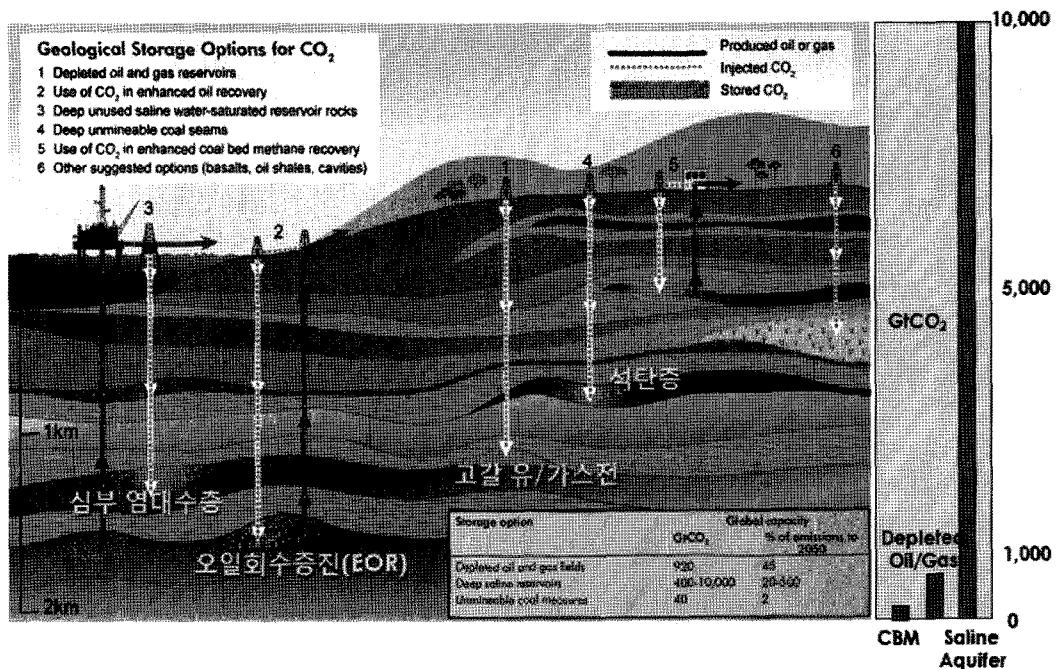


Fig. 1. Geological storage options for CO₂ and estimated global capacity for each option (KIGAM, 2008; IPCC, 2005).

et al., 2005), 심부 대수층을 이용하는 대수층 처분(Korbo and Kaddour, 1995; McKenna *et al.*, 2003), 암염층 처분 등이 있다(Fig. 1). 이 외에도 최근에는 화산성 지열지대가 아닌 지역에서 심부 지열자원을 개발하여 전기를 생산하는 기술인 EGS (enhanced geothermal system) 기술에서 지열유체(carrier)로써 물 대신 이산화탄소를 사용해, 생산정에서 회수되는 이산화탄소의 열은 지열에너지로서 활용된 후 다시 주입정을 통해 주입되고, 회수되지 않는 이산화탄소는 지중처분에 해당되는 것으로 보는 이른바 CO₂-EGS 시스템(Brown, 2000)도 제안되어 그 효용성에 대하여 다양한 연구가 진행 중이다(Pruess, 2006). 이러한 기술은 특히 우리나라와 같이 공극률이 낮은 결정질 암반에서도 수압파쇄에 의한 인공적인 저류공간 생성을 통하여 이산화탄소 지중 저장의 가능성을 시사 한다.

지중 저장 분야에 본격적으로 연구비 지원이 이루어진 것은 2005년에 당시 해양수산부의 지원으로 수행되고 있는 ‘이산화탄소 해양처리기술개발’ 프로젝트이다. 동 연구사업은 이산화탄소의 포집으로부터 수송 그리고 지중저장까지의 일련의 과정을 모두 아우르는 대형 연구사업으로서 지중저장의 경우 염수대수층과 대륙붕 유전/가스전을 주된 대상으로 한다. 해양지중저장을 위해서는 우선 육상에서 pilot plant의 건설을 통한 이산화탄소의 주입, 주입후의 거동 예측 및 모니터링 기술 등 기초적인 기술의 확보가 필수이며, 이를 위한 최적의 육상 pilot plant 부지 선정의 필요성이 대두되었다.

이 연구에서는 이산화탄소 지중저장을 위한 pilot plant 부지 선정을 위하여, 우선 기존 온천 시추공 자료 및 문헌조사, 지질조사 자료를 종합하여 경상계 퇴적층 중 경상북도 의성군 지역을 하나의 유력한 후보지로 선정하였다. 또한 이 지역에

대한 상세조사의 일환으로 MT (Magnetotelluric) 및 가청주파 수대역 MT (Audio-frequency MT, AMT) 탐사를 수행하고, 2 차원 및 3차원 역산 해석과 기존 연구결과를 종합하여 이산화탄소 지중 저장에 있어서 치명적인 파쇄대 발달상황을 파악하고 pilot plant 건설 부지로서의 타당성을 검토하였다.

경상분지의 지질구조 및 후보지 선정

대상지역인 경북 의성지역은 경상분지 하부를 이루고 있는 신동층군과 하양층군의 경계부에 해당된다(Fig. 2). 초기 백악기에 형성된 신동층군은 소백산육괴를 기반암으로하여 부정합으로 놓여 있으며, 경상분지의 서쪽 경계로부터 차례로 낙동층, 하산동층, 진주층으로 구성된다.

낙동층은 역암 및 사암이, 하산동층은 사암이, 그리고 진주층은 흑색세일이 우세하며, 의성지역에서 이들 층의 두께는 각각 1,900 m, 1,300 m, 600 m로 알려져 있다(대한지질학회, 1999). 하양층군은 다시 사암이 우세한 칠곡층, 역암이 우세한 신라역암층, 사암이 우세한 함안층 및 흑색세일이 우세한 진동층 등으로 세분된다(Chang, 1975).

경상분지의 형성은 전기 백악기에 북동-남서 방향의 주향이 동 단층들이 형성되고 동서 방향의 인장응력에 의하여 동서 방향으로 인장되면서 대규모의 인리형 분지로 발달되고, 이후 신동층군 및 하양층군의 하성 및 호소성 퇴적층이 분지내에 퇴적되어 형성된 것으로 알려져 있다(유인창 등(2006)의 Fig. 11 참조). 경상분지는 이후 후기 백악기에는 남-북방향의 압축응력이 우세하게 작용하면서 분지의 확장은 종료되고, 1) 백악기 말기의 남-북 방향 압축응력에 의한 동-서 방향의 습곡 형

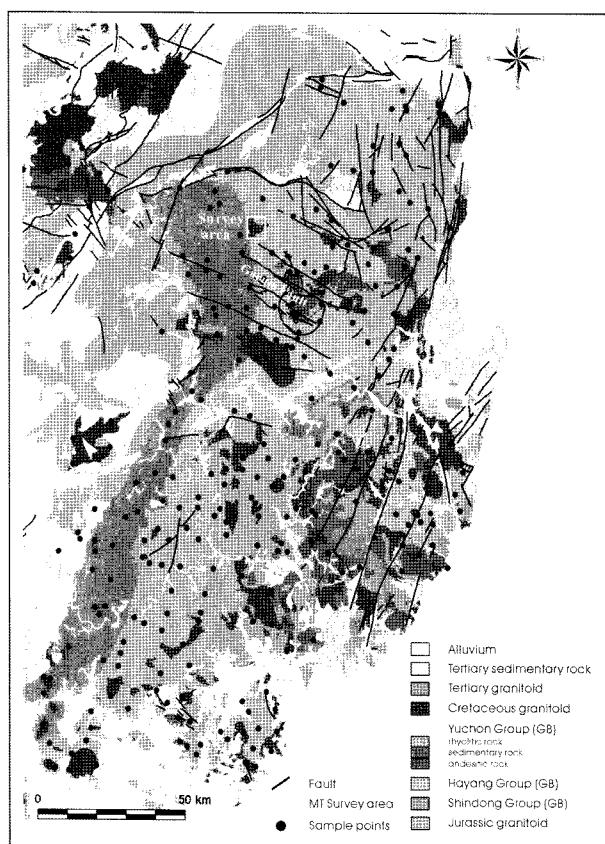


Fig. 2. Geological map of the Gyeongsang Basin, southeastern Korea. Rectangle surrounds the survey area and black dots represent the locations of rock samples for physical properties measurements.

성, 2) 백악기 말기와 신생대 초기에 동-서 방향의 압축응력에 의한 서북서 방향의 가음단층계와 남-북 방향의 습곡 형성, 3) 신생대에 북동-남서 방향의 압축응력의 작용으로 북북동-남남서 방향의 양산단층의 형성 등 3단계의 변형을 받은 것으로 알려져 있다(이병주와 황재하, 1997).

이산화탄소의 지중저장을 위한 조건으로는 일반적으로 1) 효과적으로 지중으로 주입하고 저류능력을 확보하기 위해서는 충분한 공극률과 투수성이 좋은 층이 대상이 되며, 2) 주입된 이산화탄소가 다시 지표로 누출되는 것을 방지하기 위해서는 대상층의 상부는 투수성이 매우 낮은 덮개암 혹은 난투수층(aquitard)으로 덮여 있어야 하며, 3) 주입된 CO₂의 누출 통로가 될 수 있는 파쇄대 등이 존재하지 않아야 한다.

경상분지의 심도연장에 관련된 기존의 연구결과를 종합하면, 김원균 등(2000a)은 중력이상 스펙트럼 분석으로부터 의성 소분지 일대에서 평균적으로 깊이가 2.44, 4.44, 14.03 km인 3개의 층으로 나뉘며, 자력이상으로부터는 1.94 km, 4.65 km의 2개의 층으로 구분된다고 보고한 바 있다. 또한 문경, 의성 지역 MT 탐사 결과(이춘기 등, 2004)에서 의성지역 2-3 km 깊이에서 전기비저항의 경계가 뚜렷이 나타났으며 이 경계를 퇴적암과 기반암의 경계로 추정한 바 있다. 또, 인접한 의성 봉양지구의 온천개발을 위한 시추 결과, 약 600 m 심도로부터 최종 시추심도인 820 m 깊이까지 하양층군의 역질사암이 발견된 것으로 보고되었다(임정웅 등, 1992). 이러한 결과를 종합하면, 의성일대에서는 최소한 2 km 내외까지는 퇴적층이 분포하는 것으로 추정할 수 있어 주입심도 약 1 km의 pilot plant

Table 1. Physical properties of sedimentary rocks within Gyeongsang Basin.

Geological sequence	Properties	# of samples	Density (g/cm ³)		Porosity (%)	
			range	average	range	average
Sindong Group	Nakdong	12	2.58-2.70	2.63	0.33-3.47	1.88
	Jinju	14	2.59-2.74	2.66	0.70-3.44	1.59
	Hasandong	17	2.54-2.76	2.64	0.76-4.58	1.97
	Group total	43	2.54-2.76	2.64	0.33-4.58	1.82
Hayang Group	Jindong	37	2.54-2.81	2.66	0.13-5.11	1.58
	Chilgok	3	2.65-2.77	2.70	1.07-1.86	1.38
	Haman	19	2.52-2.74	2.69	0.42-4.74	1.57
	Gasongdong	7	2.49-2.66	2.59	1.30-6.38	3.03
	Iljik	4	2.63-2.69	2.67	0.54-3.12	1.47
	Hupyechongdong	3	2.45-2.71	2.61	1.00-6.21	2.94
	Dogyedong	6	2.60-2.86	2.68	0.87-2.70	1.30
	Sagok	5	2.59-2.75	2.65	0.73-3.34	2.16
	Jeomgok	4	2.55-2.67	2.62	0.98-2.41	1.65
	Cheongyangsan	5	2.63-2.83	2.73	0.59-1.01	0.75
Yuchon Group	Others	2	2.58-2.66	2.62	0.70-3.25	1.98
	Group total	95	2.45-2.86	2.66	0.13-6.38	1.70
	Group total	49	2.46-2.84	2.67	0.22-5.96	1.52

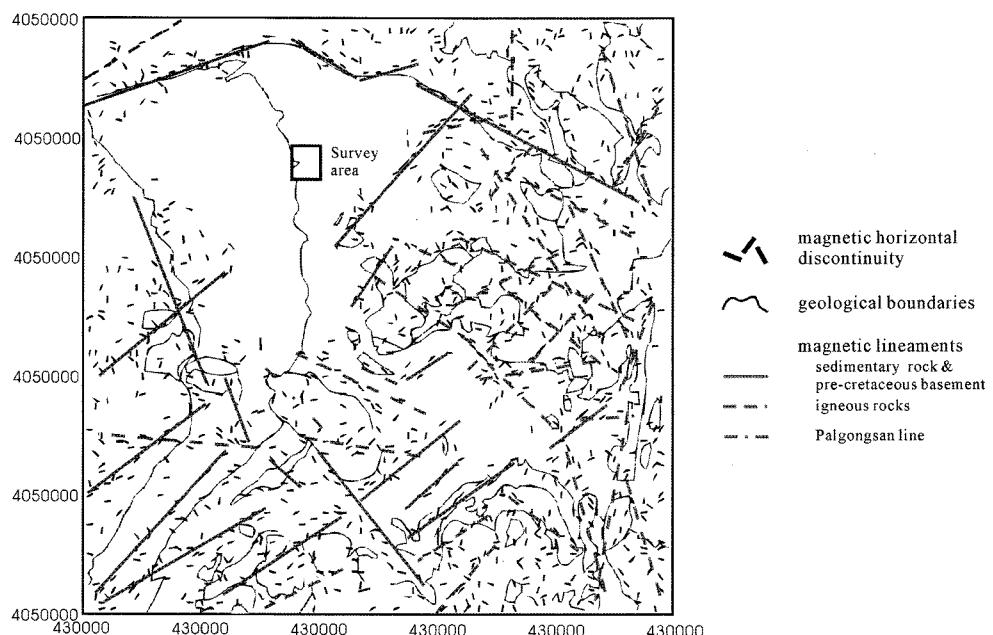


Fig. 3. Magnetic horizontal discontinuity and lineaments from the aeromagnetic data superimposed on the geological boundaries (Modified from the results of Kim *et al.* (2000b)). Note that any magnetic lineament or discontinuity cannot be found around the survey area.

를 위해서는 충분한 퇴적층의 심도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

이산화탄소의 지중저장을 위한 저장용량을 좌우하는 것은 공극률이다. Table 1은 국내 암석의 열특성 연구(김형찬 등, 2008)의 일환으로, 경상분지 전역에 분포하는 대표적인 3가지 퇴적층군에서 총 187개의 암석 시료를 채취하여 공극률과 밀도를 측정한 결과를 보인 것이다. 측정에 이용된 암석 시료는 Fig. 2에 보인 시료채취 위치의 노두에서, 절리나 파쇄가 발달하지 않아 코어의 형태로 시료 성형이 가능한 되도록 신선한 암석을 이용하였다. 그 결과 밀도는 $2.45 \sim 2.86 \text{ g/cm}^3$ 의 범위를 가지며, 평균적으로 2.66 g/cm^3 로 충군에 상관없이 거의 일정한 값을 보인다. 이에 비해 공극률은 $0.13 \sim 6.38\%$ 로 좀 더 넓은 범위를 보이나 평균적으로는 2% 미만으로 매우 낮다.

이로부터 공극률의 측면에서는 위의 지중저장을 위한 조건은 만족하기 어려우나 서론에 설명한 CO₂-EGS와 같이 수압 파쇄를 이용한 인공적인 저장공간의 확보를 통해 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

지중저장을 위한 세 번째 조건인 파쇄대의 발달 상황은 주입된 이산화탄소의 누출통로로서의 역할을 할 가능성이 있기 때문에 매우 주의가 요구된다. Fig. 3은 의성지역의 항공자력 탐사 자료를 이용하여 자력선구조 분석을 수행한 결과로 김원균 등(2000b)의 결과를 재구성한 것이다. 오랜 지질학적인 변형을 받은 경상분지 내에 많은 파쇄대가 분포할 것이나, Fig. 3에 표시한 대상지역과 같이 의성지역의 서부에는 자력선구조나 수평적 불연속성이 없어 상대적으로 파쇄대의 발달 가능성 이 적다고 하겠다.

MT 및 AMT 탐사 자료 획득 및 자료 처리

이상과 같은 분석을 토대로 본 연구에서는 Fig. 2 및 Fig. 3에 표시된 대상 지역을 선정하고 대상 지역내 파쇄대 분포 상황을 파악하고자 상세한 지표 물리탐사를 수행하였다. 산악지형이 많은 국내의 육상환경에서는 탄성파 탐사와 같은 고해상도 심부 물리탐사의 적용이 매우 제한적이며 MT 탐사는 거의 유일한 대안으로 부상하고 있다. 특히, Table 1에 보인 바와 같이 전반적으로 공극률이 낮고 충군 간에 그 차이가 미미한 경우에는 전기비저항 대비로 이를 충돌의 구분은 어려울 것이다. 이는 고결된 암석에서 전기비저항은 대략적으로 공극률의 제곱에 반비례하는(Archie, 1942) 관계에서 유추할 수 있으며, 따라서 MT 탐사에서 나타나는 전기비저항 이상대는 파쇄대 등에 의한 반응으로 해석할 수 있다.

MT 탐사는 주로 천부보다는 심부 지질구조의 해석에 더比重을 두게 되며 대부분의 경우 MT 탐사는 천부로부터 수 ~ 수십 km의 심부까지의 지질구조에 대한 유용한 정보를 제공한다. 그러나 우리나라와 같이 지층의 전기비저항이 높은 경우는 통상적인 MT 탐사 대역의 가장 높은 주파수에서도 침투심도가 수백 m에 달하는 경우가 발생하기도 한다. 따라서, MT 탐사와 더불어 시간영역 전자탐사나 전기비저항 탐사를 함께 실시하고 복합역산(joint inversion)을 통해 천부의 불균질 이상체에 의한 정직효과의 제거 및 천부 분해능을 확보하고자 하는 시도가 이루어져 왔다(Sasaki, 1989; Pellerin and Hohmann, 1990; Meju, 1996).

본 연구에서는 이태종 등(2006)이 제안한 방법과 같이 MT 자료와 AMT 자료를 함께 얻어 고주파수 자료의 추가를 통하

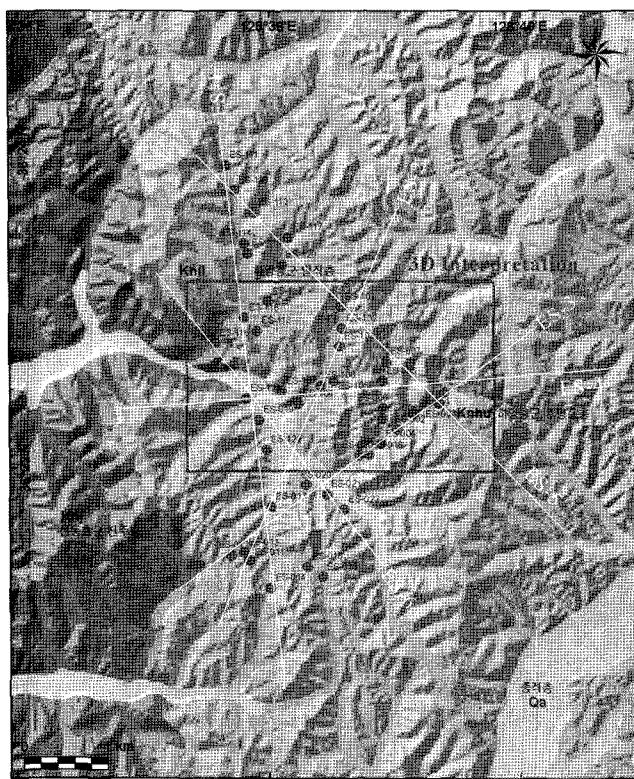


Fig. 4. Location map of the MT survey stations for Uiseong basin. Two-dimensional interpretations are made for the 6 survey lines indicated as ES-1 ~ ES-6. Rectangle surrounds the region and sites for 3D interpretation.

여 천부의 분해능을 높이고자 하였다. 또한, 지협적인 잡음의 영향을 최대한 배제할 수 있도록 원거리기준점 방식(Gamble *et al.*, 1979)을 사용하였다. 원거리기준점 자료는 MT 대역의 경우 현장으로부터 약 500 km 떨어진 일본 Kyushu의 상시 모니터링 자료를 이용하고, AMT 대역에 대해서는 동일한 시간에 측정된 다른 측점의 자기장 자료를 활용하여 자료의 질을 높이고자 하였다.

Fig. 4는 의성 지역의 MT 및 AMT 탐사 측점도를 보인 것으로 총 42개 측점에 대해 탐사자료를 획득하였다. 측정된 자료의 해석을 위하여 Fig. 4에 보인 바와 같이 총 6개 측선에 대한 2차원 역산 해석을, 직사각형으로 둘러싸인 영역에 대해 3차원 역산 해석을 수행하였다.

측정된 시계열 자료로부터 겉보기 비저항 및 위상 등 여려 가지 MT 파라미터를 추출하는 AMT 및 MT 탐사자료의 자료처리는 Phoenix 사에서 제공하는 자료처리 소프트웨어 SSMT2000을 이용하였으며, 원거리기준점 처리된 AMT 및 MT 자료로부터 tipper, coherency, 겉보기 비저항 및 위상의 연속성 등을 고려하여 잡음에 심하게 오염되거나 분산이 큰 자료를 수동으로 제거하였다.

Fig. 5는 이러한 과정을 거쳐 얻어진 MT 및 AMT 탐사자료 중 대표적인 측점에서의 겉보기 비저항과 위상을 도시한 것이다. 이때, 1 Hz 이하의 주파수 자료는 심한 잡음으로 거의 모든 측점에서 버려졌으며, 전력주파수인 60 Hz 부근 자료도 심한 잡음으로 대부분 버려진 것을 알 수 있다. 이는 전자기적

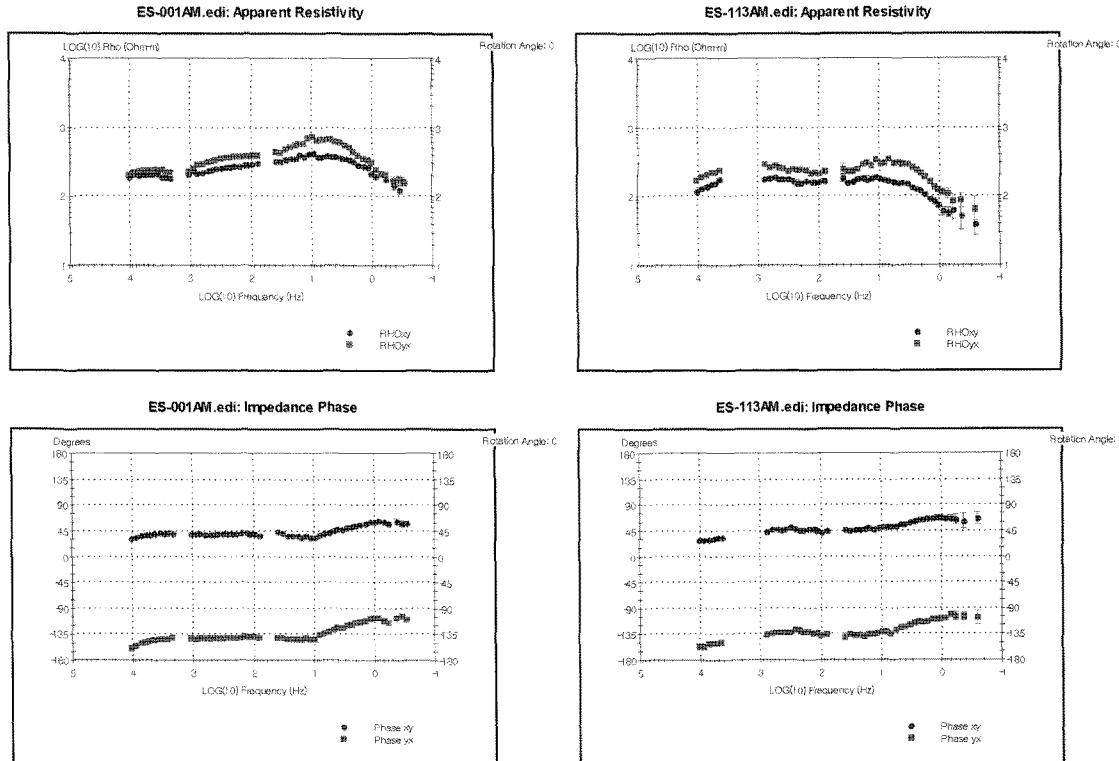


Fig. 5. Apparent resistivity and phase curves for sites ES-001 and ES-113.

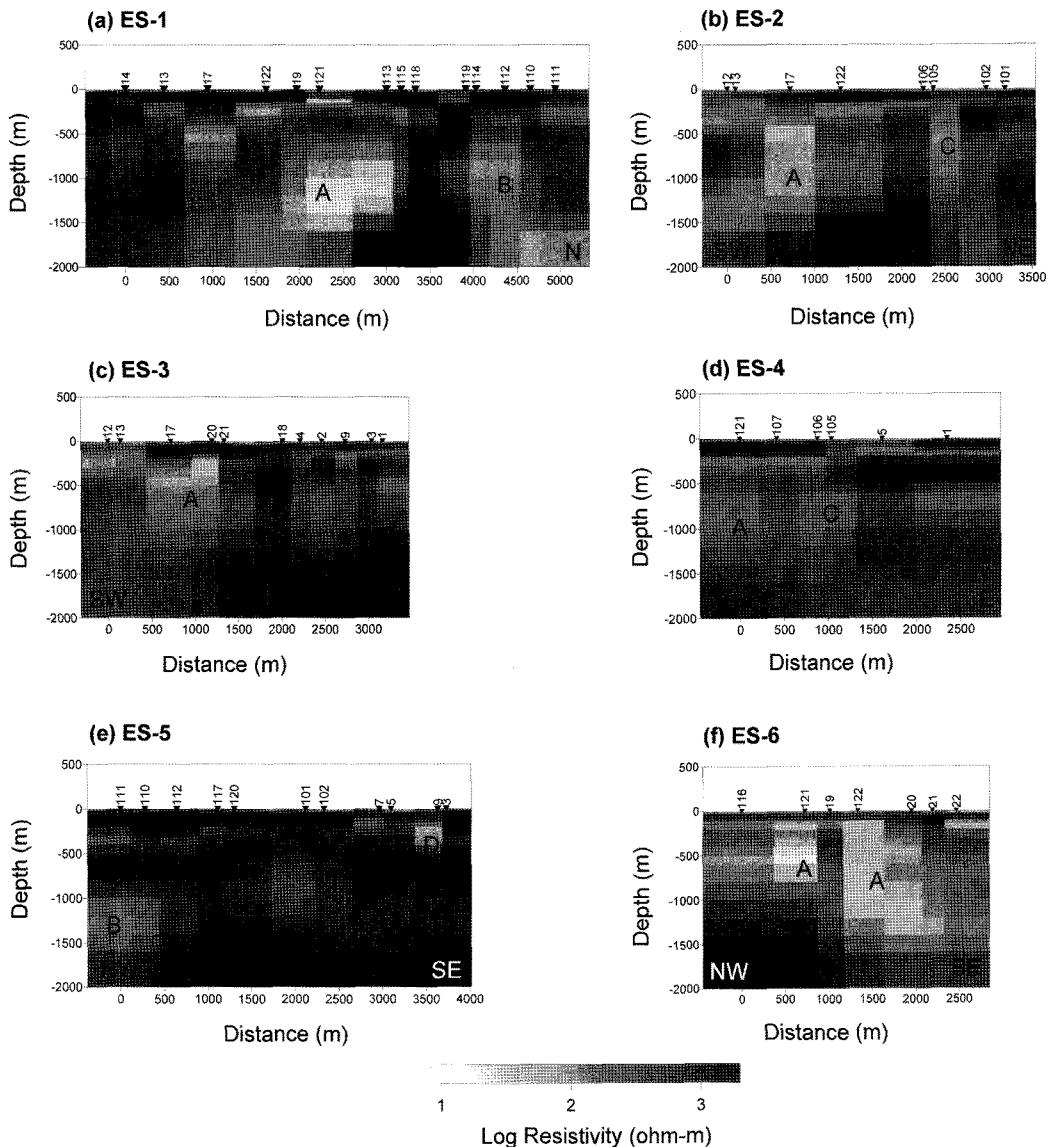


Fig. 6. TM mode inversion results for survey lines (a) ES-1, (b) ES-2, (c) ES-3, (d) ES-4, (e) ES-5, and (f) ES-6.

잡음이 많은 내륙 환경과 잡음이 취약한 MT 및 AMT 탐사의 근본적인 한계 이외에도 눈과 빨에 작물이 무성한 6월 말 ~ 7월 초에 탐사가 수행되었기 때문에 측점 및 측선의 설계에 제약이 있었기 때문이다. 그러나, 이러한 심한 잡음에도 불구하고 1 Hz 이상 자료만을 볼 때 전체적인 걸보기 비저항과 위상 곡선의 연속성은 확인할 수 있다. 균질한 100 ohm-m 매질을 가정할 때 1 Hz에서의 표피심도가 5 km에 이를 것을 감안하면 탐사의 목표심도인 1 km를 위해서는 충분한 자료로 판단되며, 따라서 이렇게 얻은 자료를 2차원 및 3차원 역산에 이용하였다.

2차원 역산을 위하여 우선 Fig. 4에 보인 각 측선에 대하여 주향이 측선과 직교한다는 가정 하에 MT 임파던스를 측선방향으로 회전시켜 자기장이 주향과 평행한 성분(TM 모드)과 수직한 성분(TE 모드)을 계산하고, 이 중 TM 모드에 대한 걸

보기 비저항과 위상을 역산에 이용하였다. 역산에 사용된 자료는 1.17 ~ 8,800 Hz의 주파수 대역에서 22개의 주파수에 대한 걸보기 비저항과 위상이다. 측선은 ES-1 ~ ES-6 (Fig. 4)이 각각 N5°W, N25°E, N25°E, N55°E, EW, N40°W, N40°W의 방향을 가지며, 측점간의 거리는 해당 측선 상에 투영시킨 거리를 사용하였다. 이때, 측점들 중에서 잡음이 극심한 측점들은 역산에서 제외시켰다.

2차원 역산에는 자료의 Bayesian likelihood를 최대로 하여 모델의 regularization parameter를 조절하는 최소자승역산 (Uchida, 1993)을 이용하였으며 이때 모형반응계산 알고리듬은 유한요소법이다. 이때, 걸보기 비저항과 위상 자료의 자료 오차(error bar)의 크기에 따라 가중치를 주도록 하였다.

Fig. 4에 나타낸 6개 측선의 TM모드 자료에 대한 2차원 역산 결과를 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 6(a)의 ES-1에 대한 역산

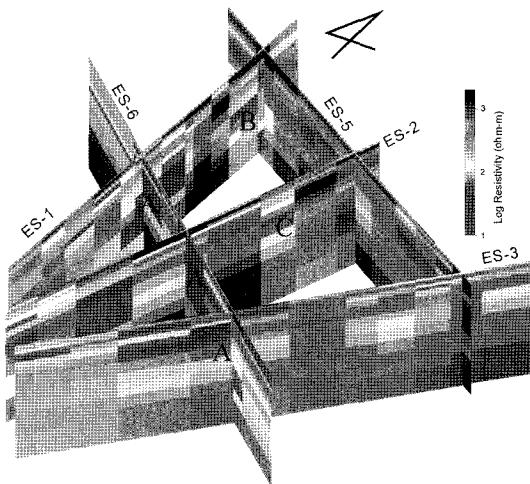


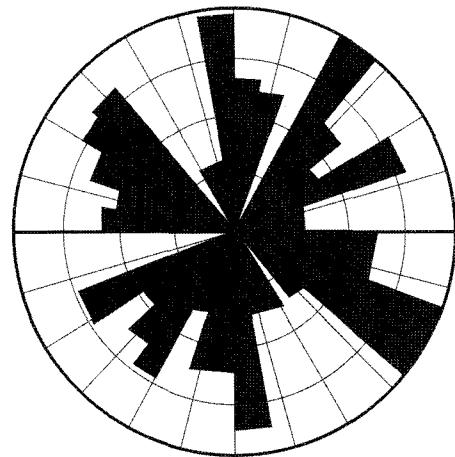
Fig. 7. Semi-3D view of TM mode inversion results for 5 survey lines.

결과를 보면 측선의 남쪽에서는 수백 ohm-m의 상대적으로 균질한 지층을 보이나, 측점 ES-121의 심도 1 km 부근에서 매우 강한 저비저항 이상대(A)가 나타나고 측점 ES-112 부근에서 또 하나의 저비저항 이상대(B)가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 저비저항 이상대 A는 측선 ES-5를 제외한 모든 측선에서 동일한 양상으로 관찰되며, 이들 이상대가 나타나는 측점들을 연결해 보면 이 지역의 지형에서 가장 강하게 나타나는 측선 ES-6과 유사한 북서-남동 방향의 구조선과 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 이 저비저항 이상대(A)가 모든 측선에서 일관되게 나타나는 것으로부터 북서-남동 방향의 구조선은 2 km 내외의 심부까지 연장된 파쇄대로 해석할 수 있다.

저비저항 이상대 B는 측선 ES-1의 측점 ES-112 부근과 측선 ES-5의 ES-111 부근에서 나타나며 1 km 이상의 심부 파쇄대로 해석된다. ES-2 및 ES-4의 측점 ES-105에서 나타나는 저비저항 이상대(C)와 측선 ES-5의 남동쪽 ES-009 측점 부근에서 나타나는 저비저항 이상대(D)는 그 분포가 수백 m 이내의 천부에 국한되고 고립되어 나타나는 것으로부터 천부의 규모가 상대적으로 작은 파쇄대로 해석할 수 있다.

의성지역의 6개 측선에 대한 2차원 해석결과를 종합해보면 이 지역의 남서쪽에는 2 km 내외의 심부까지 발달한 규모가 큰 파쇄대가 북서-남동 방향으로 발달했을 것으로 예측되며, 반면 연구지역의 남동부에는 파쇄대가 존재하나 대부분 소규모이거나 천부에 국한되었을 것으로 해석된다.

이를 좀 더 명확히 살펴보기 위하여 이들 2차원 역산 결과 중 측선 ES-4를 제외한 결과를 각각의 측선상에 도시하여 Fig. 7에 나타내었다. 그림은 역산결과가 명확히 보일 수 있도록 하기 위하여 측선의 방향 및 교차점의 위치는 실제와는 조금 다르게 하였으나, 앞에서 서술한 저비저항 이상대의 분포를 한눈에 볼 수 있다. 즉, 다수의 저비저항 이상대가 서쪽에 분포하고 있고, 동쪽에서는 상대적으로 이상대가 적고 천부에 국한되어 나타나는 것을 확인할 수 있다. 특히, 측선 ES-6과 일치하



Upper semicircle: Length analysis
Lower semicircle: Frequency analysis

Fig. 8. Rose diagram of lineaments in the Uiseong area (Modified from Kim *et al.*, 1999).

는 방향으로 발달한 저비저항 이상대(A)의 연장 방향이 잘 나타난다.

원격탐사자료의 Hough 변환과 수치 표고 모형을 이용한 선구조 분석 결과(김원균 등, 1997), 의성일대는 N5~10°W 방향의 주 방향성과 N55~65°W 방향의 선구조가 나타나는데 이는 백악기의 특징적인 주향이동단층인 가음단층과 금천단층의 연장선상에 놓여있어 이 두 단층이 신동층군까지 연장될 가능성이 있다고 보고하였다. 또한 Fig. 8은 의성지역 인공위성 영상으로부터 추출한 선구조분석 결과(김상완 등, 1999) 중 본 연구의 상세 물리탐사 지역에 대한 결과를 추출한 것으로 김원균 등(1997)의 결과를 뒷받침하고 있다. 이와 같은 결과를 종합할 때, MT 탐사 역산 결과에서 나타난 저비저항 이상대(A)는 그 방향성으로 보아 이러한 선구조와 연관되며, 특히 Fig. 2의 가음단층 및 금천단층이 조사지역까지 연장되었거나 그에 수반된 가지 단층에 해당될 것으로 보인다.

Fig. 9는 Fig. 4의 직사각형으로 둘러싸인 영역에 대하여 그 내부의 22개 측점에서의 탐사자료를 이용하여 3차원 역산한 결과를 심도구간별로 도시한 것이다. 3차원 역산에는 정적효과를 고려하고 평활화 제한을 가한 선형화된 반복적 최소자승 역산(Han *et al.*, 2008)을 사용하였으며, 이때 모형반응계산은 유한차분법(staggered grid finite difference method)으로 지형에 의한 영향은 고려하지 않았다. 역산에 사용된 자료는 1.02~780 Hz의 주파수 대역에서 15개의 주파수에 대한 남-북 및 동-서 방향의 걸보기 비저항 및 위상 자료이다. 총 6번의 반복 후의 최종 rms는 3.53으로 앞서 설명한 바와 같이 현장 여건상 측점 선정에서의 제약에 의해 탐사자료의 질이 전반적으로 좋지 못해서 역산에서 충분히 수렴하지 못하였다. 특히, 저주파수 영역의 위상에서 가장 큰 오차를 보여 심부 구조에 대해 세부적으로 영상화하지는 못했으나 전반적인 큰 구조는 잘 표현하고 있다. 이때, 전기비저항의 대비가 2차원 역산에 비해

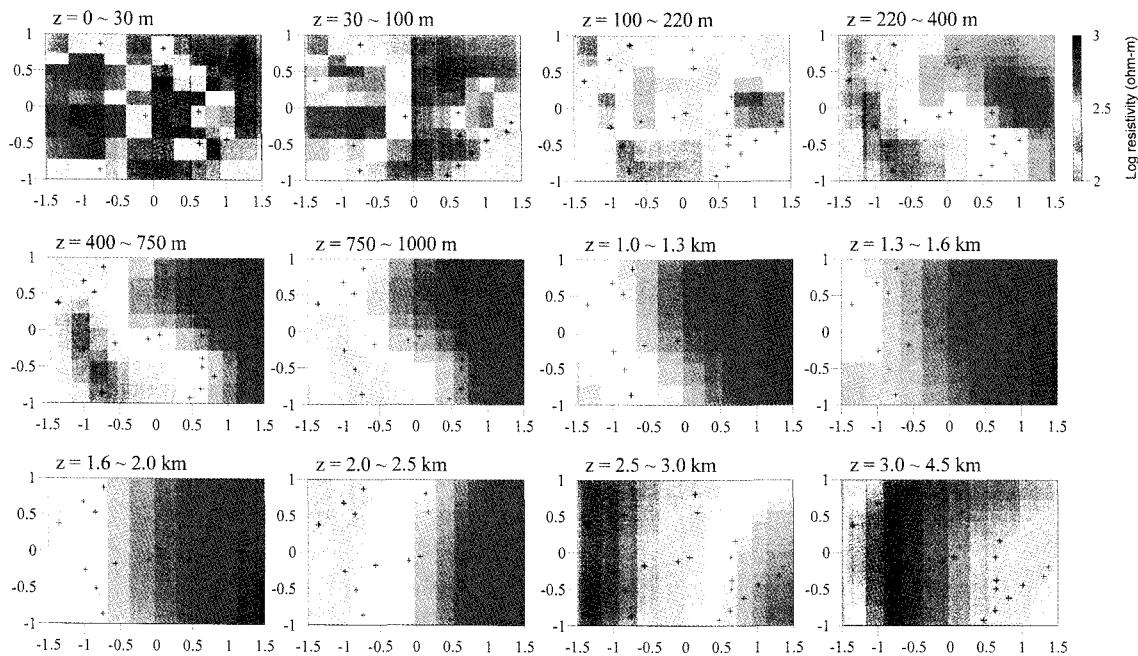


Fig. 9. Depth slice for the 3D inversion of Uiseong MT data. The data points are superimposed on each slice.

작아서 비교를 위해 부득이 color scale을 Fig. 6과 다르게 표현하였다.

영상화된 3차원 역산단면에서 특징적인 것은 우선 100 m 이내의 천부 구조의 경우, 서쪽은 상대적으로 고비저항을, 동쪽은 저비저항을 갖는다. Table 1의 암종별로 공극률의 차이가 미미한 것으로부터 이는 표토층 및 풍화대의 깊이와 관련된다 고 해석된다. 즉, 대상 지역의 동쪽에서는 표토층 및 풍화대가 약 200 m 심도까지 분포하고 그 하부에는 비교적 균질한 전기비저항 구조를 보인다. 또한 3 km 이하 심도에는 저비저항 층이 존재하는 것으로 나타나는데, 이는 경북 포항에서 문경에 이르는 약 120 km에 걸쳐 경상분지에 대한 MT 탐사 결과에 서 의성지역 하부 약 3~9 km 심도에 전기전도도가 높은 층의 존재를 보고한 Lee *et al.* (2006)의 결과와 일치한다.

역산결과의 200 m 이상의 심도에서는 북서-남동 방향의 고비저항과 저비저항의 경계면이 심도 약 220 m에서 1,300 m 정도까지 뚜렷이 나타나고 있다. 이는 앞서 2차원 역산 결과에서도 나타난 탐사 영역의 서쪽의 북서-남동 방향의 파쇄대 (A)에 의한 저비저항 구조, 동쪽은 비교적 소규모 파쇄대의 발달로 인한 고비저항 구조를 일관되게 보여주는 결과로 해석 된다. 이러한 경향은 약 1.6 km 심도까지 지속되는 것으로 보인다.

이산화탄소 지중 저장에 있어서 서쪽의 심부 파쇄대는 주입된 이산화탄소의 지표 누출의 통로가 될 염려가 있으므로 pilot 부지는 이러한 심부 구조의 발달 가능성이 비교적 적은 탐사지역의 동쪽지역이 유리할 것으로 보인다. 그러나 Table 1에 보인 바와 같이 대상지의 암석인 일직층의 밀도는 평균 2.67 g/cm³, 공극률은 평균 1.47%로 매우 낮으므로 이산화탄

소의 주입을 위해서는 수압파쇄 등을 통한 인위적인 저류 공간의 생성이 필요할 것이며, 이를 위해서는 시험시추 및 연구 지역 주변의 광역적인 응력분포 등에 대한 추가적인 조사가 필요하다.

결 론

이산화탄소 지중저장 pilot 부지 선정을 위해서 기존 문헌 조사와 통한 경상분지 내 유망지 선정과 암석의 밀도와 공극률 측정을 통한 퇴적층의 물성 분석 그리고 의성지역을 대상으로 2차원 및 3차원 MT 탐사를 수행하였다. MT 탐사는 심부 지질구조 상에서 전기비저항에 의한 전기적 층서구조 파악과 이산화탄소 주입시 누출의 통로가 될 수 있는 심부 파쇄대의 탐지를 주된 목적으로 수행하였다.

탐사지역에 분포한 도로, 전력선 등의 영향과 측선 및 측점 선정의 제약에 의해 1 Hz 이하의 저주파수 자료의 획득은 어려웠으나 1 Hz 이상의 자료는 전반적으로 양호하여 탐사의 목표심도인 1 km 심도의 지하구조 파악에는 충분한 자료로 판단하였다.

의성지역에서 총 42개 측점에 대한 MT 및 AMT 탐사자료를 획득하고 이를 이용하여 6개 측선에 대하여 2차원 역산을, 중앙부 22개 측점을 이용하여 3차원 역산한 결과, 탐사 지역의 서북에서 동남으로 심부까지 연장된 파쇄대가 약 1.6 km의 심부까지 발달해 있음을 확인하였으며, 기존 문헌의 지질구조 및 선구조 분석 결과와 대비하였을 때 의성지역의 특징적인 N55~65°W 방향의 선구조와 일치하는 방향으로 백악기 주향 이동 단층인 가음단층과 금천단층과 연관될 가능성이 있다.

반면, 연구지역의 동쪽에는 천부의 소규모 파쇄대가 존재하고, 약 200 m 심도까지 표토층 및 풍화대가 분포하며, 이후 약 2 km 심도까지는 전반적으로 균질한 층을 보이는 것으로 나타나 대상 지역의 서쪽보다는 동쪽이 pilot plant 부지로서 더 적절할 것으로 해석되었다.

그러나, 대상지의 암석인 일직층의 밀도는 평균 2.67 g/cm³, 공극률은 평균 1.47%로 매우 낮으므로 이산화탄소의 주입을 위해서는 수압파쇄 등을 통한 인위적인 저류 공간의 생성이 반드시 필요할 것이며, 이를 위해서는 향후 시험시추 및 연구 지역 주변의 광역적인 응력분포 등에 대한 추가적인 조사가 필요하다.

사 사

본 연구는 국토해양부가 지원하는 “CO₂ 해양지중저장 최적화 및 모니터링 기술 개발”과제의 일환으로 수행되었으며, 일본 Ogiri 관측점 자료를 제공해 준 일본 Nittetsu Mining Consultant사의 Tejima씨와 캐나다의 Phoenix Geophysics사의 Leo Fox씨, 그리고 도표 작성 및 자료정리에 도움을 주신 한국지질자원연구원 백승균박사께 감사드린다.

참고문헌

- 김상완, 원중선, 김원균, 민경덕, 1999, 자동 선구조 추출 알고리즘을 이용한 경북 의성지역의 선구조 분석, 자원환경지질, **32**, 19-31.
- 김원균, 원중선, 김상완, 민경덕, 1997, Hough 변환을 이용한 원 격탐사자료와 수치표고모형의 지질학적 선구조 분석 기술: 경상분지 의성지역을 중심으로, 대한자원환경지질학회 제30차 학술발표회 논문집, p. 38.
- 김원균, 민경덕, 원중선, 김정우, 2000a, 포텐셜필드의 스펙트럼 대비법을 이용한 의성소분지의 지구조 연구, 자원환경지질, **33**, 217-228.
- 김원균, 민경덕, 김정우, 원중선, 박찬홍, 구성본, 2000b, 항공자력의 Analytical 이상을 이용한 의성소분지의 지구조 연구, 자원환경지질, **33**, 229-237.
- 김중희, 김준모, 2007, 지중 저장을 위해 심부 대염수층 내에 주입된 이산화탄소의 거동 특성 및 포획 기작 수치 모델링, 2007 추계 지질과학연합학술대회 초록집, p. 69.
- 김중희, 김준모, 2008, 지질 구조 특성과 주입 위치에 따른 이산화탄소 지중 저장의 열-수리-역학적 안정성 평가 수치 모델링, “UN이 정한 지구의 해” 공동 학술대회 초록집, p. 83.
- 김형찬, 이창범, 박덕원, 이철우, 이영민, 박인화, 심병완, 백승균, 박정민, 이병태, 2008, 지하 열 자원 부존 정보 D/B 구축 및 평가, 한국지질자원연구원 연구보고서 2005-R-GH01-P-01-2-100, 152p.
- 대한지질학회, 1999, 한국의 지질, 시그마프레스, 802p.
- 박미경, 장한누리, 김희준, 왕수군, 이민희, 2007, 전기비저항에 의한 지중저장 이산화탄소 거동 관측 모의실험, 2007 한국물리탐사학회·대한지구물리학회 공동학술대회, 170-175.
- 유인창, 최선규, 위수민, 2006, 한반도 동남부 백악기 경상분지의 형성과 변형에 관한 질의, 자원환경지질, **39**, 129-149.
- 이병주, 황재하, 1997, 경상분지 북동부에서의 가음단층과 양산 단층의 관계, 지질학회지, **33**, 1-8.
- 이춘기, 이희순, 권병두, 조인기, 정현기, 오석훈, 송윤호, 이태종, 2004, 문경-의성 지역의 MT 탐사, 대한자원환경지질학회 학술발표회, 174-177.
- 이태종, 이성곤, 송윤호, Toshihiro Uchida, 2006, MT 탐사자료의 해석에서 AMT 대역 자료의 효용성, 물리탐사, **9**, 261-270.
- 임정웅, 김원영, 김형찬, 이종민, 이철우, 최위찬, 1992, 의성봉양 지구 온천종합조사보고서(구산동 및 도원동 일대), 한국자원 연구소, 139p.
- 한국지질자원연구원(KIGAM), 2008, 기후변화 대응 온실가스 지중저장기술 개발(기획보고서), 76p.
- Archie, G. E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Petr. Trans. AIME*, **146**, 54-62.
- Brown, D. W., 2000, A hot dry rock geothermal energy concept utilizing supercritical CO₂ instead of water, Proceedings of 24th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, 233-238.
- Chang, K. H., 1975, Cretaceous stratigraphy of southeast Korea, *J. Geological Soc. of Korea*, **11**, 1-23.
- Emberley, S., Hutcheon, I., Shevalier, M., Durocher, K., Gunter, W. D., and Perkins, E. H., 2004, Geochemical monitoring of fluid-rock interaction at CO₂ storage at the Weyburn CO₂-injection enhanced oil recovery site, Saskatchewan, Canada, *Energy*, **29**, 1393-1401.
- Gamble, T. D., Goubau, W. M., and Clarke, J., 1979, Magnetotellurics with remote reference, *Geophysics*, **44**, 53-68.
- Han, N., Nam, M. J., Kim, H. J., Lee, T. J., Song, Y., and Suh, J. H., 2008, Efficient three-dimensional inversion of magnetotelluric data using approximate sensitivities, *Geophys. J. Int.*, **175**, 477-485.
- IPCC (Edited by Metz, B. et al.), 2005, Carbon Dioxide Capture and Storage, Cambridge University Press, New York, USA.
- Korbol, R. and Kaddour, A., 1995, Sleipner vest CO₂ disposal injection of removed CO₂ into the Utsira Formation, *Energy Conservation and Management*, **36**, 509-512.
- Li, G., 2003, 4D seismic monitoring of CO₂ flood in a thin fractured carbonate reservoir, *Leading Edge*, **22**, 690-695.
- Lee, C.-K., Lee, H., Kwon, B.-D., Cho, I.-K., Oh, S., Song, Y., and Lee, T. J., 2006, Geoelectrical structure of the Kyongsang Basin from magnetotelluric sounding, *J. Korean Geophysical Soc.*, **9**, 273-286.
- 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.
- Meju, M. A., 1996, Joint inversion of TEM and distorted MT sounding: Some effective practical considerations, *Geophysics*, **61**, 56-65.
- Pellerin, L. and Hohmann, G. W., 1990, Transient electromagnetic inversion: A remedy for magnetotelluric static shifts, *Geophysics*, **55**, 1242-1250.

- Pruess, K., 2006, Enhanced geothermal systems (EGS) using CO₂ as working fluid - A novel approach for generating renewable energy with simultaneous sequestration of carbon, *Geothermics*, **35**, 351-367.
- Sasaki, Y., 1989, Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole data, *Geophysics*, **54**, 254-262.
- Uchida, T., 1993, Smooth 2-D inversion for magnetotelluric data based on statistical criterion ABIC, *J. Geomag. Geoelectr.*, **45**, 841-898.
- Van Bergen, F., Winthaegen, P., Pagnier, H., Jura, B., Kobiela, Z., and Skiba, J., 2005, Monitoring techniques applied for CO₂ injection in coal, 67th EAGE Conference and Exhibition, Extended Abstracts, A018.
- White, D. J., Burrowes, G., Davis, T., Hanjnal, Z., Hirsche, K., Hutcheon, I., Majer, E., Rostron, B., and Whittaker, S., 2004, Greenhouse gas sequestration in abandoned oil reservoirs: the International Energy Agency Weyburn pilot project, *GSA Today*, **14**, 4-10.