

위성영상과 GIS를 활용한 CO₂ 지중저장 후보지 선정

홍미선 · 손홍규[†] · 정재훈 · 조형식 · 한수희

연세대학교 공과대학 사회환경시스템공학부

Optimal Site Selection of Carbon Storage Facility using Satellite Images and GIS

Mi-Seon Hong, Hong-Gyoo Sohn[†], Jae-Hoon Jung, Hyung-Sig Cho, and Soo-Hee Han

School of Civil & Environmental Engineering, College of Engineering, Yonsei University

Abstract : In the face of growing concern about global warming, increasing attention has been focused on the reduction of carbon dioxide emissions. One method to mitigating the release of carbon dioxide is Carbon Capture and Storage (CCS). CCS includes separation of carbon dioxide from industrial emission in plants, transport to a storage site, and long-term isolation in underground. It is necessary to conduct analyses on optimal site selection, surface monitoring, and additional effects by the construction of CCS facility in Gyeongsang basin, Korea. For the optimal site selection, necessary data; geological map, landcover map, digital elevation model, and slope map, were prepared, and a weighted overlay analysis was performed. Then, surface monitoring was performed using high resolution satellite image. As a result, the candidate region was selected inside Gyeongnam for carbon storage. Finally, the related regulations about CCS facility were collected and analyzed for legal question of selected site.

Key Words : Global warming, Carbon Dioxide, Carbon capture and Storage (CCS), GIS, Overlay analysis.

요약 : 지구온난화의 주범인 이산화탄소가 국제적으로 문제가 되고 있는 가운데, 이산화탄소의 농도 증가를 억제시키기 위해 이산화탄소를 포집하여 장기간 안정적으로 저장시킬 수 있는 탄소 포집 및 저장(Carbon Capture and Storage : CCS) 기술의 개발이 요구되고 있다. CCS 기술은 이산화탄소 저감 방안 중 가장 직접적이고 현실적인 방안으로 각광을 받고 있으나, 이산화탄소 최적 저장지의 선정 및 이산화탄소 지중저장이 야기할 수 있는 부수적인 영향에 대한 분석이 요구된다. 본 연구에서는 경상분지를 대상으로 GIS 기법을 이용하여 CCS 설비를 위한 적지 분석을 수행하고, 현황분석 및 법적분석을 수행하였다. 적지분석에는 지질도, 수치표고모형, 경사도, 토지피복도를 이용한 경중률 분석이 사용되었으며, 현황분석에는 고해상도 위성영상을 활용하였다. 그 결과 연구대상지내 이산화탄소 저장시설 설치를 위한 최적후보지가 선정되었으며, 마지막으로 법적분석에서는 탄소 저장과 관련된 현행 규정 및 탄소 저장시설의 설비 시 문제가 될 수 있는 각종 법적 사항을 조사하였다.

접수일(2011년 2월 9일), 수정일(1차 : 2011년 2월 19일), 게재확정일(2010년 2월 20일).

[†] 교신저자: 손홍규(sohn1@yonsei.ac.kr)

1. 서론

지구 온난화의 주요 원인으로 거론되는 온실가스의 배출 억제는 교토의정서의 단계적 발효에 따라 세계적인 화두가 되고 있다. 이에 따라 대표적인 온실가스로 지목되고 있는 이산화탄소의 배출억제 혹은 감축을 위한 세계 각국의 노력이 경주되고 있다(이태종 외, 2009). 한편, 2013년 이후로 한국도 이산화탄소 의무감축에 포함될 것이라는 것이 많은 전문가들의 공통된 의견이며(윤용승 외, 2008), 이에 따라 우리나라에서도 이산화탄소를 저장하기 위한 다양한 노력이 이루어지고 있다. 그 중에서도 Carbon Capture and Storage (CCS)는 이산화탄소를 직접적으로 감축할 수 있는 종합 기술로서, 기존의 고농도 이산화탄소 대량 배출원에서 발생하는 이산화탄소를 포집하고 포집된 이산화탄소를 압축·수송하여 지중 및 해양 퇴적 암반층에 안전하게 저장하고 장기 모니터링 하는 기술로서 에너지부문에서 지속적으로 배출되는 이산화탄소의 양을 직접적으로 감축할 수 있는 온실가스 대응기술로 각광을 받고 있다(한국과학기술평가원, 2010). 이러한 CCS 기술은 현재 미국, 영국, 캐나다, 호주, 일본, 카타르 등 선진국을 중심으로 다양한 프로젝트가 진행 중에 있으며, 국내의 경우도 2002년부터 교육과학기술부의 지원으로 이산화탄소 지중저장을 위한 기초기술 개발이 진행되고 있다(이태종 외, 2009).

대규모 이산화탄소의 저장이 가능한 후보지로는 생산 중이거나 고갈된 유·가스전, 심부 염대수층 및 석탄층 등이 있다. 이 중, 석탄층의 경우 이산화탄소를 주입하면 석탄 표면에 흡착되어 있는 메탄을 이산화탄소가 선택적으로 치환하여 메탄의 탈착이 촉진됨에 따라 생산정(production well)을 통해 메탄의 생산성을 향상시킬 수 있다. 이러한 석탄층 메탄증진(Enhanced Coal-bed Methane; ECBM) 법은 이산화탄소를 지중에 저장함과 동시에 메탄을 생산하여 경제적인 효과를 발생시킨다(허철 외, 2008). 국내의 경우 경성누층군을 중심으로 이러한 석탄층이 존재하지만, CCS 사업과 관련하여 이산화탄소 저장시설의 최적지는 아직 선정되지 않은 상황이며, 경성분지내의 지질 및 지형, 토지이용 현황 및 주요 이산화탄소 배출지와와의 거리를 고려한 시설 부지의 선정이 요구되고 있는 상황이다. 아울러 이산화탄

소 최적 저장지역의 조건이 갖추어져 있더라도 효율적이고 안정적인 이산화탄소 지중저장을 위해서는 이산화탄소 지중저장이 야기할 수 있는 부수적인 영향에 대한 분석이 요구된다. 그 중에서도 환경적인 평가와 더불어 실제 저장 시공단계에서 발생하는 여러 법적인 문제를 예측하고, 이를 해결하는 방안이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 GIS 기법을 이용하여 경성분지를 대상으로 이산화탄소 저장 시설 설치를 위한 후보지를 선정하고, 후보지에 대한 현황 분석 및 설계단계에서 향후 문제시 될 수 있는 법의 저촉 사항에 대한 분석을 통해 궁극적으로 최적의 설계에 따른 법적 피해 보상비와 민원 문제를 최소화 하고자 하는 연구를 진행하였다. 우선 최적 후보지 선정을 위한 적지 분석에 토지피복도, 지질도, 수치표고모형, 경사도 등이 이용되었으며, 경중률 분석을 통해 최종 후보지를 선정하였다. 현황 분석에는 저해상도 LANDSAT ETM+ 및 고해상도 SPOT 위성영상이 활용되었으며, 연구대상지의 현 토지이용 현황 및 주변 탄소배출시설과의 접근성 등을 고려하였다. 마지막으로 법적 분석에서는 탄소 저장과 관련된 현행 규정을 조사하고, 탄소 저장시설의 설비 시 문제가 될 수 있는 각종 법적 문제를 예측하고자 하였다.

2. 연구방법

1) 연구대상지

본 연구는 이산화탄소 저장에 적합한 경성분지를 대상으로 하였다. 경성분지는 중생대 백악계의 경성누층군이 주로 분포하는 한반도 동남부의 영남지역을 말한다. 경성분지 내 연구대상지의 지형은 대체적으로 동서의 너비가 좁고 남북으로 길게 펼쳐진 지형을 이루며 산지가 많고 경지가 협소하다. 주로 농경지가 분포하였고 곳곳에 고위평탄면이 발달하였다.

2) 자료취득

연구자료는 토지피복도, 지질도, 수치표고모형, 경사도, 그리고 위성영상 자료가 사용되었다. 이 중, 토지피복도, 지질도, 수치표고모형, 경사도는 연구대상지의 지형 및 지질, 토지피복 현황 등을 고려한 적지선정에 사용되었으며, 위성영상은 적지선정 후 적지의 지상부 현황

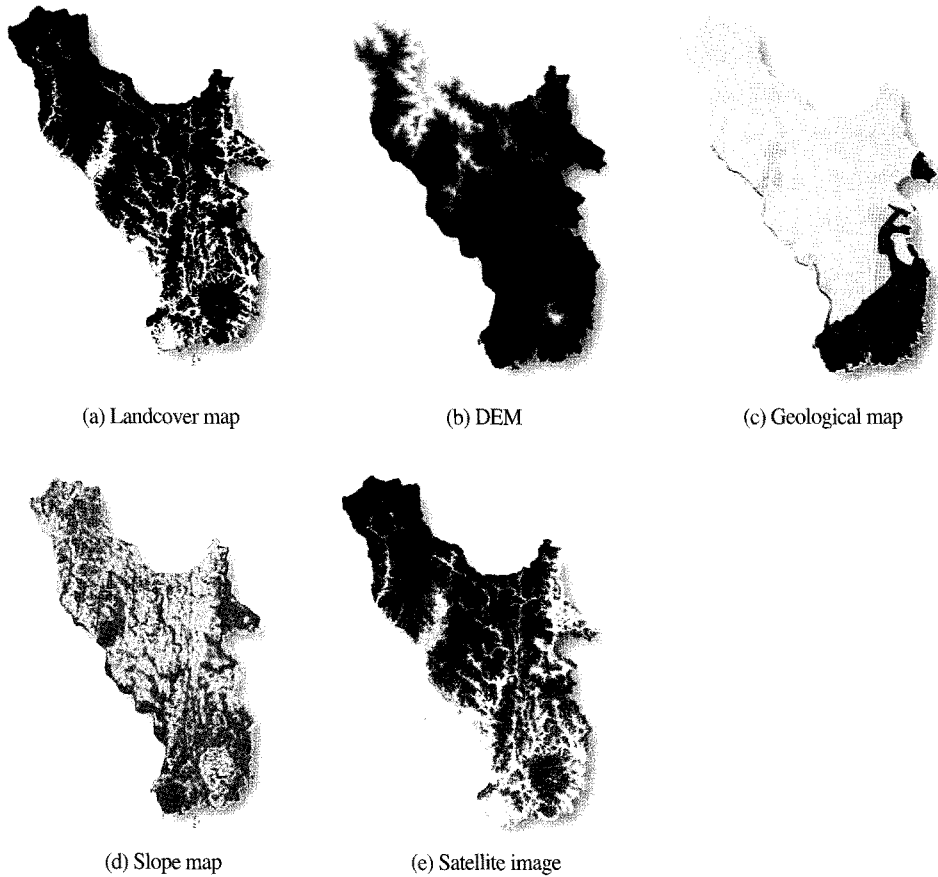


Fig. 1. Data specification.

분석에 사용되었다. 자료간의 정확한 정위치 편집이 수행되었으며, Fig. 1은 취득된 자료의 현황을 나타낸다.

(1) 토지피복도

토지피복도는 위성사진을 주된 자료로 사용하여 지표면의 환경적인 특징을 자연상태 측면에서 표현한 지도로, 지표면의 현 상황을 반영한다. Fig. 1-(a)는 연구대상지의 토지피복현황을 나타내고 있으며, Table 1은 연구대상지의 토지피복 분류 항목이다. 토지피복도 상에서 연구대상지에는 주로 산지와, 논, 밭이 분포하고 있는 것을 확인할 수 있다.

(2) 수치표고모형

수치표고모형은 연구대상지에 대한 표고 정보를 나타내고 있다. 본 연구에서는 1:25,000 수치지도를 이용하여 연구대상지의 수치표고모형을 생성하였다. 이산화탄소 저장소 적지로 고도가 높은 산지지역보다는 고도

Table 1. Legend of landcover map

항목	구분	항목	구분	항목	구분
주거 지역		공공시설 지역		기타 재배지	
공업 지역		논		활엽수림	
상업 지역		밭		침엽수림	
위락시설 지역		하우스 재배지		혼효림	
교통 지역		과수원		자연 초지	
골프장		기타 초지		내륙 습지	
연안 습지		채광 지역		기타 나지	
내륙수		해양수			

가 낮은 지역이 탄소 저장 설비의 설치에 적합할 것으로 판단하여 수치표고모형을 통해 연구대상지의 고도를 파악함으로써, 저장 공사에 적합한 지역을 찾는데 사용하였다. Fig. 1-(b)는 연구대상지의 수치표고모형을 나타내고 있으며, 평균 고도는 317m 이다.

(3) 지질도

지질도는 지표의 표면에 드러난 암석의 분포나 지질의 구조를 색채·모양·기호 등으로 나타낸 지도다. 연구 대상지는 충적층이 대부분의 지역을 차지하고 있으며, 녹색의 남부 지역은 주로 경상누층군으로 구성되어 있다. 이산화탄소 저장은 주로 석탄층에 이루어지며, 경상누층군은 석탄층을 포함하고 있는 지질대로, 이산화탄소 저장에 매우 적합한 지역이라 할 수 있다. Fig. 1-(c)는 연구대상지의 지질현황을 나타내고 있으며, 지질 분류 항목은 Table 2에 나타나 있다.

(4) 경사도

경사도는 연구대상지의 경사 정도를 파악하기 위해 사용되었다. 일반적으로 경사가 심한 지형에서는 시설 설비를 위한 공사 비용이 많이 소모되므로 편의성과 비용측면에서 유리한 경사도가 낮은 지역을 선택하게된다. Fig. 1-(d)는 연구대상지의 경사도를 나타내고 있으며, Table 3은 경사도의 범례를 5단계로 구분하여 나타내고 있다.

Table 2. Legend of geological map

항 목	구분	항 목	구분
대보관입 암류화강암		충적층	
경상누층군		소백산편마암 복합체화강편	
수계			

Table 3. Legend of Slope map

항목	구분	항목	구분	항목	구분
0-5°		5-15°		15-23°	
23-31°		31° -			

(5) 위성영상

연구대상지의 실제 지상부 현황을 파악하기 위해서는 원격탐사로 취득된 자료가 필요하다. 본 연구에서는 2003년에 취득된 30m의 해상도를 갖는 LANDSAT ETM+ 영상을 통해 연구대상지와 그 주변의 지상부 현황을 파악하고자 하였으며, 적지선정 이후 2차 후보지의 보다 정확한 현황 파악에는 2.5m의 고해상도 자료인 SPOT 위성영상이 활용되었다. Fig. 1-(e)는 연구대상지의 LANDSAT ETM+ 영상을 나타내고 있다.

3) 연구 흐름도

다음의 Fig. 2는 본 연구의 흐름도를 나타내고 있다. 본 연구에서는 1차 후보지로 경상분지를 선정하였으며, 연구대상지 내 최적 이산화탄소 저장시설 후보지를 선정하기 위해 지형 및 지질, 토지이용 유무를 고려한 경중률 분석을 사용하였다. 이후, 선정된 2차 후보지를 대상으로 저해상도 LANDSAT ETM+ 및 고해상도 SPOT 위성영상을 이용한 현황분석을 실시하였으며, 이를 통해 선정된 지역의 지형지물 및 행정 경계, 그리고 탄소배출지와의 근접성 여부를 판단하여 최종 후보지를 선정하였다. 마지막으로 이산화탄소 지중저장 관련 법규 조사 및 분석을 시행하였다.

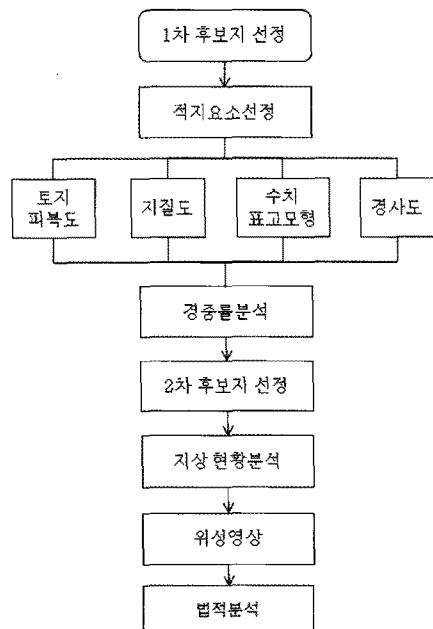


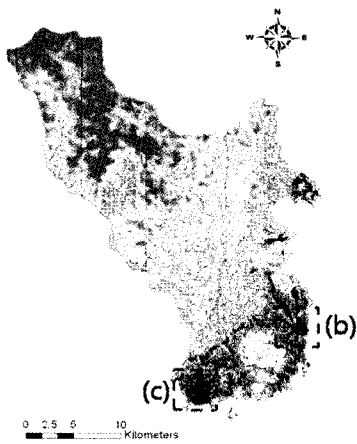
Fig. 2. Study scheme.

3. 분석결과

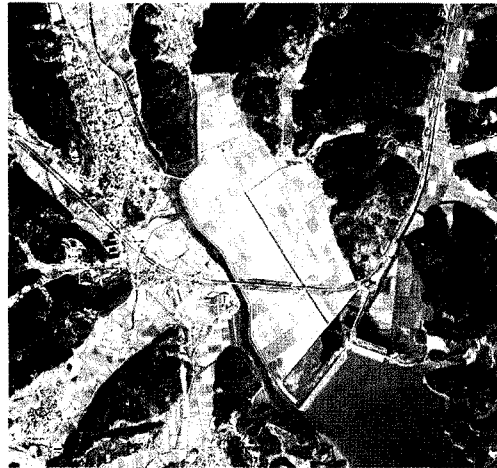
1) 적지분석

토지이용계획에 있어서 적지분석은 예측되는 토지의 이용을 위하여 가장 적합한 위치를 찾는 방법이다(황국웅 외, 2000). 좁은 국토의 가용토지는 한정되어 있는 반면, 도시화의 진행과 산업활동의 다양화로 인하여 토지이용이 점차 집약적으로 변화하는 상황에서 한정된 토지자원을 효율적으로 이용하고 도시의 질서 있는 성장과 기능의 확보를 위하여 각종 토지이용을 체계적으로 관리하는 것이 필요하며, 이러한 토지이용의 체계적 관리를 위한 기술적 방안으로 토지이용계획을 통한 적

지분석을 수립하게 된다(이진택 외, 2001). 본 연구에서는 장래 개발가능적지 추정을 위한 방법으로 경중률 분석을 통해 연구대상지에 대한 적지 분석을 수행하였다. 이러한 경중률 분석은 각 주제도 별, 그리고 주제도에 따른 성분 별로 개별적인 점수를 부여하여 최종 합산한 점수들의 순위를 통해 개발가능적지를 최종 선택한다. 본 연구에서는 탄소저장 시설의 설치를 위해 연구대상지의 지형적, 환경적인 부분을 고려하였고, 이를 위해 수치표고모형과 지질도, 토지피복도 그리고 경사도가 사용되었다. 모든 분석에는 상용 소프트웨어인 ArcGIS를 활용하였다. Fig. 3은 연구대상지 내 중첩 분석 결과 및 선정된 후보지 두 곳을 나타낸 것이다. 본 연구에서 가장 중요하다고 판단된 요소는 실질적인 탄소 저장



(a) Study area



(b) SPOT image over the first candidate region



(c) SPOT image over the second candidate region

Fig. 3. Satellite image over the study area.

이루어지는 석탄층 지역으로, 이러한 지질 성분을 나타내는 주제도인 지질도에 가장 높은 경중률 40%를 부여하고, 그 외의 주제도인 토지피복도, 수치표고모형, 경사도에는 동일한 경중률인 20%를 부여하였다. 각 주제도의 하위 항목인 성분별 경중률 분석에서는 지질도의 경우 이산화탄소의 저장에 적합한 석탄층을 포함한 경상누층군에 가장 높은 경중률을 부여하였다. 토지피복도의 경우 탄소저장설비의 설치가 어려울 것으로 판단된 도심지 및 수계를 제외한 숲과 논 지역에 경중률을 높이 부여하였다. 수치표고모형은 고도가 낮은 평지에, 경사도는 경사가 낮은 지역에 경중률을 높이 주었다. 경중률 분석을 통해 탄소저장설비의 설치를 위한 연구대상지 내 2차 후보지로는 총 두 곳이 선정되었으며, 두 지역 모두 석탄층을 포함하고, 대부분 논과 밭을 이루고 있으며 표고 및 경사는 각각 300m미만, 0~5° 사이의 다소 완만한 지형을 나타내고 있다.

2) 현황분석

적지선정 후 적지에 대한 지상 현황 정보가 필요하며, 분석에는 LANDSAT ETM+ 영상과 SPOT 위성영

상이 사용되었다. 고해상도 SPOT 위성영상을 이용한 2차 후보지의 현황 분석결과에서는 두 2차 후보지 모두 도심지와 떨어진 논과 밭으로 구성되어 있음을 확인하였으며, 향후 탄소저장시설 설치시, 기 설치된 시설물의 철거로 인한 보상 및 기타 민원 문제는 크게 고려되지 않을 것으로 판단된다. LANDSAT ETM+ 영상을 통해 연구대상지와 주변 지역의 현황을 파악한 결과 앞서 언급한 두 후보지 중 제 1후보지의 경우 인근에 제철소가 위치함이 파악되었다. 허철의 2008년 연구에 따르면 이산화탄소가 대규모로 발생하는 곳은 주로 화력발전소나 제철소에 해당하여(허철 외, 2008), 특히 제철소의 경우 연간 철 생산량은 약 500만 톤에 달할 정도로 규모가 크므로 이에 따른 이산화탄소 배출량 역시 매우 큰 것으로 보고되고 있다(경제뉴스, 2010). 이러한 대규모 이산화탄소 발생지와와의 인접성을 고려하여 본 연구에서는 두 후보지 중 제철소와 가까운 제 1후보지가 최종 적지로 선정되었다.

3) 법적분석

법적 분석에서는 이산화탄소 지중 저장에 따른 관련

Table 4. Legal Analysis

항 목	법 령	구 분
국토의 계획 및 이용에 관한 법률	국토의 계획 및 이용에 관한 법률 제76조 (용도지역 및 용도지구 안에서의 건축물의 건축제한 등) 및 같은법 시행령 제71조 (용도지역 안에서의 건축제한)에 의거 용도지역 안에서의 건축물의 용도, 종류 및 규모 등의 제한(이하 "건축제한"이라한다)은 다음 각 호와 같다. - 건축법 시행령 별표 제1호 제19호 : 위험물 저장 및 처리시설 자목(고압가스 충전 및 저장소) - 가능한 용도지역 : 전용공업지역, 일반공업지역, 준공업지역, 생산농지지역, 자연취락지구 - 도시계획조례로 지정 가능 : 보전녹지지역, 자연녹지지역, 보전관리지역, 생산관리지역, 계획관리지역, 농업지역, 관리지역 안에서는 자치조례로 지정된 지역에 가능 - 불가능지역 : 전용주거 및 일반주거지역, 준주거지역, 중심상업지역, 근린상업지역, 유통상업지역	◎
지자체 도시계획 조례	국토계획 조례 제5장 지역, 지구, 구역 안에서의 제한 제28조 (용도지역안에서의 건축제한) 영 제71조, 영 제78조제1항 및 영 부칙 제13조제1항의 규정에 의하여 용도지역 및 자연취락지구 안에서의 건축물의 용도, 종류 및 규모를 제한한다.	○
농지법	제4장 제1절의 농업진흥지역의 지정과 운용 제32조(용도구역에서의 행위 제한) ① 농업진흥구역에서는 농업 생산 또는 농지 개량과 직접적으로 관련되지 아니한 토지이용행위를 할 수 없다. 다만, 다음 각 호의 토지이용행위는 그러하지 아니하다. - 지하자원 개발을 위한 탐사 또는 지하광물 채광(採鑛)과 광석의 선별 및 적지(積置)를 위한 장소로 사용하는 행위	○
산지관리법	제2장 제2절 제12조 보전산지에서의 행위제한 ① 일업용산지에서는 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 행위를 하기 위하여 산지전용 또는 산지일시사용을 하는 경우를 제외하고는 산지전용 또는 산지일시사용을 할 수 없다. - 광물, 지하수, 그 밖에 대통령령으로 정하는 지하자원 또는 석재의 탐사·시추 및 개발과 이를 위한 시설의 설치	△
자연환경 보전법	자연환경, 수자원, 해안, 생태계, 상수원 및 문화재의 보전과 수산자원의 보호·육성 등을 위하여 필요한 지역으로 도시계획조례가 정하는 바에 의하여 건축할 수 있는 건축물은 공공용시설중 발전소가 있다.	△

(◎: 가장중요, ○: 중요, △: 보통)

법규를 조사하여 저장소 설치에 대한 지중 또는 지표면의 법인가 해결방안을 모색하고자 하였다. 다음의 표 4는 이산화탄소 저장소 설치에 있어 고려해야 할 법령을 중요도에 따른 우선 순위로 정리한 것이다. 탄소저장시설의 경우 위독가스를 처리하는 시설이므로, 설비시 최우선으로 고려해야 할 법령은 국토의 계획 및 이용에 관한 법률로써 고압가스의 저장 및 처리시설이 설치 가능한 지역과 불가능한 지역의 항목을 포함하고 있다. 또한 탄소저장시설 설치 시 지자체에 따라 지역, 지구, 구역별로 건축물의 용도, 종류 및 규모 제한이 이루어 질 수 있으므로, 지자체 도시계획 조례가 중요하게 검토되어야 한다. 한편, 탄소저장 적지로 선정된 지역이 주로 논과 밭임을 고려할 때, 농지의 개발 및 토지이용행위를 규정한 농지법 역시 중요하게 고려 되어야 한다. 반면, 산지관리법의 경우 적지선정지역이 평야인 관계로 중요 고려사항에서는 제외되었으며, 자연환경보전법 또한 선정지역이 자연보호구역과 무관한 생산농지지역이므로 역시 그 중요성이 다른 법률에 비해 떨어진다고 할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 GIS 기법을 이용하여 경상분지를 연구대상지로 이산화탄소 저장 시설의 설치를 위한 적지선정과 현황분석을 실시하고, 이에 따른 법인가 문제를 해결하고자 하였다. 적지선정에는 토지피복도, 지질도, 수치표고모형, 경사도 등이 이용되었으며, 경중률 분석을 통해 연구대상지 내 두 지역이 탄소저장 시설의 설치 조건을 만족하는 것으로 나타났다. 현황분석에는 고해상도 SPOT 위성영상 분석결과 후보지 대부분이 논과 밭으로 구성된 평지로 이루어져 있음이 파악되었다. 한편, LANDSAT ETM+영상을 이용하여 연구대상지 및 주변 환경을 조사한 결과, 제 1후보지 근처에 대규모 이산화탄소 발생지인 제철소가 위치하고 있는 것으로 나타났으며, 이산화탄소 운송시 비용감소를 위해 제 1후보지가 최종 적지로 선정되었다. 마지막으로 해당 지역의 법적

분석에는 국토의 계획 및 이용에 관한 법률, 지자체 도시계획 조례, 농지법 등을 우선 순위로 고려해야 하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 “이산화탄소 저감 및 처리 기술개발사업-지중특성에 따른 저장 용량 평가 및 GIS 기반의 저장소 탐색과제”의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 경제뉴스, 2010. 환경의 메카 포스코 광양제철소 탐방, <http://blog.naver.com/prelancer>
- 윤용승, 이승중, 2008. FutureGen 프로젝트와 CO2 지하저장 현황, 공업화학 전망, 11(1): 2-15.
- 이진덕, 이현화, 김성길, 2001. 도시지역의 토지이용 적지분석을 위한 지리정보 시스템의 이용, 한국지리정보학회지, 4(4): 29-38.
- 이태종, 한누리, 고광범, 황세호, 박권규, 김형찬, 박용찬, 2009. 이산화탄소 지중 저장 Pilot 부지 선정을 위한 의성지역 TM 탐사, 지구물리와 물리탐사, 12(4): 299-308.
- 한국과학기술기획평가원, 2010. 온실가스 대응 및 저탄소 녹색성장을 위한 중점 녹색기술로서의 이산화탄소 포집 저장(CCS)기술 현황과 정책동향, 동향브리프, 1: 1-18.
- 황국웅, 이규완, 2000. GIS와 다요소 의사 결정방법(MCE)에 의한 김해 대청공원 집단시설지구 적지분석, 한국지리정보학회지, 3(3): 45-53.
- 허철, 강성길, 최종수, 홍섭, 2008. 국내외 이산화탄소 육상/해양지중저장 연구 현황 및 비교 분석, 춘계학술대회 논문집, 141-148.