

《總設》

## 이산화탄소 지중저장의 환경 관리를 위한 미국과 유럽연합의 법·제도 현황과 시사점

장은선<sup>1</sup> · 윤성택<sup>1,2\*</sup> · 최병영<sup>2,3</sup> · 정다위<sup>4</sup> · 강 현<sup>5</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 · 한국과학기술연구원 에너지 · 환경 정책 · 기술학과

<sup>2</sup>고려대학교 지구환경과학과

<sup>3</sup>한국지질자원연구원

<sup>4</sup>국립환경과학원

<sup>5</sup>수원대학교 환경에너지공학과

## Status and Implications of Regulatory Frameworks for Environmental Management of Geologic CO<sub>2</sub> Storage in USA and EU

Eunseon Jang<sup>1</sup> · Seong-Taek Yun<sup>1,2\*</sup> · Byoung-Young Choi<sup>2,3</sup> · David Chung<sup>4</sup> · Hun Kang<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*KU-KIST Green School, Korea University*

<sup>2</sup>*Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University*

<sup>3</sup>*Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)*

<sup>4</sup>*National Institute of Environmental Research (NIER)*

<sup>5</sup>*Department of Environmental and Energy Engineering, The University of Suwon*

### ABSTRACT

Though geologic storage of CO<sub>2</sub> (GS) is considered as an attractive technological option to enormously reduce greenhouse gases emission into the atmosphere, many concerns on potential environmental and health risks associated with CO<sub>2</sub> leakage have been raised. In particular, groundwater contamination due to the brine displacement by a pressure build-up and the acidification by leaked CO<sub>2</sub> is paid a special attention. Therefore, integrated regulatory frameworks have been established by law in many countries to secure the permanent containment of injected CO<sub>2</sub>. Regulatory frameworks deal with entire processes of GS, including site selection, monitoring and post-closure environmental management. This review paper provides a summary of regulatory frameworks in USA (U.S. EPA Geologic Sequestration Rule) and EU (Geologic CO<sub>2</sub> Sequestration Directive). The regulatory framework to properly address environmental issues should be established for the deployment of CCS projects in Korea.

**Key words :** Geologic CO<sub>2</sub> storage, CO<sub>2</sub> leakage, environmental regulatory framework, USA and EU

### 1. 서 론

전세계적으로 이산화탄소 포집 및 저장(Carbon Dioxide Capture and Storage; CCS)은 이산화탄소를 비용 효과적으로 대량 감축할 수 있는 종합기술로서 주목받고 있으며, 전세계 온실가스 감축량의 약 19%(2050년까지 2005년 배출량 수준의 50%까지를 감축하는 경우, 감축량 62 Gt CO<sub>2</sub> 대비)를 담당할 것으로 전망된다(IPCC, 2005; IEA,

2010). 2005년 IPCC의 CCS에 관한 특별보고서에 따르면, 이산화탄소 저장기술로는 해양저장(Ocean storage), 광물탄산염화(Mineral carbonation), 지중저장(Geologic storage) 등이 가능하지만, 해양저장은 해양 생태계 문제를 야기할 수 있으며, 광물탄산염화는 화학 반응에 많은 양의 에너지가 필요하고 탄산염 광물의 저장과 처리 자체가 새로운 환경 문제를 야기할 수 있다. 반면에 지중저장은 대표적 저장기술로서 선진국을 중심으로 많은 연구가 진행되고

\*Corresponding author : styun@korea.ac.kr

원고접수일 : 2012. 11. 23 심사일 : 2012. 12. 26 게재승인일 : 2012. 12. 26

질의 및 토의 : 2013. 2. 28 까지

있는데(Ortoleva et al., 1998; Bachu, 2002; Damen et al., 2003; White et al., 2005; Kharaka et al., 2006; Holloway et al., 2007; Wigand et al., 2008; Iding and Ringrose, 2009; Xu et al., 2011; Szulczewski, 2012), 이는 이산화탄소를 저장할 수 있는 공간이 풍부하고 매우 긴 시간 동안 안정적으로 이산화탄소를 저장할 수 있으며, 비용 효율이 높다고 평가받기 때문이다(IPCC, 2005; IEA, 2008).

그렇지만, 이산화탄소 지중저장에서 가장 큰 불확실성과 위험성은 저장된 이산화탄소의 누출이다. 지중에 주입된 이산화탄소가 누출되면 저장 효율성이 떨어져 사업의 존립을 위협할 수 있을 뿐더러 주변 환경과 생태계에 피해를 줄 수 있으며, 무엇보다도 CCS 사업의 상용화를 위해 필수적인 사회적 수용성의 제고에도 큰 영향을 끼친다(Damen et al., 2003; Nelson et al., 2005; Koormeef et al., 2008; Oldenburg et al., 2009; DOE/NETL, 2011). 이에 따라 미국, 유럽연합(EU) 등 선진국에서는 이산화탄소 지중저장이 국제적·국가적 법체계 하에서 안전하고도 효율적으로 수행될 수 있도록 법령 체계의 정비를 진행하고 있다(Forbes et al., 2009; Condor et al., 2011). 대표적으로, 미국의 환경보호청(EPA)에서는 지중처리 안전 관리를 위한 지중처리 관련 규칙인 “UIC Class VI Rule”을 제안하였고, EU는 환경 관리 지침인 “CCS Directive”를 발표함으로써 지중저장의 효율성과 안전성을 확보하기 위한 위험 평가 및 관리 방법론을 제시하였다. 미국과 EU 모두 저장 부지 선정에서의 배경치(baseline) 설정으로부터 이산화탄소 주입 중과 주입 종료 이후에 이르는 전과정에 걸쳐 위 규정의 적용을 받도록 하고 있다. 특히, 미국 환경청의 경우에는 1974년 처음 제정된 “안전한 음용수법(The Safe Drinking Water Act; SDWA)”의 하위 규정에 지중저장의 환경영향 및 모니터링에 관한 문제를 포함함으로써, ‘음용 가능한 지하수(Underground Source of Drinking Water; USDW)’를 보호하도록 규정하고 있다.

국내에서도 이산화탄소 지중저장에 대한 정부와 기업체의 관심이 높아지면서 조기 도입의 필요성에 대한 논의가 활발히 진행되어 왔다. 2009년 11월 ‘녹색성장위원회’에서는 2020년까지 BAU 대비 30%, 2005년 배출 기준 4%로 이산화탄소 배출을 감축하겠다는 국가 목표를 발표하였으며, 이를 위한 감축 수단으로 CCS 도입 강화를 포함하였다. 그러나 대규모 적정 저장지의 국내 존재 여부 등 여러 논란으로 인하여 CCS 실현의 핵심이 되는 저장 기술에 관한 연구개발 투자는 매우 미진하였다. 2012년 4

월 국토해양부가 ‘동해 울릉분지에 최소 19억 톤의 저장 용량을 갖는 대규모 저장지가 존재함’을 발표하면서 국내 지중저장의 실현 가능성에 대한 관심이 다시 높아진 상황이다. 특히, 2012년 5월 “온실가스 배출권 할당 및 거래에 관한 법률안”이 국회를 통과함으로써 우리나라에서도 2015년부터 “배출권 거래제”가 시행될 예정이며, 이는 CCS의 상용화에 큰 도움이 될 것으로 예상된다(Park, 2012). 그러나 국내에서 소규모라도 실제 저장을 하거나 처분 환경 조건에서 저장 연구를 수행한 예는 전무하다. 특히, 지중저장과 관련한 전주기 환경 관리 방안이 2010년 발표된 “국가 CCS 종합 계획”에 포함되었지만, 구체적인 환경 관리 추진 체계와 관련 법·규정의 마련은 아직 이루어지지 못하고 있다(Yun et al., 2011). 실제 국내 지중저장 시 일어날 수 있는 지역 주민과 환경단체와의 마찰을 줄이기 위해서라도, 지중저장을 시행하기 위한 법적 근거와 책임 등에 대한 제도적 틀이 시급히 마련되어야 한다.

이에, 본 해설 논문에서는 이산화탄소 지중저장의 해외 현황(특히, 환경 관리와 관련된 법·제도의 제정 현황)을 파악하기 위하여 미국과 EU를 중심으로 자료 조사와 분석을 실시하였다. 또한, 주입된 이산화탄소의 저장 및 거동을 지배하는 메커니즘을 통하여 지중저장 관련 환경 관리 지침 및 규정 수립에 반드시 고려해야 할 필수 요소들을 제시하였다. 이를 통하여, 국내 지중저장 추진 시 고려해야 할 환경관리 및 법률 제정 방향에 대한 시사점을 도의하였다.

## 2. 이산화탄소 포획 기작과 누출 영향

이산화탄소 지중저장은 육상 혹은 해저 약 750~1,000 m 이상의 심도에 존재하는 ‘적합한’ 지층 중에 이산화탄소를 주입하여 저장하는 기술이며, 이때 주입된 이산화탄소는 초임계 상태로 존재하며 거동이 매우 느리며 주변 지층 또는 지하 유체(지하수)와 반응하면서 용해 내지 침전(광물화)된다. 심부 지층에 주입된 이산화탄소는 ‘구조 및 층서 포획’, ‘잔류 포획’, ‘용해 및 광물 포획’을 통해 안정적으로 저장된다(Bachu, 1995; Ortoleva et al., 1998). 주입 초기에는 물리적으로 구조 및 층서 포획이 우세한 반면, 시간이 지남에 따라 주변의 암석-지하수와 반응하면서 용해 및 광물 포획이 우세해진다. 특히 광물 포획이 증가할수록 이산화탄소 저장의 안전성은 급격히 증가한다. 그러므로 안정한 포획이 일어날 수 있는 적정 지층의 탐색이 매우 중요하다(Chae et al., 2005; Choi et al., 2012).

**Table 1.** Potential risks of geologic CO<sub>2</sub> storage (after EPA's 7/15/08 Proposed Rulemaking)

Risks	Consequences and effects
Underground source of drinking water (USDW)	<i>Carbonic acid</i> Formed when CO <sub>2</sub> comes into the contact with water, acidifying it. Acid causes naturally occurring metals (e.g., As) to remobilize into and contaminate the water
	<i>Co-contaminants</i> Hydrogen sulfide and nitrous oxides in the CO <sub>2</sub> stream will endanger drinking water if high volumes of CO <sub>2</sub> are injected
	<i>Salinization</i> Fluids injected in large quantities can potentially force salty water to flow into USDWs
	<i>Movement out of the storage reservoir</i> Injected CO <sub>2</sub> at high pressure can induce or open existing fractures which can increase movement through cap rock, out of the storage reservoir, and into USDWs
Human health	<i>Released CO<sub>2</sub> at high concentration can cause asphyxiation, increased breathing rate, vision and hearing impairment</i>
Ecosystem	<i>Terrestrial effect</i> 1) Exposure to CO <sub>2</sub> can cause chronic and acute health effects in terrestrial mammals and birds 2) Changes resulting from CO <sub>2</sub> concentrations may adversely impact both plant and soil dwelling organisms
	<i>Aquatic</i> 1) Impedes fish respiration 2) Causes decrease in pH to lethal levels 3) Reduce calcification in shelled organisms 4) Adversely affects photosynthesis of some aquatic organism
Geomechanical / geophysical seismic events	<i>Reactivate dormant faults</i> Improperly operated injection of CO <sub>2</sub> may cause earthquakes

이산화탄소 지중저장의 가장 중요한 관심사는 주입된 이산화탄소의 누출이다(Nelson et al., 2005; Yammaoto et al., 2005; van der Zwaan and Gerlagh, 2009). 주입된 이산화탄소가 적절한 포획 기작을 통해 안정적으로 지중에 저장되지 않는다면 CCS 사업의 존폐가 좌우될 수 있다. 지중 저장에 실패하여 저장 사이트로부터 누출된 이산화탄소는 물(지하수)에 용해되어 pH를 낮추고 지질 매체에 포함된 중금속이나 기타 오염물질을 용탈시킴으로써 음용 가능한 지하수의 수질을 악화시킬 수 있다(Damen et al., 2003; Ronald, 2003; Benson et al., 2004; Burton and Bryant, 2009, Water Research Foundation, 2009; Kharaka et al., 2010; Lu et al., 2010). 이는 CCS 기술의 사회적 수용성 확보에도 악영향을 끼치게 된다. 이산화탄소의 누출은 다양한 과정에서 예상되지만, 일반적으로 주입 및 관측정을 통한 재유출(관정과 뒷채움재 간의 불완전한 메움, 관정과 관벽 사이의 이격 또는 부식 발생 등에 기인), 기존의 주변 관정을 통한 누출, 지질구조인 단층과 균열 등을 통한 누출, 수송 파이프 혹은 주입정의 파손에 의한 누출, 불투수성인 덮개암(cap rock)의 용해를 통한 느린 속도의 누출 등으로 발생한다. Table 1에는 이산화탄소 누출 시 발생할 수 있는 환경 영향을 정리하였다.

그러므로 장기적인 저장 안전성과 환경 안전성 평가를 위해서는 주입된 이산화탄소가 장기간 지표로 누출되지 않고 어떠한 형태로 저장(포획)되는가를 파악하는 한편, 이들에 영향을 미치는 영향 인자들을 규명하는 것이 요구된다. 특히, 지구화학 및 지구물리 모니터링과 평가, 즉 MMV(Measurement, Monitoring and Verification) 또는 MMVA(Monitoring, Mitigation, Verification and Accounting) 과정을 통해 저장된 이산화탄소의 거동을 정확히 파악하고 잠재적인 누출 경로를 평가함이 필요하다(White and Johnson, 2009; Fessenden et al., 2010). 이는 처분 부지의 위해성과 안전성을 평가함에 필수적으로 요구되며, 이를 통해 안전성이 입증되어야 한다. 나아가, 지중저장의 전 과정(저장 부지 선정에서부터 저장 후 사후 관리 단계)에서 발생할 수 있는 누출 위험성에 대한 예측과 잠재적 누출 가능성 및 경로 등에 관한 사전·사후 평가는 지중저장 관련 환경 관리 지침 및 규정의 수립에 있어서 핵심 고려사항이 된다(Burton et al., 2009).

### 3. 이산화탄소 지중저장 관련 주요 국가별 법령 현황

미국, EU, 캐나다, 호주 등 선진국에서는 이미 1990년

대부터 CCS의 이산화탄소 감축 능력을 주목하고 기술개발 전략을 수립하여 추진하고 있다. 이들 국가에서는 기존 법률을 검토하여 장애 요인과 법적 미비점을 파악하고, 기존 법률을 추가 및 보완하거나 독자적인 법률을 제정하고자 노력하고 있다. 이산화탄소 지중저장은 신개념의 새로운 기술로 인식되고 있기 때문에, 상용화를 위해서는 환경관리를 위한 지침과 규정 등 법적·제도적 마련이 요구된다(Bachu, 2008; Burton et al., 2009; Condor et al., 2011). IEA에서도 2008년부터 2010년까지 국제기구와 협력하여 지질학적으로 안전한 대규모 이산화탄소 저장을 위한 법적·제도적 기반을 마련할 것을 권고한바 있다.

미국과 EU에서는 이산화탄소 지중저장 시의 안전성과 효율성을 평가하기 위하여, 완료되었거나 진행 중인 실증 시험과 대규모 상업 저장의 결과를 바탕으로 부지 선정에서 주입 이후에 이르는 전과정에 관련된 허가 및 운영에 관한 법률을 제안하고 있다(Forbes et al., 2009). 세계 최대의 석탄 수출국으로서 CCS에 대한 관심이 매우 높은 호주에서는 ‘연안 석유 및 온실가스 저장에 관한 법률 2006(The Offshore Petroleum and Greenhouse Gas Storage Act 2006)’과 ‘연안 석유법 개정안(온실가스 저장) 2008(Offshore Petroleum Amendment (Greenhouse Gas Storage) Bill 2008)’을 기반으로 하여 호주 근해지역 온실가스 지중저장에 관한 접근 및 소유권 시스템을 구축하고 있다. 이 법안에는 이산화탄소 지중 저장의 허가를 위한 요구 조건, 지중저장 대상 지층의 특성화를 위한 정보, 주입 및 모니터링에 관한 계획, 누출을 비롯한 사고 발생 시의 계획, 허가권의 시한, 보고 사항, 잠재적 위험 요소에 대한 평가 등이 포함된다.

프랑스에서는 ‘이산화탄소를 지중에 저장하기 이전에는 반드시 주입 테스트를 거쳐 주입 가능한 이산화탄소의 한계 양을 산정하고 인근 지하수의 오염을 철저히 방지해야 함’을 규정(Transposition of 2009/31CE)으로 명확히 제시하고 있다. 독일도 2008년 말부터 CCS에 관한 법안을 준비하고 있으며, 독일 환경부와 경제부를 중심으로 서로 긴밀한 협력 관계를 구축하고 있다. 2009년 4월 승인된 독일의 첫 법률 초안에서는 이산화탄소 포집 및 주입 관련 기술과 더불어, 이산화탄소 저장 사이트, 주입 및 폐쇄 등에 이르는 전 분야를 다루고 있다. 특히, 독일에서는 법률 초안이 승인되기 이전인 2009년 2월부터 독일 환경위원회(Environmental Committee)를 중심으로 대중 협의회(Public Consultation)를 추진함으로써, 대중의 이해와 공감대 형성에 노력하고 있다. 또한, 캐나다 연방정부에서는 1999년에 제정된 캐나다 환경보호법(Canadian

Environmental Protection Act)에 따라, 그리고 네덜란드에서는 광산법(Mining Law)과 환경관리법(Environmental Management Law)에 따라 이산화탄소 지중저장 프로젝트들을 규제하고 있다.

이에 비하여, 국내에서는 이산화탄소 지중저장과 관련된 범부처적 차원의 종합적 관리 및 환경 규제 법규 등이 전무하며, 사회적·제도적 인프라 구축에도 어려움을 겪고 있다. 게다가, 관계 부처별로 전략로드맵을 각기 마련하여 저장사업의 일관성과 추진 동력이 떨어지고 있다. 즉, 관련 법·규정의 부재와 더불어 CCS 정보의 올바른 제공이 미약하여, 앞으로 지중저장이 실현되는 경우에 저장지 주변 주민과 환경단체와의 마찰도 우려된다.

본 장에서는 미국 EPA의 ‘EPA-UIC Rule’과 EU의 ‘CCS Directive’에 대하여 요약 정리한다. 이들 법규에서는 지중저장의 환경 영향 관리를 위한 근간을 제시하고 있는데, 무엇보다도 관련 법안의 가장 중요한 원칙은 응용 가능한 지하수의 수질 보호에 있다.

### 3.1. 미국 EPA의 UIC(지하 주입 관리) 규정

미국에서는 이산화탄소 지중저장과 관련하여 주의회와 연방의회를 통해 다양한 법과 규제들이 논의되어 왔는데, 이는 이산화탄소의 특수성(특히, 가스상 유출 및 저장 이후에 발생하는 이차적인 위해성)을 고려하여 지중저장의 환경 위해성을 최소화하기 위한 것이다. 미국 EPA가 2010년 12월 마련한 ‘이산화탄소 지중저장을 위한 관정의 관리를 위한 지하 주입 관리 프로그램 하위 규정(Federal Requirements under the Underground Injection Control (UIC) Program for Carbon Dioxide Geologic Sequestration (GS) Wells; Class VI Rule) (75 F 77230)’은 자국에서 수행되는 모든 이산화탄소 주입 및 저장 시설의 토지 소유자, 운영자, 관리자와 주정부의 관리 부서에 대하여 적용되는 연방 차원의 지중저장 규제 및 관리 법령이다. 기존의 ‘안전 음용수법(Safe Drinking Water Act; SDWA)’에 규정되어 있는 ‘지하 주입 규제 프로그램(Underground Injection Control(UIC) Program)’에다가 이산화탄소 지중저장과 관련된 내용을 새롭게 추가하여 제정하였다. EPA는 안전 음용수법(SDWA)에 따라 이산화탄소 지하 주입에 대한 관리 권한을 갖는다. 본 규정은 2011년 9월 7일 이후 적용되고 있다. 본 법령에서는 이산화탄소 지중저장을 위한 주입정(injection wells)의 기본 틀(위치, 설치, 운영 등), 모니터링, 주입 후 부지 관리 등에 대하여 규정하고 있으나, 포집 및 수송, 그리고 ‘석유 회수 증진(enhanced oil recovery; EOR)’을 목적으로 수행되는 이

**Table 2.** Classification of underground injection wells (after US EPA, 40 C.F.R. §144.6)

Class	Description
	(1) Wells used by generators of hazardous waste or owners or operators of hazardous waste management facilities to inject hazardous waste beneath the lowermost formation containing, within one-quarter mile of the well bore, an underground source of drinking water.
Class I	(2) Other industrial and municipal disposal wells which inject fluids beneath the lowermost formation containing, within one quarter mile of the well bore, an underground source of drinking water. (3) Radioactive waste disposal wells which inject fluids below the lowermost formation containing an underground source of drinking water within one quarter mile of the wellbore.
Class II	(1) Wells which inject fluids which are brought to the surface in connection with natural gas storage operations, or conventional oil or natural gas production and may be commingled with waste waters from gas plants which are an integral part of production operations, unless those waters are classified as a hazardous waste at the time of injection. (2) Wells which inject fluids for enhanced recovery of oil or natural gas. (3) Wells which inject fluids for storage of hydrocarbons which are liquid at standard temperature and pressure.
Class III	Wells which inject for extraction of minerals including: (1) Mining of sulfur by the Frasch process; (2) In-situ production of uranium or other metals; this category includes only in-situ production from ore bodies which have not been conventionally mined. Solution mining of conventional mines such as stopes leaching is included in Class V; (3) Solution mining of salts or potash.
Class IV	(1) Wells used by generators of hazardous waste or of radioactive waste, by owners or operators of hazardous waste management facilities, or by owners or operators of radioactive waste disposal sites to dispose of hazardous waste or radioactive waste into a formation which within one-quarter (1/4) mile of the well contains an underground source of drinking water. (2) Wells used by generators of hazardous waste or of radioactive waste, by owners or operators of hazardous waste management facilities, or by owners or operators of radioactive waste disposal sites to dispose of hazardous waste or radioactive waste above a formation which within one-quarter (1/4) mile of the well contains an underground source of drinking water. (3) Wells used by generators of hazardous waste or owners or operators of hazardous waste management facilities to dispose of hazardous waste, which cannot be classified under paragraph (a) (1) or (d) (1) and (2) of this section (e.g., wells used to dispose of hazardous waste into or above a formation which contains an aquifer which has been exempted pursuant to 40 C.F.R. § 146.04).
Class V	Wells not included in Class I, II, III, or IV, such as storm water drainage wells and septic system leach fields.
Class VI (NEW)	Well used to inject carbon dioxide (CO <sub>2</sub> ) for the purpose of long-term storage.

산화탄소 저장에 대해서는 다루지 않는다.

### 3.1.1. 배경 및 제정 과정

1974년에 EPA는 ‘안전 음용수법(SDWA)’을 처음 제정하여 ‘음용 가능한 지하수’의 수질이 악화되지 않도록 관리하고 있다. 이 법에서는 음용수의 수질 기준을 설정하고, 유해 폐기물의 발생과 운반 및 처리에 대한 체계적인 관리가 포함한다. 이 법의 부속 규정인 ‘지하 주입 규제 프로그램(UIC Program)’은 유해 폐기물, 천연가스, 하수 등의 지하 주입 처리를 관리하는 프로그램으로서 이들 물질의 지중 주입으로 인해 음용 가능한 지하수가 오염되지 않도록 안전하게 주입하고 저장하는 것을 목표로 한다(SDWA Section 1421(d)). 기존의 UIC Program에서는 지하 주입공을 5개 군(Class 부터 V)으로 분류하였다. 2008년 7월, 이산화탄소 지중저장을 다루기 위하여 새로

운 Class VI가 ‘이산화탄소 지중저장 규칙(The proposed geologic sequestration rule)’을 통하여 처음 제안되었다(Table 2). 본 추가 규정은 약 2년간의 의견 수렴 기간을 거쳐 2010년 11월 ‘이산화탄소 지중저장 관정의 관리를 위한 지하주입 관리 프로그램 하위 규정’으로 최종 확정되었다.

### 3.1.2. 주요 내용

이산화탄소 지중저장을 위한 ‘UIC Class VI Rule’에서는 지하에 주입된 이산화탄소가 상부 대수층으로 누출되지 않고 안전하게 저장되도록 도모하기 위하여, 부지 선정에서부터 주입, 모니터링, 검증, 주입정의 폐쇄, 폐쇄 후 장기(50년) 모니터링에 대한 사업자의 책임 등을 규정하고 있다. 다만, 일부 하위 규정에서는 프로젝트 지역별로

지질 환경에 부합하는 특정 허가 기준을 마련하는데 있어 허가 당국의 재량권도 인정하고 있다. 주요 내용을 기술 하면 다음과 같다.

#### (1) 부지 선정과 Class VI 관정 허가에 필요한 정보

조항 146.82에서는 Class VI 관정 허가에 필요한 정보, 조항 146.83에서는 부지 확정을 위한 최소 준거를 다루고 있다. 이산화탄소의 저장과 누출은 저장 지역의 지질구조에 지대한 영향을 받는다. 예를 들어, 저장 지역의 지질구조가 대부분 모래나 자갈로 이루어져 있다면 이산화탄소 누출은 주입 관정에서 수 km 떨어진 지역에서도 일어날 수 있다. 주입된 이산화탄소의 누출이 발생하여 음용수로 사용 중이거나 사용될 가능성이 있는 친심도의 지하수에 영향을 미쳐 수질을 변화시킨다면 생태계에 심각한 영향을 미칠 수도 있다. 따라서 이산화탄소 지중저장을 위한 관정의 설치 혹은 저장 사이트(저장지)의 선정 단계에서는 반드시 예비(후보) 지역의 지질 특성에 적합한 모델링 기법과 함께 지하수 배경치 조사를 제시해야 한다(Aarnes et al., 2009; Smith et al., 2010).

UIC Class VI Rule에서는 관정 허가를 받기 이전에 예비 저장지와 주변 지역의 지질 및 수문지질 정보, 리뷰 지역(area of review) 내 모든 관정에 관한 정보, 리뷰 지역 내 모든 음용수 관정을 포함하고 있는 지하 지층의 지화학 배경치(geochemical baseline), 주입 예정인 이산화탄소의 화학적·물리적 특성 분석 자료 등을 관계 당국에 제출하여야 한다. 또한, 부지 선정에 있어서도, 저장지 내 주입 구역(injection zone)이 주입된 이산화탄소의 총부피를 수용할 수 있을 만큼 충분한 면적과 두께 및 공극률과 투수율을 가지고 있는지 그리고 주입 구역을 둘러싼 덮개암 구역(confining zone)이 주입에 의한 균열 혹은 단층으로 영향이 없을지를 반드시 입증하여야 한다.

#### (2) 주입정의 착정/설치

조항 146.86에서는 주입정의 건설 조건을 규정하고 있다. 이산화탄소 지중저장에서는 대상 지층에 부존하는 지하수를 경제적으로 활용하지 않을 것임을 전제로 하지만, 주입정 혹은 관측정을 통해 누출이 발생할 경우에 상부 대수층의 오염이 발생할 수 있으므로, 주입정에 대한 착정 및 설치에 관한 규정이 반드시 필요하다.

Class VI 관정의 운영자나 기술자는 a) 음용 가능한 지하수 대수층 또는 허가받지 않은 공간으로의 이산화탄소 이동을 방지하고, b) 적절한 측정 기기와 장비를 사용하며, c) 주입정 튜브와 케이싱 사이의 공간에 대한 지속적

모니터링이 시행될 것임을 보장해야 한다. 특히, 관정 내 되메움제인 케이싱, 시멘트, 패커 등의 모든 재료는 미국 석유협회(American Petroleum Institute)나 국제재료시험학회(ASTM International) 또는 이와 동급 기관에 의한 평가를 받아야 한다.

#### (3) 주입정 운영 이전의 검증, 샘플링 및 테스트

조항 146.87에서는 주입정 운영 이전의 주요 행위를 규정하고 있다. 관정 운영자나 기술자는 Class VI 관정의 건설 중에 적절한 경과기록서를 작성하고 조사 및 테스트를 수행하여야 한다. 이에 는 지중저장과 관련된 모든 지역의 지질 정보, 예를 들어 깊이, 두께, 공극률, 투수율, 구성 암석, 염도 등이 포함된다. 이 조항은 건설 중인 관정이 조항 146.86에서 요구하는 조건을 충족하였는지를 검증하고 적절한 배경치 데이터를 획득하기 위함이다.

#### (4) 주입정 운영

조항 146.88은 이산화탄소 주입정의 운영 규정을 다루고 있다. 이에 의하면, 이산화탄소 주입 압력은 주입 지점 균열 압력의 90%를 초과해서는 안되며, 주입에 의해 새로운 균열을 발생시키거나 기존 균열을 가속화시키지 않아야 한다. 무엇보다 중요한 것은, 어떠한 경우라도 음용 가능한 지하수를 오염시키는 일이 없어야 한다는 것이다. 지하수 오염 방지를 위하여, 케이싱의 최외부와 관정 틈 사이의 이산화탄소 주입도 명확히 금지하고 있다.

#### (5) 테스트와 모니터링

조항 146.90에서는 테스트 및 모니터링 규정을 명기하고 있다. Class VI 관정의 소유자나 기술자는 UIC Class VI Rule에 따라 지중저장 프로젝트가 예상한 대로 진행되고 있는지를 확인하고, 검증과 모니터링을 수행하여 음용 가능한 지하수가 고농도의 이산화탄소로부터 안전하게 보호되는지를 확실히 평가하여야 한다. 모니터링에서는 이산화탄소의 거동을 확인하기 위하여, 직접 모니터링(이산화탄소의 유량과 주입 압력 및 지층 압력 측정, 지하수 및 불포화대에 미치는 영향을 파악하기 위한 지화학 모니터링 기법 등)과 간접 모니터링(탄성파탐사, 전기탐사, 중력탐사, 전자기탐사 혹은 공내 이산화탄소 검출 기술)을 수행해야 한다. 모니터링은 주입 전, 주입 중, 주입 종료와 폐쇄에 걸친 지중저장의 전 과정에서 지속적으로 수행되어야 한다.

모니터링의 목적은, a) 사전 모니터링을 통하여, 이산화탄소 주입 및 저장이 이루어질 저장지의 기본 조건 및

상태를 구축하고, b) 지중 주입을 효과적으로 제어하고, c) 저장지로부터의 이산화탄소 누출과 거동을 탐지하고, d) 주입 후 폐쇄된 관정의 완전성을 평가하고, e) 저장 효율 및 저장 기작(포획 기작)을 확인하고, f) 모니터링 결과를 예측 모델과 비교함으로써 모델의 성능을 검증 및 보정하고, g) 지표 누출을 감지 및 정량화하고, h) 누출로 인한 안전성 및 환경에 미치는 영향을 평가하고, i) 이산화탄소 주입으로 인한 미소 진동을 모니터링하고, j) 오염 복원 활동을 설계 및 평가하고, k) 이산화탄소 배출 감소 효과에 대한 비준과 재무 거래(탄소세)를 위한 회계 처리 및 저장량 확인을 도모하고, l) 이산화탄소 주입에 따른 타 지질 자원과의 상호작용과 영향을 평가하고, m) 지반 변형, 지진 및 기타 누출 관련한 법적 분쟁을 해결하고, n) CCS 프로젝트의 공적 투명성과 가시성을 보장하는데 있다(Benson et al., 2004).

#### (6) 주입 후 부지 관리 및 폐쇄

조항 146.93에서는 주입 이후의 사이트 관리와 폐쇄를 규정한다. 저장 사이트의 폐쇄 시에 소유권자 혹은 운영권자는 Class VI 관정에 의하여 음용 가능한 지하수가 오염되지 않았음을 입증하여야 한다. 또한, 이산화탄소 주입이 중단된 이후에도 최소 50년 동안 주입 사이트를 지속적으로 모니터링하여 이산화탄소 플룸과 압력 전위 (pressure front)의 도달 위치를 정확히 밝혀야 한다. 사이트 폐쇄가 이루어지고 나면 90일 이내에 소유자 혹은 기술자는 관계 당국에 반드시 사이트 폐쇄 보고서를 제출해야 한다.

#### (7) 응급 조치 및 복원

조항 146.94은 응급 조치와 복구를 규정한다. 지중저장 중에 이산화탄소가 누출되어 음용 가능한 지하수를 오염시킬 것이 예상되는 경우에는, 주입을 신속히 중단하고 누출을 확인 및 평가하기 위하여 필요한 모든 업무를 수행해야 한다. 또한, 24시간 이내에 관계 당국에 보고하고, 관계 당국에서 사전에 승인한 응급 및 복원 계획을 시행해야 한다. 재주입은 음용 가능한 지하수가 오염되지 않았음을 입증한 이후에나 시작될 수 있다.

#### 3.1.3. 요약 및 시사점

최근 미국의 CCS 사업은 매우 활발한데, 퇴적분지에서 육상저장을 기본으로 하고 있다. 따라서 가장 중요한 음용수 공급원인 지하수의 환경 관리를 가장 중요하게 취급하고 있다. EPA의 UIC 프로그램은 ‘안전 음용수법

(SDWA)’의 부속 규정인데, 유해하거나 2차적으로 유해성이 나타날 수 있는 물질을 지하에 주입 처리하는 것을 환경적으로 관리하기 위하여 일찍이 마련되었다. 즉, 음용 가능한 지하수(USDW)가 오염되지 않도록 하기 위함이다. 이 프로그램의 목표는 ‘음용수 공급원(음용 가능한 지하수)의 질을 악화시키지 않고 음용수 공급원에 오염물질이 추가되는 것을 규제하는 것이 아니라, 오염물질이 음용수 공급원에 도달하지 않도록 원천적으로 보장하는’ 것이다. 따라서 모든 지하 주입 관정은 음용수 공급원으로 주입 물질의 유출이 일어나지 않도록 고안되어야 하며, 일단 주입이 시작되면 주입 물질이 주입 지역(주입 지층)으로부터 음용수 공급원으로 이동되지 않도록 적정 기준을 설정하여 이행하여야 한다.

최근 UIC 프로그램에 새롭게 추가된 Class VI 관정에 관한 규정은 ‘이산화탄소 지중저장을 위한 관정이 음용 가능한 지하수를 확실하게 보호할 수 있는 방법으로 적절하게 배치 및 건설, 시험, 감시, 폐쇄될 수 있도록 설계하는 것’을 목표로 하고 있다. 본 규정은 이산화탄소 지중저장에 의한 지하수의 오염 관리를 일차적 목표로 하지만, 동시에 이산화탄소 지중저장의 효율을 극대화함으로써 이산화탄소 감축을 통한 경제성을 확보하기 위한 도구로서도 의미가 있다. 지중저장된 이산화탄소의 누출을 최소화하기 위해서는 모든 절차에서의 환경관리 규정을 이행해야 하지만, 이러한 누출 최소화는 동시에 CCS의 목표 달성과 상업성 확보를 보장하는 일이기도 하기 때문이다.

### 3.2. EU의 CCS Directive

EU는 환경 보호와 지속 발전을 위한 정책과 수단을 매우 적극적으로 도모하고 있다. 특히, 교토의정서의 발효 이후로 의무 감축 국가로서 효율적으로 이산화탄소를 감축하기 위하여 배출권거래제(EU-ETS)와 친환경 자동차를 위한 자동차 세제 마련 등을 시행함으로써, 전세계 어느 국가보다도 이산화탄소 배출량을 빠르고 효율적으로 감축하고 있다(da Grasa Carvalho, 2012). 이와 함께, EU 집행위원회에서는 CCS를 ‘온실가스 대책과 에너지 공급 안정성을 동시에 만족시킬 방안’으로 규정하고, 이와 관련된 여러 지침(명령)을 제안하고 있다. CCS와 관련된 기존 지침들에서는 주로 CCS의 위험성 관리에 초점을 맞추고 있었다. ‘Directive 85/337/EEC’에서는 탄소 포집, 파이프라인을 통한 수송, 저장과 관련한 환경 영향 평가를 다루었고, ‘Directive 2004/35/EC’에서는 CCS에서 야기되는 환경 영향에 대한 책임을 다루었다.

2009년 4월에 제정된 ‘Directive 2009/31/EC(CCS

Directive)’는 환경적으로 안전한 이산화탄소 지중저장을 도모하기 위한 법적 틀을 수립하기 위한 것으로서, 회원국 당사국(competent authority, CA)에서의 지중저장을 위한 환경 규제와 책임 소재를 총괄 규정하고 있다. 따라서 이산화탄소 지중저장 프로젝트를 계획하는 모든 EU 회원국들은 반드시 본 지침에서 요구하는 저장 시설 설치 계획, 부지 선정과 운영 및 관리 사항을 만족시켜야 한다. CCS 지침은 원칙적으로 EU 내의 배타적 경제 수역과 대륙붕에서의 지질학적 이산화탄소 저장에 대해 적용되며, 연구와 관련된 프로젝트에는 적용되지 않는다. 그렇지만, 연구 목적의 프로젝트라도 100킬로 톤 이상 저장일 경우에는 지침의 적용 대상이 된다.

### 3.2.1. 배경 및 제정 과정

EU 집행위원회에서는, 제2세대 바이오연료, 신재생에너지 발전소 등 전력망 연계, 건설 운송 산업 부문의 에너지 효율 향상 기술과 더불어 CCS를 온실가스 감축을 위한 핵심 수단으로 규정하고 있다. EU 전체 전력 생산의 약 30%를 석탄 발전이 차지하고 있고 EU 지역에 석탄 자원이 풍부하다는 사실을 고려하여, CCS가 온실가스 감축과 에너지 공급 안정성을 동시에 만족시킬 방안으로 보기 때문이다.

이에 EU 집행위원회에서는 ‘이산화탄소 지중저장의 안전성과 효율성을 평가하고 프로젝트의 효율적 수행을 도모’하기 위하여, 2008년 1월 ‘기후 행동 및 재생에너지 종합 정책(Climate Action and Renewable Energy Package)’을 통하여 ‘CCS 관련 지침(Directive on the Geological Storage of Carbon Dioxide)’을 제안하였다. 이 지침에는 Directive 85/337/EEC (96/61/EC) 및 Directives 2000/60/EC (2001/80/EC, 2004/35/EC, 2006/12/EC)와 Regulation (EC) No. 1013/2006, COM(2008) 18) 등이 포함된다. 이 제안은 2009년 4월 최종 지침인 ‘Directive 2009/31/EC (이하 CCS 지침)’로 제정되었다. CCS 지침에 따라 EU 회원국들은 2011년 6월 25일까지 자국 법 체제 내에 CCS Directive의 내용을 재규정하고 법률에 포함시키도록 하였다.

참고로, EU의 공동 규범은 크게 1) EU의 일차 법의 근원이 되는 조약(Treaty), 2) 조약을 바탕으로 이사회, 집행위원회, 유럽의회가 제정하는 규정(Regulation), 지침(Directive), 결정(Decision), 3) EU가 대외적으로 체결한 협정과 조약, 4) 유럽 사법재판소 판결 혹은 해석을 통해 확립된 판례법 등으로 나뉜다. 따라서 CCS 지침은 조약에 명시된 내용을 구체화하여 법적 구속력을 가지도록 한

집행 규범, 즉 회원국의 당국, 개인, 법인 등을 망라하여 EU 전체에서 직접 적용되는 강력한 규범이라 할 수 있다. 지침에서는 이사회가 결정한 전반적인 목표와 제정 시한만을 제시하고, 구체적인 실행 방법은 개별 회원국에 위임하고 있다. 따라서 CCS 지침이 EU 각국에서 효력을 갖기 위해서는 각국은 별도의 국내법을 제정해야 하며, 지침의 효력은 국내법이 제정될 때까지 연기된다. 아울러, 구체적인 실행 사항과 절차도 각국의 상황에 맞추어 일부 수정할 수 있다.

### 3.2.2. 주요 내용

EU의 CCS 지침은 8개 장(Chapter)과 40개 조항(Article) 및 2개 부칙(Annex)으로 이루어져 있다. 이에는 지중저장 활동의 전 주기 동안에서의 각 단계별 활동, 주요 활동, 규제 단계 등을 모두 포함한다. CCS 지침에 제시한 주요 이슈는, 1) 지중저장 관련 정의, 2) 이산화탄소 스트림(CO<sub>2</sub> stream)의 조성, 3) 모니터링 및 검증, 4) 폐쇄 및 폐쇄 후 의무, 5) 책임 이전 등이다.

본 절에서는 지중저장의 개요와 지중저장 환경영향 평가의 근간을 제시하고 있는 1장부터 4장에 대하여 요약 정리한다.

#### (1) 대상, 개요 및 정의

1장에는 개념과 정의가 실려 있다. 앞서 기술한 바와 같이, CCS 지침은 기후 변화에 대응하기 위한 방안으로서 환경적으로 안전한 지중저장을 위한 법적 틀로 제정되었으며, 지중저장의 목적은 이산화탄소를 영구 격리시킴으로써 공중 보건에 어떠한 위협이나 부정적인 영향이 미치는 것을 방지하는 것이다. 주요 개념 및 정의는 다음과 같다.

‘저장 사이트(저장지)’는 “지중저장을 위해 사용되는 지하 지층, 그리고 저장과 관련된 지표 및 주입 시설”로, ‘저장 단지(storage complex)’는 “저장 사이트 및 저장 효율과 안전성에 전반적인 영향을 주는 주변 지층(즉, 이차적인 덮개층)”으로 정의된다.

#### (2) 저장 사이트 선정 및 탐사 허가

2장에서는 저장지의 선정과 탐사 허가에 관해 기술하고 있다. 지중저장을 계획하는 모든 EU 회원국은 전 영토에 걸쳐 저장 능력(capacity)을 평가해야 한다. 이를 위하여 EU 위원회는 회원국 간에 최선의 방법과 절차를 공유할 수 있도록 필요한 역할을 할 수 있다. 탐사 허가 및 탐사는 저장 부지의 선정과 저장 용량 평가를 위해 시행되



며, 시범 주입에 관련된 모니터링에도 필요하다. 지중저장이 이루어질 예비 사이트는 ‘계획 중인 저장 단지 및 부칙 I에 명시된 주변 지역에 대해 특성 파악과 평가를 실시함으로써, 지중저장에 적합한 구조이며 이산화탄소 누출에 따른 인간과 환경에의 어떠한 위해성도 없음을 만족시켜야’ 한다.

저장지와 주변 지역에 관한 특성 파악에 대해서는 부칙 I에 기술되어 있는데, 그 과정은 크게 세 단계를 통해 이루어진다. 1단계는 데이터 수집 단계인데, 저장지와 저장 단지에 필요한 용적 측정과 함께 3차원 지구 모델링을 수행하기 위하여 충분한 양의 데이터를 수집한다. 이를 통해 취합된 데이터는 2단계에서 예비 저장 후보지(덮개암과 수리적으로 연결된 지역의 지하 유체도 포함)에 대한 3차원 모델(혹은 이와 유사한 모델)의 개발에 활용된다. 3단계에서는 저장 사이트로 주입되는 이산화탄소의 시간 경과에 따른 변화를 모델링하고, 모델링 결과를 활용하여 저장의 역학적 거동, 민감도 특성, 위험도 평가를 수행한다. 다만, CCS 프로젝트 운영자가 저장지 특성화와 평가를 위한 방안을 충분히 관계 당국(CA)에 제출할 경우에는 규정 범위 내에서 본 조항의 부분적인 수정이 허용된다.

### (3) 저장 허가

3장에서는 저장 허가에 관하여 규정하고 있다. EU 각국은 저장 허가 없이는 저장소를 절대 선정할 수 없으며, 개별 저장소는 단 한 명의 운영권자를 둔다. 저장 허가에는 a) 저장지와 저장 단지의 특성 평가, b) 저장 과정에 있어 요구되는 제반 정보(저장 예정 이산화탄소의 총량, 저장 지층의 최대 압력, 최대 주입 속도와 압력 등), c) 저장될 이산화탄소 스트림의 순도(유해 물질의 동시 처분을 방지하기 위함), d) 승인된 모니터링 계획, e) 누출 혹은 특이 불규칙 현상이 발생할 때 관계 당국에 보고해야 하는 요구 사항과 교정 조치, f) 저장지 폐쇄 후의 관리 계획, g) 개정, 재검토, 갱신과 저장 허가 회수와 관련된 조항, h) 재정적, 기술적 적정성 등이 포함된다. 여기서 이산화탄소 스트림은 ‘주입 저장을 위하여 포집된 이산화탄소 포집물’로 정의되며, 유해 폐기물로는 분류되지 않는다.

### (4) 주입 운영, 폐쇄 및 폐쇄 이후의 의무

4장에서는 저장지 운영과 폐쇄 및 폐쇄 이후의 의무 사항에 대해 규정한다. 저장지에 주입되는 이산화탄소 스트림은 압도적으로 이산화탄소로 구성되어 있고, 처분 혹은 기타 목적으로 어떠한 폐기물이나 다른 물질이 포함되어

서는 아니 된다. 다만, 포집 혹은 주입 단계에서 우연히 주입된 물질이나 이산화탄소 거동 파악을 위한 모니터링 과정에서 인위적으로 주입된 미량의 물질은 허용된다. 다만, 이들 물질은 a) 저장지나 저장지로의 이산화탄소 수송 시설에 영향을 주거나, b) 환경이나 인간의 건강에 중대한 위협이 되어서는 안되며, c) 자치(지역)법에서 자체 규정하는 농도에 비해 낮아야 한다.

저장지 운영권자는 반드시 주입 설비, 주입 단지 및 주변 환경에 관한 모니터링을 수행해야 한다. 모니터링의 목적은, 저장지에서의 이산화탄소와 지층수의 실제 거동을 파악하여 모델링의 예측 거동과 비교하고, 주입된 이산화탄소의 누출 및 인간이나 주변 생태(특히, 음용수)에 미치는 위해 요소를 탐지하며, 교정 조치의 효율성을 평가하기 위함이다. 모니터링 조항은 부칙 II를 바탕으로 계획되고 갱신되며, 어떠한 경우라도 매 5년마다 이산화탄소 누출 위험 평가, 환경과 공중위생 위험 평가, 새로운 과학 지식과 적용 가능한 최신 모니터링 기술의 향상 등을 고려하여 반영해야 한다. 부칙 II에서는 모니터링 계획 단계에서 반드시 명시해야 할 요소(샘플링 적용 횟수와 경시별 샘플링의 이론적 근거, 주입정에서의 이산화탄소의 압력과 온도, 주입된 물질의 화학 분석, 저장소의 온도와 압력 등)와 모니터링 기술의 선정 및 갱신 기준을 제안하고 있다.

저장 사이트는 관계 당국의 공식 허가를 받은 후에 폐쇄될 수 있으나, 운영권자는 저장 사이트의 모든 책임을 관계 당국에 양도하기까지는 CCS 지침에 명기된 요구 사항에 따라 모니터링, 보고서 작성, 교정 조치 등에 관하여 책임을 갖는다. 아울러, Directive 2003/87/EC에 기술된 이산화탄소 누출의 경우에는 Directive 2004/35/EC에 명시된 사고 예방과 보수의 의무 및 책임도 유지된다.

### 3.2.3. 요약 및 시사점

EU의 CCS 지침에서는 이산화탄소 지중저장에 관련한 법적 기반을 비교적 명확하게 마련함으로써, 위험(리스크) 관리, 책임, 장기 관리 계획 등에 대하여 국제적인 모델을 제시한 것으로 평가된다. 그러나 지침의 특성상 구체적인 실행 방법과 규제 사항 보다는 일반적인 규제 항목만을 나열하고 있으며, 지중저장의 주요 논란이 될 수 있는 규제 및 관리 항목에 대한 기준은 다소 모호하다. 이들 세부 항목은 국가별로 마련하여 시행토록 하고 있다.

CCS 지침에서는 이산화탄소 저장 사이트 선정의 조건으로서 ‘누출의 가능성이 크지(significant) 않고, 인간 건강과 환경에 대한 위험도도 크지 않아야 함’을, 그리고 이

산화탄소 스트림에 대해서는 ‘조성 상 압도적으로 (overwhelmingly) 이산화탄소로 구성되어야 함’을 명기하고 있다. 따라서 이산화탄소 누출 시에 어느 정도가 중대한 위험인지, 그리고 주입될 이산화탄소 스트림은 어느 정도의 조성 조건을 가져야 하는지에 대한 뚜렷한 기준은 제시되지 않았다. 또한, 미국 EPA의 UIC-Class VI Rule 과는 달리 모니터링의 구체적 방법과 기준 등을 제안하고 있지 않다. 이는 EU 회원국 별로 국가별 상황과 정책에 적합한 저장 기술과 규제 법령에 대해 재량권을 인정한 것으로 볼 수 있으며, 실제로 유럽 국가들의 이산화탄소 지중저장은 국가별로 실정에 맞추어 육상 및 해저 지중저장을 선택하고 있다. 그렇지만, EU의 CCS 지침에서도 모든 규모(100킬로 톤 이상)의 이산화탄소 지중저장 프로젝트에 대하여 누출에 따른 환경적 위해성을 관리하기 위한 부지 평가, 모니터링, 복원 계획 등의 전 과정 관리계획을 수립하여 시행할 것을 명기하고 있다. 육상 저장의 경우에는 음용수인 지하수 자원의 보호를 중요시하며, 이를 위해 저장 대상 지층과 덮개 지층의 모니터링을 강조하고 있음은 명확하다.

**4. 결론 및 제언**

전세계적으로 CCS는 화석에너지 기반의 산업 구조를

유지하면서도 범지구적 기후 변화에 효과적으로 대응할 수 있는 혁신 기술로 주목받고 있다. 기술적 측면에서는 크게 포집(및 압축), 운송과 저장의 3단계로 구성되지만, 모든 단계는 반드시 상호 연계되어 운영되어야 한다. 특히, 지중저장은 저장 공간이 풍부하고, 매우 긴 시간 동안 안정적으로 이산화탄소를 저장할 수 있으며, 비용 효율도 높은 것으로 평가되고 있어 여러 국가에서 대대적으로 추진되고 있다. 그럼에도 불구하고, 지중저장의 가장 큰 위험성은 주입된 이산화탄소의 누출로 인식되고 있다. 이산화탄소가 누출되면 저장 효율을 낮출 뿐 아니라 지역 주민들의 건강과 주변 생태계에 악영향을 줄 수 있기 때문이다. 따라서 주입된 이산화탄소의 거동(특히 이산화탄소 포획 기작)을 파악하고 누출을 예방하는 것이 필수적으로 요구된다. 특히, 육상 저장의 경우에는 음용 가능한 지하수 자원의 보호가 가장 중요하다. 지하 지층 내에서의 이산화탄소의 거동 파악 및 누출 예방을 위해서는 부지 선정에서부터 주입 중 및 주입 후 폐쇄에 이르는 전 단계에 걸쳐 모니터링 및 평가를 체계적으로 수행해야 한다. 따라서 지중저장이 안전하고 친환경적으로 이루어질 수 있도록 국가적 차원의 인·허가 및 환경 관리 규정이 마련되어 적용되어야 한다.

지중저장 선진국에서는 기존 법률을 검토하여 법적 미비점을 수정 보완하거나 저장에 관한 독립 법령을 제정하

**Table 3.** Comparison of CCS regulatory frameworks in US (EPA) and EU

	US EPA (UIC-Class VI Rule)	EU (CCS Directive)
Relative definitions	<p>Area of review: the region surrounding the geologic sequestration project where USDWs may be endangered by the injection activity.</p> <p>Corrective action: the use of director-approved methods to ensure that wells within the area of review do not serve as conduits for the movement of fluids into underground source of drinking water (USDW).</p>	<p>Storage site: a defined volume area within a geological formation used for the geological storage of CO<sub>2</sub> and associated surface and injection facilities</p> <p>Storage complex: the storage site and surrounding geological domain which can have an effect on overall storage integrity and security; that is, secondary containment formation</p> <p>CO<sub>2</sub> stream: a flow of substance that results from CO<sub>2</sub> capture processes</p>
CO <sub>2</sub> stream composition	<p>CO<sub>2</sub> stream means carbon dioxide that has been capture from an emission source associated substances derived from the source materials and the capture process, and any substances added to the stream to enable or improve the injection process.</p>	<p>CO<sub>2</sub> stream must consist overwhelmingly of carbon dioxide, and must contain no waste or other matter added for the purposes of disposal.</p>
Sitting requirements	<p>The geologic system must be comprised of (a) an injection zone of sufficient areal extent, thickness, porosity and permeability to receive total anticipated volume of CO<sub>2</sub> (b) a confining zone(s) that is free of transmissive faults of fractures sufficient areal extent and integrity to contain injected CO<sub>2</sub> stream and displaced formation fluids and allow injection to proposed maximum pressure and volumes without initiating or propagating fractures in the confining zone(s)</p>	<p>The site characterization permit (issued prior to the storage permit) includes a four-step process for site selection. The data collection requirements (Step 1) includes collection of site-specific data, including reservoir engineering (including volumetric calculations of pore volume for CO<sub>2</sub> injection and ultimate storage capacity, pressure and temperature conditions, pressure volume behavior as a function of formation injectivity, cumulative injection rate and time) (Annex I)</p>

Table 3. continued

	US EPA (UIC-Class VI Rule)	EU (CCS Directive)
Cement requirements	Surface casing must extend through base of lowermost USDW to the surface; one long string casing must extend to injection zone and cemented to surface in one or more stage (§146.86)	No requirement on well construction or cement requirements
Injection	“Except during simulation, the owner or operator must ensure that injection pressure does not exceed 90 percent of the fracture pressure of the injection zone” (§146.88) Preamble states that U.S. EPA is seeking comments on this.	Fracture pressure is mentioned as a data collection requirements; no restriction set (Annex I, Step 1)
	Purpose: “Testing and monitoring of geologic sequestration sites refers to a suite of activities that are used to detect any fluid migration or risk factors that may lead to fluid migration, which potentially could endanger underground sources of drinking water (USDWs).”	Purpose: (a) the comparison of the actual and modeled behavior of the CO <sub>2</sub> (and the naturally occurring formation water) in the storage site; (b) the detection of any significant irregularities, any mitigation & leakage of CO <sub>2</sub> and any significant adverse effects on the surrounding environment (drinking water, human population); (c) the assessment of the effectiveness of any corrective measures taken; (d) updating the assessment of the safety and integrity of the storage complex
	Monitoring tools: “The testing and monitoring plan must be submitted with the permit application, for Director approval, and must include a description of how the owner or operator will meet the requirements of this section.” (§146.88) NOTE: U.S. EPA rule does require minimum monitoring and gives some specificity with respect to corrosion monitoring in the well.	Monitoring tools: Choice of monitoring technology shall be based on best practice available at the time of design. The directive provides three technology selection options that shall be considered and used as appropriate.
Monitoring	Monitoring and data collection: Reporting requirements outlines in §146.91 include reporting the characteristics of CO <sub>2</sub> stream, injection pressure, flow rate, volume and annular pressure (monthly averages), volume of CO <sub>2</sub> injected, as well as other criteria.	Monitoring and data collection: Parameters to be monitored are identified so as to fulfill the purposes of monitoring. However, plan shall in any case include continuous or intermittent monitoring of following items: Fugitive emissions of CO <sub>2</sub> at injection facility; CO <sub>2</sub> volumetric flow at injection well heads; CO <sub>2</sub> pressure and temperature at injection well heads (to determine mass flow); Chemical analysis of injected material; Reservoir temperature and pressure (to determine CO <sub>2</sub> phase behavior and states).
	Monitoring duration: “The owner or operator shall continue to conduct monitoring as specified in the director-approved post-injection site care and site closure plan for at least 50 years following the cessation of injection. At the Director’s discretion, the monitoring will continue until the geologic sequestration project no longer poses an endangerment to USDWs” An exemption may be granted by the director (§146.93).	Monitoring duration: “Post-closure monitoring shall be based on the information collected and modeled during the implementation of the monitoring plan” It shall serve in particular to provide information required for transfer of responsibility. This is to document that the stored CO <sub>2</sub> will be completely contained for the indefinite future (Annex II; Article 18)
Risk analysis and contingency plans	§146.84 outline the criteria for the area of review and corrective action. This section it mentions that the model must “consider potential migration through faults fractures, and artificial penetrations.” An emergency and remedial response plan is also required as outlined in §146.94	Security, sensitivity and hazard characterization are outlined as requirements. Specifically, the risk assessment should include an exposure assessment, an effects assessment, and a risk characterization (Annex I, Step 4).
Post-closure	Post-injection site care means appropriate monitoring and other actions (including corrective action) needed following cessation of injection to assure that USDWs are not endangered as required under §146.93.	‘Post-closure’ means the period after the closure of a storage site, including the period after the transfer of responsibility to the competent authority (Chapter 1, line 19)

기 위해 노력하고 있다. 미국 EPA에서는 기존의 ‘음용수 보호를 위한 지하 주입 규제 프로그램(UIC Program)’에

새로운 카테고리인 ‘Class VI 관정’을 추가 신설하여 이산화탄소 지중저장의 전 과정을 관리하고 있다. 지중 주

입의 토지 소유자 혹은 시행자는 지하 음용수(지하수)를 보호하기 위하여, 이 규정에 따라 주입정 위치, 주입정 설치, 주입정 운영, 모니터링, 주입 후 부지 관리 등을 망라한 모든 정보를 보고하여야 한다. EU에서도 CCS 지침(Directive)을 통하여 이산화탄소 지중저장을 위한 환경 규제와 책임 소재를 규정하고, 모든 회원국으로 하여금 2011년 6월까지 자국 법 체제 내에 동 지침에 기반한 세부 규정을 마련하도록 하였다. 미국 EPA 규정과 EU 지침에서의 가장 중요한 원칙은 이산화탄소를 안전하게 주입하고, 주입된 이산화탄소에 의한 환경 영향(특히, 음용 가능한 지하수의 수질 영향)을 최소화하는 것이다. 이와 함께, 이산화탄소의 안전성과 저장 효율을 평가하기 위하여, 주입 이전부터 주입 이후에 이르는 각 단계에 걸쳐 저장지와 주변 지층에서의 지구화학 및 지구물리 모니터링을 지속적으로 수행할 것을 규정하고 있다. Table 3에는 EPA 규정과 EU CCS 지침을 항목별로 비교하였다.

최근 우리나라에서도 CCS 기술을 저탄소 녹색성장을 위한 중점 육성 기술로 선정하였고, 2010년 녹색성장위원회에서는 국가 이산화탄소 감축 목표 달성을 위한 ‘국가 CCS 종합추진계획’을 수립하였다. 이에 따라, 2020년까지 CCS 플랜트 상용화와 국제 기술 경쟁력 확보를 목표로 한 CCS 기술 개발 추진 기반을 마련하였다. 이러한 기반 위에, ‘CO<sub>2</sub> 저장 핵심 요소 및 시스템 기술 확립을 통하여 CCS 기술을 완성함’을 목표로 하는 ‘Korea CCS 2020’ 사업(세부적으로는 2015년 1만톤급 육상 저장지의 확정 및 주입을 목표)이 착수되었으며, 그밖에 실증 및 상업 저장 계획이 추진되고 있다. 그렇지만, 정부의 중장기 CCS 프로젝트 추진에도 불구하고 환경적으로 안전한 CCS 사업을 위한 환경 관리 지침과 법규 정비는 여전히 미비한 상황이다. 따라서 지중저장의 장기적 처분 안전성과 환경 안전성을 확보하고 사회적 수용성을 제고하기 위하여, 국내 지중저장에 관련한 법령 및 환경 관리 지침의 마련이 시급하다.

국내 육상 지중저장의 환경 관리를 위한 법·제도 마련을 위해서는 미국 EPA의 경우처럼 ‘지하수법’에 기반한 개정이 가장 효과적일 것으로 판단된다. 지하수법은 1993년 12월에 제정된 국토해양부 주관의 법으로서, ‘지하수의 적절한 개발·이용과 효율적인 보전·관리에 관한 사항을 정함으로써, 적절한 지하수개발·이용을 도모하고 지하수 오염을 예방하여 공공의 복리 증진과 국민 경제의 발전에 이바지함’을 목적으로 하고 있다. 환경부의 수질 보호 업무도 지하수법에 포함되어 있는데, 환경부에서는 지하수 수질 관리 및 정화 계획을 수립하여 운

영토록 규정하고 있다.

현행 지하수법과 시행령 및 세칙에는 이산화탄소 지중저장의 환경 관리를 도모하기 위한 조항들이 이미 포함되어 있는 것으로 파악된다. 지하수에 영향을 미치는 굴착행위의 신고 등을 다룬 9조 4항에 ‘이산화탄소 지중저장을 목적으로 토지를 굴착하는 행위’를 포함할 수 있다. 실제로, 최근에 ‘지하수의 냉난방 에너지원으로서의 이용’에 관한 조항이 추가되기도 하였다. 또한, ‘지하수 보전구역의 지정’을 다룬 12조에 명시되어 있는 ‘주된 용수 공급원이 되는 대수층을 보호하기 위한 지역’이나 ‘공공 급수용 시설의 수질을 보호하기 위한 지역’과 관련하여, 이산화탄소 지중저장소를 지하수 보전구역의 범주에 포함시킬 수 있다. ‘지하수 보전구역에서의 행위 제한’을 다룬 13조에서는 폐기물의 배출·제조·저장이나 ‘지하수의 수위저하·수질오염 또는 지반침하 등 명백한 위험을 가져오는 행위’를 제한토록 규정하고 있는데, 이산화탄소 지중저장을 위한 굴착을 포함한 행위도 인·허가를 포함하여 환경 관리 대상으로 포함시킬 수 있다. 나아가 지하수법 16조에서는 지하수 오염 방지 명령 등을 다루고 있는데, 이산화탄소 지중저장 단지도 지하수오염 유발시설에 포함하여 관리할 수 있다. 결국, 이산화탄소 스트림을 폐기물로 간주할 수 있느냐의 문제에 상관없이 이를 지하수 오염물질 내지 영향유발물질로 간주할 수 있으며, 이러한 경우 지하수 보전 및 관리 대책을 수립하여 시행하고 모니터링과 정화 등의 제반 절차를 이행하도록 규정할 수 있다. 나아가, 지하 주입에 따른 지하수의 수질오염을 전반적으로 관리하기 위한 ‘지하 주입 관리 프로그램’을 지하수법에 추가하거나 또는 별도의 수질 보존 관련 법규로 조속히 마련할 필요성이 대두되고 있다.

## 사 사

본 연구는 2010년도 “차세대 핵심환경기술개발사업”에 의한 “이산화탄소의 지중저장 시 거동과 누출 관련 지질학적·지구화학적 영향인자 규명을 통한 최적 환경영향평가 기법 연구” 및 2012년도 국립환경과학원의 위탁연구과제인 “환경분야 CCS에 대한 법적근거 마련 연구(I)”의 부분 지원에 의해 수행되었다.

## 참 고 문 헌

Aarnes, J.E., Selmer-Olsen, S., Carpenter, M.E., and Flach, T.A., 2009, Towards guidelines for selection, characterization and

- qualification of sites and projects for geological storage of CO<sub>2</sub>, *Energy Procedia*, **1**, 1735-1742.
- Bachu, S., 1995, Flow of variable-density formation water in deep sloping aquifers: review of methods of representation with case studies, *Journal of Hydrology*, **164**, 19-38.
- Bachu, S., 2002, Sequestration of CO<sub>2</sub> in geological media in response to climate change: road map for site selection using the transform of the geological space into the CO<sub>2</sub> phase space, *Energy Conversion and Management*, **43**, 87-102.
- Bachu, S., 2008, Legal and regulatory challenges in the implementation of CO<sub>2</sub> geological storage: an Alberta and Canadian perspective, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **2**, 259-273.
- Benson, S.M., Gasperikova, E., and Hoversten, M., 2004, Overview of monitoring techniques and protocols for geologic storage projects, IEA Greenhouse Gas R&D Programme Report.
- Burton, E.A., Birkinshaw, K., Myer, L., Myhre, R., and Coombs, M. J., 2009, Informing policy development for geologic carbon sequestration in California, *Energy Procedia*, **1**, 4617-4624.
- Burton, M. and Bryant, S.L., 2009, Surface dissolution: minimizing groundwater impact and leakage risk simultaneously, *Energy Procedia*, **1**, 3707-3714.
- Chae, G.T., Yun, S.T., Choi, B.Y., Kim, K., and Schevalier, M., 2005, Geochemical concept and technical development of geological CO<sub>2</sub> sequestration for reduction of CO<sub>2</sub>, *Economic and Environmental Geology*, **38**, 1-22 (in Korean).
- Choi, B.Y., Yun, S.T., Mayer, B., Hong, S.Y., Kim, K.H., and Jo, H.Y., 2012, Hydrogeochemical processes in clastic sedimentary rocks, South Korea: a natural analogue study on the role of dedolomitization in geologic carbon storage, *Chemical Geology*, **306-307**, 103-113.
- Condor, J., Unatrakam, D., Asghari, K., and Wilson, M., 2011, A comparative analysis of regulations for the geologic storage of carbon dioxide, *Energy Procedia*, **4**, 5895-5902.
- da Grasa Carvalho, M., 2012, EU energy and climate change strategy, *Energy*, **40**, 19-22.
- Damen, K., Faaij, A., and Turkenburg, W., 2003, Health, safety and environmental risks of underground CO<sub>2</sub> sequestration: overview of mechanisms and current knowledge. Utrecht University, Netherlands.
- DOE/NETL, 2011, Risk Analysis and Simulation for Geologic Storage of CO<sub>2</sub>, Report.
- Fessenden, J.E., Clegg, S.M., Rahn, T.A., Humphries, S.D., and Baldrige, W.S., 2010, Novel MVA tools to track CO<sub>2</sub> seepage, tested at the ZERT controlled release site in Bozeman, MT, *Environmental Earth Science*, **60**, 325-334.
- Forbes, S.M., Verma, P., Friedmann, S.J., Curry, T.E., Wade, S.M., and Venezia, J., 2009, WRI CCS guidelines and emerging geologic sequestration regulations: a comparative assessment, *Energy Procedia*, **1**, 1759-1766.
- Holloway, S., Pearce, J.M., Hards, V.L., Ohsumi, T., and Gale, J., 2007, Natural emissions of CO<sub>2</sub> from the geosphere and their bearing on the geological storage of carbon dioxide, *Energy*, **32**, 1194-1201.
- Iding, M. and Ringrose, P., 2009, Evaluating the impact of fractures on the long-term performance of the In Salah CO<sub>2</sub> storage site, *Energy Procedia*, **1**, 2021-2028.
- IEA, 2008, Carbon capture and storage: meeting the challenge of climate change. 45.
- IEA, 2010, Energy Technology Perspectives 2010, Scenarios and Strategies to 2050. Paris.
- IPCC, 2005, IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, New York.
- Kharaka, Y.K., Cole, D.R., Thordsen, J.J., Kakouros, E., and Nance, H.S., 2006, Gas-water-rock interactions in sedimentary basins: CO<sub>2</sub> sequestration in the Frio Formation, Texas, USA, *Journal of Geochemical Exploration*, **89**, 183-186.
- Kharaka, Y.K., Thordsen, J.J., Kakouros, E., Ambats, G., Herkelrath, W.N., Beers, S.R., Birkholzer, J.T., Apps, J.A., Spycher, N.F., Zheng, L., Trautz, R.C., Rauch, H.W., and Gullickson, K.S., 2010, Changes in the chemistry of shallow groundwater related to the 2008 injection of CO<sub>2</sub> at the ZERT field site, Bozeman, Montana, *Environmental Earth Science*, **60**, 273-284.
- Koornneef, J., Faaij, A., and Turkenburg, W., 2008, The screening and scoping of environmental impact assessment and strategic environmental assessment of carbon capture and storage in the Netherlands, *Environmental Impact Assessment Review*, **28**, 392-414.
- Lu, J., Partin, J.W., Hovorka, S.D., and Wong, C., 2010, Potential risks to freshwater resources as a result of leakage from CO<sub>2</sub> geological storage: a batch-reaction experiment, *Environmental Earth Science*, **60**, 335-348.
- Nelson, C.R., Evans, J.M., Sorensen, J.A., Steadman, E.N., and Harju, J.A., 2005, Factors affecting the potential for CO<sub>2</sub> leakage from geologic sinks, Report of Plains CO<sub>2</sub> Reduction (PCOR) Partnership, 36p.
- Oldenburg, C.M., Bryant, S.L., and Nicot, J.-P., 2009, Certification framework based on effective trapping for geologic carbon sequestration, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **3**, 444-457.
- Ortoleva, P.J., Dove, P., and Richter, F., 1998, Geochemical perspective on CO<sub>2</sub> sequestration. *U.S. Department of Energy Workshop on "Terrestrial Sequestration of CO<sub>2</sub> - An Assessment of Research Needs"*, Gaithersburg, MD.

- Park, Y.G., 2012, Role of CCS Technology under Emission Permit Trading System. KCRC (Korea Carbon Capture & Sequestration R&D Center) Issue Report, **2**, 13p. (in Korean)
- Ronald W, K., 2003, Evaluation of leakage potential from a carbon dioxide EOR/sequestration project. *Energy Conversion and Management*, **44**, 1921-1940.
- Szulczewski, M.L., MacMinn, C.W., Herzog, H.J., and Juanes, R., 2012, Lifetime of carbon capture and storage as a climate-change mitigation technology, *PNAS*, **109(14)**, 5185-5189.
- Smith, M.S., Sharma, S., Wyckoff, T.B., and Frost, C.D., 2010, Baseline geochemical characterization of potential receiving reservoirs for carbon dioxide in the Greater Green River Basin, Wyoming, *Rocky Mountain Geology*, **45**, 93-111.
- van der Zwaan, B. and Gerlagh, R., 2009. Economics of geological CO<sub>2</sub> storage and leakage, *Climate Change*, **93**, 285-309.
- Water Research Foundation, 2009, Potential Groundwater Quality Impact Resulting From Geologic Carbon Sequestration. Denver, 280p.
- White, D.J. and Johnson, J.W., 2009, Integrated geophysical and geochemical research programs of the IEA GHG Weyburn-Midale CO<sub>2</sub> monitoring and storage project, *Energy Procedia*, **1**, 2349-2356.
- White, S.P., Allis, R.G., Moore, J., Chidsey, T., Morgan, C., Gwynn, W., and Adams, M., 2005, Simulation of reactive transport of injected CO<sub>2</sub> on the Colorado Plateau, Utah, USA, *Chemical Geology*, **217**, 387-405.
- Wigand, M., Carey, J.W., Schtt, H., Spangenberg, E., and Erzinger, J., 2008, Geochemical effects of CO<sub>2</sub> sequestration in sandstones under simulated in-situ conditions of deep saline aquifers, *Applied Geochemistry* **23**, 2735-2745.
- Xu, T., Zheng, L., and Tian, H., 2011, Reactive transport modeling for CO<sub>2</sub> geological sequestration, *Journal of Petroleum Science and Engineering* **78**, 765-777.
- Yammaoto, K., Kitamura, O., Itaoka, K., and Akai, M., 2005, A risk analysis scheme of the CO<sub>2</sub> leakage from geologic sequestration. In: Rubin, E.S., Keith, D.W., Gilboy, C.F., Wilson, M., Morris, T., Gale, J., Thambimuthu, K., Eds., *Greenhouse Gas Control Technologies*, **7**, Elsevier Science Ltd, Oxford.
- Yun, S.T., Park, E., Lee, M.H., Wang, S.G., Jo, H.Y., Lee, Y.J., Kim, H., and Lee, S.Y., 2011, Studies of geological and geochemical factors related to the behaviors and leakage of carbon dioxide in geologic carbon storage: suggestion of optimal methods for environmental impact assessment of carbon storage. Final Report of 2010 Eco-Technopia 21 Project, Ministry of Environment and Korea University, 358p. (in Korean).