

한국 경상분지 하산동층의 이산화탄소 지중 저장 용량에 대한 확률론적 예비 평가

김중휘¹ · 김준모^{2,*}

¹중원대학교 자원순환환경공학과

²서울대학교 지구환경과학부

요 약

확률론적 방법을 이용하여 국내 이산화탄소 지중 저장 유망 육상 퇴적분지 중 하나인 경상분지 내 하산동층(대상 지층)의 이산화탄소 지중 저장 용량을 예비적으로 평가하였다. 먼저 기존의 문헌들로부터 경상분지의 세 지역(북부, 중부 및 남부) 내 대상 지층의 지질학적 특성(두께 및 경사), 물성(공극률) 및 환경(심도별 지중 유체 압력 및 지온 경사)의 범위와 확률론적 분포를 선정하였다. 다음으로 대상 지층의 이산화탄소 지중 저장 용량 산정을 위하여 몬테카를로 시뮬레이션 기반의 확률론적 예비 평가 방법을 제안하였다. 마지막으로 이 방법을 이용하여 세 지역 내 대상 지층에 대해서 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 저장 밀도(지층의 단위 체적당 저장될 수 있는 이산화탄소 질량)와 잠재(이론) 저장 용량을 각각 산정하였다. 평가 결과 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 저장 밀도는 북부, 중부 및 남부 지역 순으로 크다. 이러한 경향은 세 지역 내 대상 지층의 공극률 특성과 유사한데 이는 공극률이 이산화탄소 저장 밀도에 가장 큰 영향을 끼침을 지시한다. 한편 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 잠재 저장 용량은 북부, 남부 및 중부 지역 순으로 크다. 특히 중부 지역에서의 이산화탄소 잠재 저장 용량이 다른 두 지역에 비해서 상대적으로 더 작다. 이는 중부 지역에서의 대상 지층이 얇고 경사가 급하여 이산화탄소 지중 저장 대상 심도에 분포하는 대상 지층의 부피가 다른 두 지역에 비해서 상대적으로 더 작기 때문이다. 본 연구에서 제시된 이산화탄소 지중 저장 용량의 확률론적 예비 평가 방법과 평가 결과들은 향후 예상되는 국내 이산화탄소 지중 저장 프로젝트에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 경상분지, 하산동층, 이산화탄소 지중 저장, 저장 용량, 확률론적 평가 방법

Jung-Hwi Kihm and Jun-Mo Kim, 2013, Probabilistic Preliminary Evaluation of Geologic Carbon Dioxide Storage Capacity of the Hasandong Formation, Gyeongsang Basin, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 49, no. 3, p. 373-388

ABSTRACT: The geologic carbon dioxide storage capacities of the Hasandong Formation (i.e., target geologic formation) in the Gyeongsang Basin, which is one of the prospective onshore sedimentary basins for geologic carbon dioxide storage in Korea, were preliminarily evaluated using a probabilistic method. The ranges and probabilistic distributions of the geologic characteristics (i.e., thickness and dip), property (i.e., porosity), and environments (i.e., fluid pressure and geothermal gradient with depth) of the target geologic formation in the three areas (i.e., northern, central, and southern areas) of the Gyeongsang Basin were selected first from the preexisting literatures. A probabilistic preliminary evaluation method based on Monte Carlo simulation was then suggested for estimating the geologic carbon dioxide storage capacities of the target geologic formation. Finally, using this method, the storage densities (i.e., masses of carbon dioxide stored per unit volume of the target geologic formation) and potential (theoretical) storage capacities of the free fluid and aqueous phases of carbon dioxide were estimated for the target geologic formation in the three areas, respectively. The evaluation results show that the storage densities of the free fluid and aqueous phases of carbon dioxide are greater in the order of the northern area, central area, and southern area. This trend is similar to that of the porosity of the target geologic formation in the three areas indicating that the porosity has the most significant impact on the storage densities. On the other hand, the potential storage capacities of the free fluid and aqueous phases of carbon dioxide are greater in the order of the northern area, southern area, and central area. In particular, the potential storage capacities in the central area are relatively smaller than

* Corresponding author: +82-2-880-8190, E-mail: junmokim@snu.ac.kr

those in the other areas. It is because the target geologic formation in the central area is thinner and steeper, and thus its volume within the target depth for geologic carbon dioxide storage is relatively smaller than those in the other areas. It is expected that the probabilistic preliminary evaluation method and evaluation results using the method presented in this study can be usefully utilized in anticipated geologic carbon dioxide storage projects in Korea.

Key words: Gyeongsang Basin, Hasandong Formation, geologic carbon dioxide storage, storage capacity, probabilistic evaluation method

(Jung-Hwi Kihm, Department of Resources Recycling and Environmental Engineering, Jungwon University, Goesan-Gun 367-805, Korea; Jun-Mo Kim, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

1. 서 론

안정적이고 비용 효율적인 이산화탄소 지중 저장을 위해서는 대상 지층(저장암 및 덮개암) 또는 분지의 3대 성능(저장 성능, 밀봉 성능, 주입 성능)이 종합적으로 평가되어야 한다. 이 중에서 저장 성능을 대변하는 지표로 이산화탄소 지중 저장 용량(geologic carbon dioxide storage capacity)이 있다. 이산화탄소 지중 저장 용량은 이산화탄소 지중 저장 프로젝트의 기술적 및 경제적 실행 가능성(viability)을 좌우하기 때문에 프로젝트의 계획 및 부지 선정 단계에서 매우 중요하다(Kaldi and Gibson-Poole, 2008).

이산화탄소 지중 저장 용량은 크게 네 단계로 나누어지며, 상부로 갈수록 그 부피가 좁아지는 일종의 피라미드(pyramid)로 표현된다(Bachu *et al.*, 2007). 최하부가 잠재 또는 이론 저장 용량(potential or theoretical storage capacity)으로서 대상 지층의 공극이 이산화탄소로 완전하게 채워졌을 때의 저장 용량을 의미한다. 그 상부가 유효 저장 용량(effective storage capacity)으로서 잠재 저장 용량의 부분 집합이며, 기술적(지질학적 및 공학적) 한계가 적용된 저장 용량을 의미한다. 그 상부가 실용 저장 용량(practical storage capacity)으로서 유효 저장 용량의 부분 집합이며, 기술적 한계뿐만 아니라 경제적, 법적 및 제도적 장벽을 모두 고려한 저장 용량을 의미한다. 마지막으로 최상부가 일치 또는 부합 저장 용량(matched storage capacity)으로서 실용 저장 용량의 부분 집합이며, 이산화탄소 배출원(발전소 등)과 지중 저장 부지간의 관계가 부합되었을 때의 저장 용량을 의미한다.

현재 전 세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 이산

화탄소 지중 저장 용량 평가 방법은 미국 National Energy Technology Laboratory (NETL)에서 제시한 부피 기반의 산정 방법(volumetric based estimation method) (NETL, 2007)이다. 이 방법은 미국 Department of Energy (DOE) 방법으로 불리기도 하며, 역시 널리 사용되고 있는 Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF) 방법(CSLF, 2005)과 기본적으로 동일한 방법이다(Bachu *et al.*, 2007; Bradshaw *et al.*, 2007). 이러한 NETL 방법은 계산 과정이 매우 간단하여 특성화가 많이 진행되지 못한 대상 지층이나 퇴적분지에도 쉽게 적용할 수 있다는 장점이 있기 때문에 널리 사용되고 있다.

현재까지 국내에서도 부피 기반의 NETL 방법 (NETL, 2007)이 많이 사용되어 왔다. 먼저 Egawa *et al.* (2009)에 의해서 경상분지 신동층군 전체의 이산화탄소 지중 저장 용량이 평가된 바 있다. 이 연구에서는 지표에서 획득된 현장 측정 자료를 기반으로 간단한 지질 구조를 가정하여 사암층의 이산화탄소 저장 용량을 평가하였다. 또한 Hong *et al.* (2009)에 의해서 충남분지, 태백산분지, 문경분지 및 호남분지 전체의 이산화탄소 지중 저장 용량이 평가된 바 있다. 이 연구에서는 지표에서 획득된 현장 측정 자료와 기존에 조사 자료를 종합적으로 활용하여 사암층뿐만 아니라 석탄층의 이산화탄소 저장 용량을 평가하였다. 이들 두 연구는 국내에서 시도된 최초의 정량적 이산화탄소 지중 저장 용량 평가로서 그 의미를 가지지만 결정론적인 이산화탄소 저장 용량의 범위 및 평균값만을 제시하였다. 또한 이들 두 연구에서 사용된 이산화탄소 지중 저장 용량 평가 방법은 퇴적분지 내 지층 특성과 지중 유체 환경의 공간적 분포를 고려할 수 없기 때문에 정확도와 신뢰도

가 높은 결과를 산출하기 어렵다는 한계가 있다.

이러한 한계와 단점을 극복하기 위하여 Kim (2011)과 Kihm *et al.* (2011)에 의해서 삼차원 지층 모델링 및 열-수리학적 수치 모델링을 연계한 이산화탄소 지중 저장 용량 평가 방법이 제시된 바 있다. 이 연구에서는 북평분지 내 지층 특성과 지중 유체 환경의 공간적 분포를 격자 요소 단위로 고려하여 자유 유체상(free fluid phase)뿐만 아니라 수용액상(aqueous phase) 이산화탄소 저장 용량을 제시하였다. 하지만 이 연구에서도 결정론적인 이산화탄소 저장 용량의 평균값만이 제시되었다.

한편 Kim *et al.* (2012)에 의해서 울릉분지의 이산화탄소 지중 저장 용량이 평가된 바 있다. 이 연구에서는 탄성과 층서 단위(seismic stratigraphic unit)별로 대표 공극률 및 이산화탄소 밀도를 각각 적용하여 이산화탄소 잠재 저장 용량을 산정하였고 저장 효율의 확률론적 값을 활용하여 10%, 50% 및 90%에 해당하는 이산화탄소 유효 저장 용량을 각각 산정하였다. 하지만 이 연구에서도 공극률이나 이산화탄소 밀도 등이 확률론적으로 고려되지 못하였고 자유 유체상 이산화탄소 저장 용량만이 평가되었다.

이와 같이 국내에서 기존에 수행된 이산화탄소 지중 저장 용량 평가는 평균값과 상한 및 하한 등의 결정론적 수치를 도출해 내거나 저장 효율의 확률 분포를 일부 활용하여 특정한 확률의 값을 산정하여 왔다. 따라서 이산화탄소 지중 저장 용량에 대한 불확실성을 평가하기 위해서 확률론적 또는 추계론적 방법에 기반을 둔 이산화탄소 저장 용량 평가 연구가 필수적이다. 또한 퇴적분지 내 지층 특성과 지중 유체 환경의 공간적 분포가 종합적으로 고려되어야 하며, 자유 유체상뿐만 아니라 수용액상 이산화탄소 저장 용량 또한 평가되어야 한다.

본 연구의 목적은 확률론적 방법을 이용하여 국내 이산화탄소 지중 저장 유망 육상 퇴적분지 중 하나인 경상분지 내 하산동층(대상 지층)의 이산화탄소 지중 저장 용량을 예비적으로 평가하는 것이다. 이를 위하여 먼저 기존의 문헌들로부터 경상분지의 세 지역(북부, 중부 및 남부) 내 대상 지층의 지질학적 특성(두께 및 경사), 물성(공극률) 및 환경(심도별 지중 유체 압력 및 지온 경사)의 범위와 확률론적 분포를 선정하였다. 다음으로 대상 지층의 이산화탄소

지중 저장 용량 산정을 위하여 몬테카를로 시뮬레이션 기반의 확률론적 예비 평가 방법을 제안하였다. 마지막으로 이 방법을 이용하여 세 지역 내 대상 지층에 대해서 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 저장 밀도(지층의 단위 체적당 저장될 수 있는 이산화탄소 질량)와 잠재(이론) 저장 용량을 각각 산정하였다.

2. 연구 지역 개요

경상분지는 백악기 초기에 형성된 비해성(non-marine) 퇴적분지이며, 한국의 남동부에 분포하고 있다. 경상분지는 하부로부터 신동층군(Sindong Group), 하양층군(Hayang Group), 유천층군(Yucheon Group) 및 불국사 심성암류(Bulguksa Plutonic Rocks)로 구분된다(Chang, 1975; 그림 1). 신동층군은 그중에서 가장 하부의 층군으로서 경상분지의 서쪽 경계를 따라서 남북방향으로 길게 분포하며, 서쪽 경계에서는 하부의 선펜브리아기의 기반암을 부정합으로 피복하고 동쪽 경계에서는 상부의 하양층군과 정합적으로 접한다. 신동층군은 하부로부터 낙동층, 하산동층 및 진주층으로 구분된다(Chang, 1975). 그 중에서 약 1,000 m 두께의 하산동층은 하도 사암과 하도간 이암 및 실트암의 교호층 등의 하성 퇴적층으로 구성된다. 그리고 이러한 하산동층 상부에는 호상 이암과 호상 셰일 및 하도 사암 등의 호상 퇴적층으로 구성된 약 1,200 m 두께의 진주층이 위치한다. 이와 같이 하산동층과 진주층은 각각 이산화탄소 지중 저장을 위한 저장암(reservoir rock)과 덮개암(cap rock)으로 분류될 수 있는 퇴적학적인 특징을 가지고 있으며, 아울러 공간적으로 넓게 분포하고 지질 구조가 비교적 단순하기 때문에 한국의 육상 퇴적 지층 중에서 이산화탄소의 지중 저장에 가장 적합하다는 연구 결과가 제시된 바 있다(Kim, 2009). 또한 최근에는 하산동층의 일부 층군에서 채취된 사암 시료의 공극률이 8.0% 이상으로 분석됨(Kwon, 2011)에 따라서 이산화탄소 지중 저장 유망 지층으로 평가되고 있으며, 국내 이산화탄소 지중 저장 프로젝트의 주요 대상 지층으로 지목되고 있다. 따라서 본 연구에서는 경상분지 하산동층의 지질학적 특성을 고려하여 경상분지를 북부, 중부 및 남부의 세 지역으로 나누어 이 지역에 분포하는 하산동층의 이

산화탄소 지중 저장 용량의 확률론적 평가를 수행하였다. 북부 지역은 군위-의성 일대이고, 중부 지역

은 고령 일대이며, 남부 지역은 진주 일대이다(그림 1).

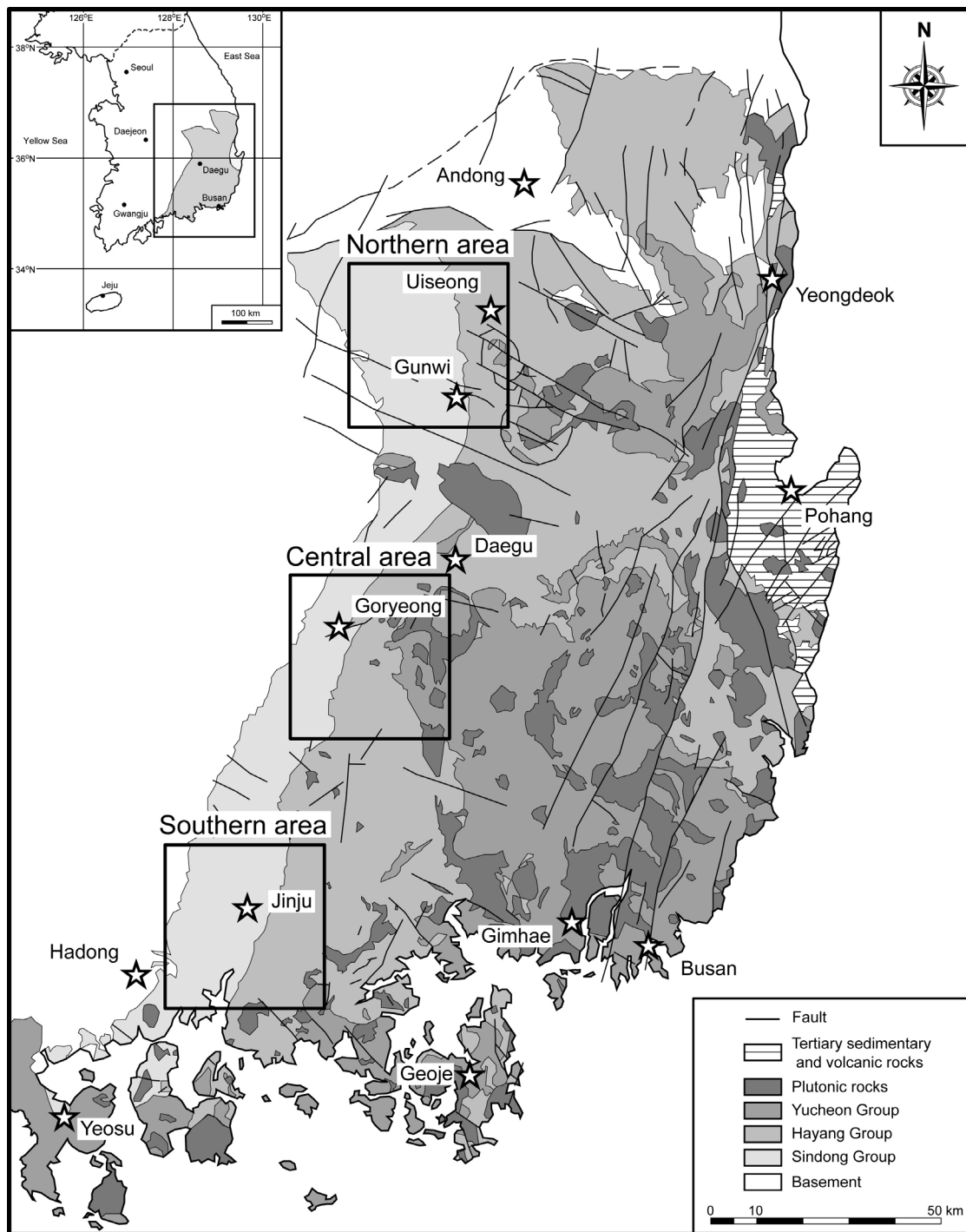


Fig. 1. Location and Geologic maps of the Gyeongsang Basin with locations of the three study areas. The geologic map is modified from Lee (2000).

Table 1. Basic statistical values of porosity of the Hasandong Formation.

Statistical value [%]	Northern area	Central area	Southern area	Total
Number of samples	14	11	19	44
Average	6.41	5.02	3.85	4.96
Standard deviation	2.61	2.93	2.59	2.85
Minimum	2.18	2.18	1.42	1.42
Maximum	9.90	10.55	9.37	10.55

Table 2. Basic statistical values of geothermal gradient around the Hasandong Formation.

Statistical value [°C/m]	Northern area	Central area	Southern area	Total
Number of samples	4	4	3	11
Average	0.02517	0.02610	0.02455	0.02534
Standard deviation	0.00298	0.00322	0.00318	0.00287
Minimum	0.02097	0.02152	0.02103	0.02097
Maximum	0.02789	0.02898	0.02723	0.02898

3. 기존 자료 분석

기존의 연구 결과들을 수집하여 경상분지 북부, 중부 및 남부 지역에 분포하는 하산동층의 두께, 경사, 공극률 및 지온 경사에 대한 기초 자료와 특성을 분석하였다. 먼저 하산동층의 두께 및 경사에 대한 기초 자료를 지역별로 각각 분석하였다. 하산동층의 두께와 경사는 지역에 따라서 편차가 존재하며, 평균적으로 약 1,000 m의 두께와 17.5°의 경사를 가진다. 북부 지역에서의 하산동층은 약 1,300 m의 두께를 가지며, 경사는 10~15° 내외이다(Chang *et al.*, 1981; Cheong *et al.*, 1989). 중부 지역에서의 하산동층은 약 640 m의 두께를 가지며, 경사는 25~30° 내외이다(Chang, 1968). 남부 지역에서 하산동층은 약 1,100 m의 두께를 가지며, 경사는 5~20° 내외이다(Choi *et al.*, 1964; Kim *et al.*, 1969). 다음으로 기존의 연구 결과들(Egawa *et al.*, 2009; Kim, 2009; Kwon, 2011; Kim, 2012)을 종합하여 하산동층의 공극률에 대한 기초 자료를 지역별로 각각 분석하고 그 결과를 표 1에 정리하였다. 하산동층 시료 전체의 공극률 평균값은 4.96%이며, 1.42~10.55%에 걸쳐서 넓게 분포한다. 하산동층의 공극률 평균값은 북부, 중부 및 남부 지역 순으로 크며, 공극률 표준 편차는 중부 지역에서 다른 두 지역에 비해서 상대적으로 더 크다. 마지막으로 기존의 연구 결과들(Kim and Lee, 2007; Lee *et al.*, 2010)을 이용하여 하산동층 및

주변 지층들의 지온 경사에 대한 특성을 지역별로 각각 분석하고 그 결과를 표 2에 정리하였다. 이렇게 분석된 지역별 하산동층의 두께, 경사, 공극률 및 지온 경사에 대한 통계값을 다음의 이산화탄소 지중 저장 용량의 확률론적 평가에 활용하였다.

4. 확률론적 이산화탄소 지중 저장 용량 평가 방법

4.1 이산화탄소 지중 저장 용량 평가 방법

앞에서 언급한 바와 같이 기존의 부피 기반의 이산화탄소 지중 저장 용량 평가 방법(NETL, 2007)의 한계와 단점을 극복하기 위하여 Kim (2011)과 Kihm *et al.* (2011)에 의해서 삼차원 지층 모델링 및 열-수리학적 수치 모델링을 연계한 이산화탄소 지중 저장 용량 평가 방법이 제시된 바 있다. 이 새로운 부피 기반의 이산화탄소 지중 저장 용량 평가 방법에서는 다음과 같이 퇴적분지 내 지층 특성과 지중 유체 환경의 공간적 분포를 격자 요소 단위로 고려하여 자유 유체상(free fluid phase)뿐만 아니라 수용액상(aqueous phase) 이산화탄소 잠재(이론) 저장 용량을 계산한다.

자유 유체상 이산화탄소 잠재 저장 용량은 대상 지층의 공극을 자유 유체상의 이산화탄소가 전부 채웠을 때의 이산화탄소 전체 질량, 즉 수리동역학적 포획될 수 있는 이산화탄소 최대 질량을 의미한다.

이를 계산할 때에는 대상 지층의 공극 부피(pore volume)와 지층 유체 환경(압력 및 온도) 하에서의 이산화탄소 밀도가 사용된다. 또한 수용액상 이산화탄소 잠재 저장 용량은 대상 지층의 공극 내의 지하수에 수용액상의 이산화탄소가 완전하게 포화되었을 때의 이산화탄소 전체 질량, 즉 용해 포획될 수 있는 이산화탄소의 최대 질량을 의미한다. 이를 계산할 때에는 대상 지층의 공극 부피와 지층 유체 환경(압력 및 온도) 하에서의 지하수 밀도 및 지하수에 용해된 이산화탄소 질량 분률(이산화탄소 용해도)이 사용된다. 여기에서 대상 지층의 공극 부피는 지층의 두께 및 경사에 의해 결정되는 지층의 부피와 공극률을 이용하여 계산된다. 이러한 부피 기반의 이산화탄소 지층 저장 용량 평가 방법은 대상 지층에 주입된 이산화탄소의 거동과 이에 따른 공간적 및 시간적 분포를 고려하기는 어렵지만 위와 같은 비교적 간단한 매개변수를 이용하여 이산화탄소 지층 저장 용량을 쉽게 계산할 수 있기 때문에 몬테카를로 시뮬레이션에 적합하다.

먼저 대상 지층 전체의 자유 유체상(수리동역학적 포획) 이산화탄소 잠재 저장 용량 M_{fpCO_2} (M)은 다음과 같이 계산된다.

$$M_{fpCO_2} = \sum_{i=1}^m M_{fpCO_2}^i = \sum_{i=1}^m V^i I_{fpCO_2}^i \quad (1)$$

여기에서 m 은 대상 지층 전체를 이산화한 전체 격자 요소(grid element)의 수, $M_{fpCO_2}^i$ 는 각 격자 요소의 자유 유체상 이산화탄소 잠재 저장 용량(M), V^i 는 각 격자 요소의 부피(L³), $I_{fpCO_2}^i$ 는 각 격자 요소의 자유 유체상 이산화탄소 저장 밀도 또는 단위 체적당 수리동역학적으로 포획될 수 있는 이산화탄소 질량(M/L³)이다. 또한 $I_{fpCO_2}^i$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$I_{fpCO_2}^i = n^i \rho_{CO_2}^i(P^i, T^i) \quad (2)$$

여기에서 n^i 는 각 격자 요소의 공극률, $\rho_{CO_2}^i$ 는 각 격자 요소의 이산화탄소 밀도(M/L³), P^i 는 각 격자 요소의 지층 유체 압력, T^i 는 각 격자 요소의 지층 유체 온도이다.

한편 대상 지층 전체의 수용액상(용해 포획) 이산화탄소 잠재 저장 용량 M_{apCO_2} (M)은 다음과 같이 계산된다.

$$M_{apCO_2} = \sum_{i=1}^m M_{apCO_2}^i = \sum_{i=1}^m V^i I_{apCO_2}^i \quad (3)$$

여기에서 $M_{apCO_2}^i$ 는 각 격자 요소의 수용액상 이산화탄소 잠재 저장 용량(M), $I_{apCO_2}^i$ 는 각 격자 요소의 수용액상 이산화탄소 저장 밀도 또는 단위 체적당 용해 포획될 수 있는 이산화탄소 질량(M/L³)이다. 또한 $I_{apCO_2}^i$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$I_{apCO_2}^i = n^i \rho_{gw}^i(P^i, T^i, X_s^i) X_{CO_2}^i(P^i, T^i, X_s^i) \quad (4)$$

여기에서 ρ_{gw}^i 는 각 격자 요소의 지하수 밀도(M/L³), $X_{CO_2}^i$ 는 각 요소의 지하수에 용해될 수 있는 이산화탄소 질량 분률 또는 이산화탄소 용해도(농도)(M/M), X_s^i 는 각 격자 요소의 지하수에 용해될 수 있는 염분 질량 분률 또는 염분 용해도(농도)(M/M)이다.

또한 식 (2) 및 식 (4)에 의해서 계산된 각 격자 요소의 자유 유체상 이산화탄소 저장 밀도 $I_{fpCO_2}^i$ 및 수용액상 이산화탄소 저장 밀도 $I_{apCO_2}^i$ 를 각 격자 요소의 부피로 가중 평균하면 대상 지층 전체의 자유 유체상 이산화탄소 저장 밀도 I_{fpCO_2} 및 수용액상 이산화탄소 저장 밀도 I_{apCO_2} 가 각각 다음과 같이 계산된다.

$$I_{fpCO_2} = \frac{\sum_{i=1}^m V^i I_{fpCO_2}^i}{\sum_{i=1}^m V^i} = \frac{\sum_{i=1}^m M_{fpCO_2}^i}{\sum_{i=1}^m V^i} = \frac{M_{fpCO_2}}{\sum_{i=1}^m V^i} \quad (5)$$

$$I_{apCO_2} = \frac{\sum_{i=1}^m V^i I_{apCO_2}^i}{\sum_{i=1}^m V^i} = \frac{\sum_{i=1}^m M_{apCO_2}^i}{\sum_{i=1}^m V^i} = \frac{M_{apCO_2}}{\sum_{i=1}^m V^i} \quad (6)$$

앞에서 언급한 바와 같이 하산동층(대상 지층)을 포함한 신동층군은 경상분지의 서쪽 경계를 따라서

남북방향으로 길게 분포하므로 다른 퇴적분지처럼 퇴적분지의 경계를 모두 포함하는 영역의 이산화탄소 지중 저장 용량을 평가하기 어려운 측면이 있다. 따라서 본 연구에서는 경상분지가 비교적 단순한 단사구조를 가진다는 점에 착안하여 대상 지층의 주향 방향에 수직인 단위 길이의 단면(그림 2)을 설정하고 이를 이용하여 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 잠재 저장 용량을 계산하였다. 이러한 계산은 일반적인 이산화탄소 지중 저장 대상 심도인 800~2,000 m 심도에 분포하는 대상 지층에 대해서만 다음 절차에 따라서 지역별로 각각 수행되었다.

- ① 대상 지층의 두께와 경사를 반영하여 800~2,000 m 심도에 분포하는 대상 지층을 평가 영역으로 설정
- ② 평가 영역을 m 개의 격자 요소로 이산화
- ③ 정수압 상태를 가정하여 각 격자 요소의 지중 유체 압력 산정
- ④ 지표 평균 온도를 15° 로 가정하고 지온 경사를 이용하여 각 격자 요소의 지중 유체 온도 산정
- ⑤ 기존의 연구 결과(Spycher and Pruess, 2005)를 이용하여 각 격자 요소의 지중 유체 압력과 온도에 해당하는 지중 유체 특성(이산화탄소 밀도, 지하수 밀도, 지하수에 용해된 이산화탄소 질량 분률) 계산
- ⑥ 식 (2) 및 식 (4)를 이용하여 각 격자 요소의 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 저장 밀도 계산
- ⑦ 식 (5) 및 식 (6)을 이용하여 대상 지층 평가 영역 전체의 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 저

장 밀도 계산

- ⑧ 식 (1) 및 식 (3)을 이용하여 대상 지층 평가 영역 전체의 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 잠재 저장 용량 계산

이렇게 계산된 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 잠재(이론) 저장 용량은 대상 지층의 주향 방향에 수직인 단위 길이의 단면(그림 2)에 대하여 계산된 값(M/L)이므로 주향 방향의 길이를 곱하면 해당 길이의 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 잠재(이론) 저장 용량(M)으로 환산된다.

4.2 몬테카를로 시뮬레이션

앞에서 계산된 이산화탄소 잠재(이론) 저장 용량에 대한 불확실성을 평가하기 위해서 통계학적 또는 추계론적 접근을 시도하였다. 이를 위하여 앞에서 언급한 경상분지 북부, 중부 및 남부 지역에 분포하는 하산동층(대상 지층)의 두께, 경사, 공극률 및 지온 경사에 대한 기초 자료와 특성 분석 결과를 이용하여 일련의 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)을 수행하였다. 먼저 대상 지층의 두께는 지역별로 하나의 대표값을 설정하였으며, 경사는 지역별로 하한과 상한을 반영한 균등분포(uniform distribution)를 따르는 것으로 설정하였다. 다음으로 대상 지층의 공극률은 지역별로 평균, 표준 편차 및 하한과 상한을 반영한 절단정규분포(truncated normal distribution)를 따르는 것으로 설정하였다. 마지막으로 대상 지층의 지온 경사는 지역별로 평

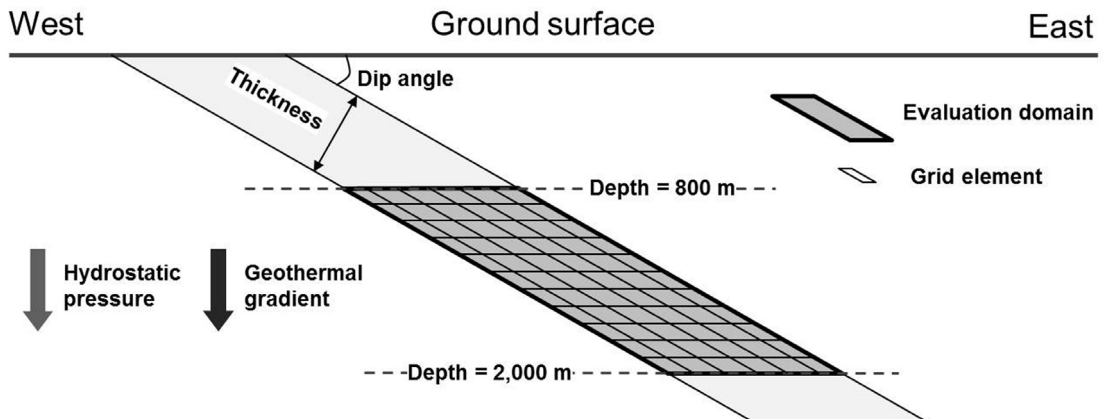


Fig. 2. Schematic diagram and evaluation domain of the Hasandong Formation in the Gyeongsang Basin for Monte Carlo simulation.

Table 3. Statistical values of storage density of free phase CO₂ (mass of CO₂ stored by hydrodynamic trapping per unit volume) for the Hasandong Formation.

Statistical value [kg/m ³]	Northern area	Central area	Southern area
Average	40.90	36.10	29.90
Standard deviation	21.60	13.30	12.40
Minimum	13.20	12.50	8.68
P ₁₀ (10th percentile)	23.30	18.90	14.20
P ₂₅ (1st quartile)	31.40	25.60	20.10
P ₅₀ (median)	41.00	35.00	28.60
P ₇₅ (3rd quartile)	50.60	45.50	38.50
P ₉₀ (90th percentile)	57.90	55.00	47.40
Maximum	70.20	74.40	66.00

Table 4. Statistical values of storage density of aqueous CO₂ (mass of CO₂ stored by solubility trapping per unit volume) for the Hasandong Formation.

Statistical value [kg/m ³]	Northern area	Central area	Southern area
Average	2.83	2.54	2.05
Standard deviation	0.86	0.92	0.85
Minimum	0.97	0.94	0.63
P ₁₀ (10th percentile)	1.62	1.34	0.98
P ₂₅ (1st quartile)	2.18	1.81	1.38
P ₅₀ (median)	2.84	2.46	1.97
P ₇₅ (3rd quartile)	3.50	3.21	2.65
P ₉₀ (90th percentile)	3.99	3.86	3.26
Maximum	4.63	4.92	4.36

균, 표준 편차 및 하한과 상한을 반영한 절단정규분포를 따르는 것으로 설정하였다. 몬테카를로 시뮬레이션에서 안정화된 해를 구하기 위하여 재현 회수는 10,000번으로 하였으며, 라틴 하이퍼큐브 샘플링(Latin Hypercube Sampling) 기법(McKay *et al.*, 1979)을 활용하였다. 각각의 재현 회수마다 대상 지층의 경사가 산출되어 평가 영역을 구성하였고, 공극률이 산출되어 대표 공극률로 사용하였으며, 지온 경사가 산출되어 지온 분포를 산정하였다.

5. 확률론적 이산화탄소 지중 저장 용량 평가 결과

5.1 이산화탄소 저장 밀도

몬테카를로 시뮬레이션에 의해 산정된 대상 지층 평가 영역 전체의 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 저장 밀도의 확률론적 분포가 그림 3의 좌우에

각각 도시되어 있고 이들의 통계값이 표 3과 표 4에 각각 정리되어 있다.

이산화탄소 저장 밀도는 단위 체적의 저장암에 포획 및 저장될 수 있는 이산화탄소의 질량을 의미한다. 즉 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 저장 밀도는 각각 단위 체적당 수리동역학적 포획 및 용해 포획될 수 있는 이산화탄소 질량에 대응된다. 이러한 이산화탄소 저장 밀도는 분지의 면적이나 부피에 대해 독립적이므로 이산화탄소 지중 저장 대상 지층의 저장 성능을 대변하는 지표로 활용될 수 있다. 즉 공간적으로 충분한 수의 기초 자료(지질학적 특성, 물성 및 환경)에 근거하여 이산화탄소 저장 밀도를 산정하면 이들이 각 지점의 이산화탄소 저장 성능을 대표하기 때문에 등고선과 같이 직관적인 형태의 그림으로 표현이 가능하다. 이것은 이산화탄소 지중 저장 부지 선정 평가 시에 직접적으로 활용될 수 있다.

자유 유체상 이산화탄소 저장 밀도는 북부, 중부

및 남부 순으로 크며, 수용액상 이산화탄소 저장 밀도 역시 같은 순서로 나타난다(그림 3; 표 3, 4). 이것은 공극률의 지역별 특성과 같은 경향을 보여주며(표 1), 따라서 공극률이 두 값에 대하여 큰 영향을 끼치는 것으로 해석된다. 또한 자유 유체상 이산화탄소 저장 밀도는 수용액상 이산화탄소 저장 밀도에 대해서 약 14배 크게 나타난다. NETL (2007)이 제

시한 이산화탄소 저장 용량 평가 방법에 따르면 수용액상 이산화탄소 저장 용량은 자유 유체상 이산화탄소 저장 용량에 변환 요소(conversion factor)를 나누어 산정할 수 있으며, 이때 변환 요소는 대상 지역의 지중 유체 압력과 온도 및 염분 농도 등에 좌우되므로 이를 GIS등을 통해 그 공간적인 분포 특성을 엄밀하게 고려해야 함을 언급한 바 있다. 본 연구에

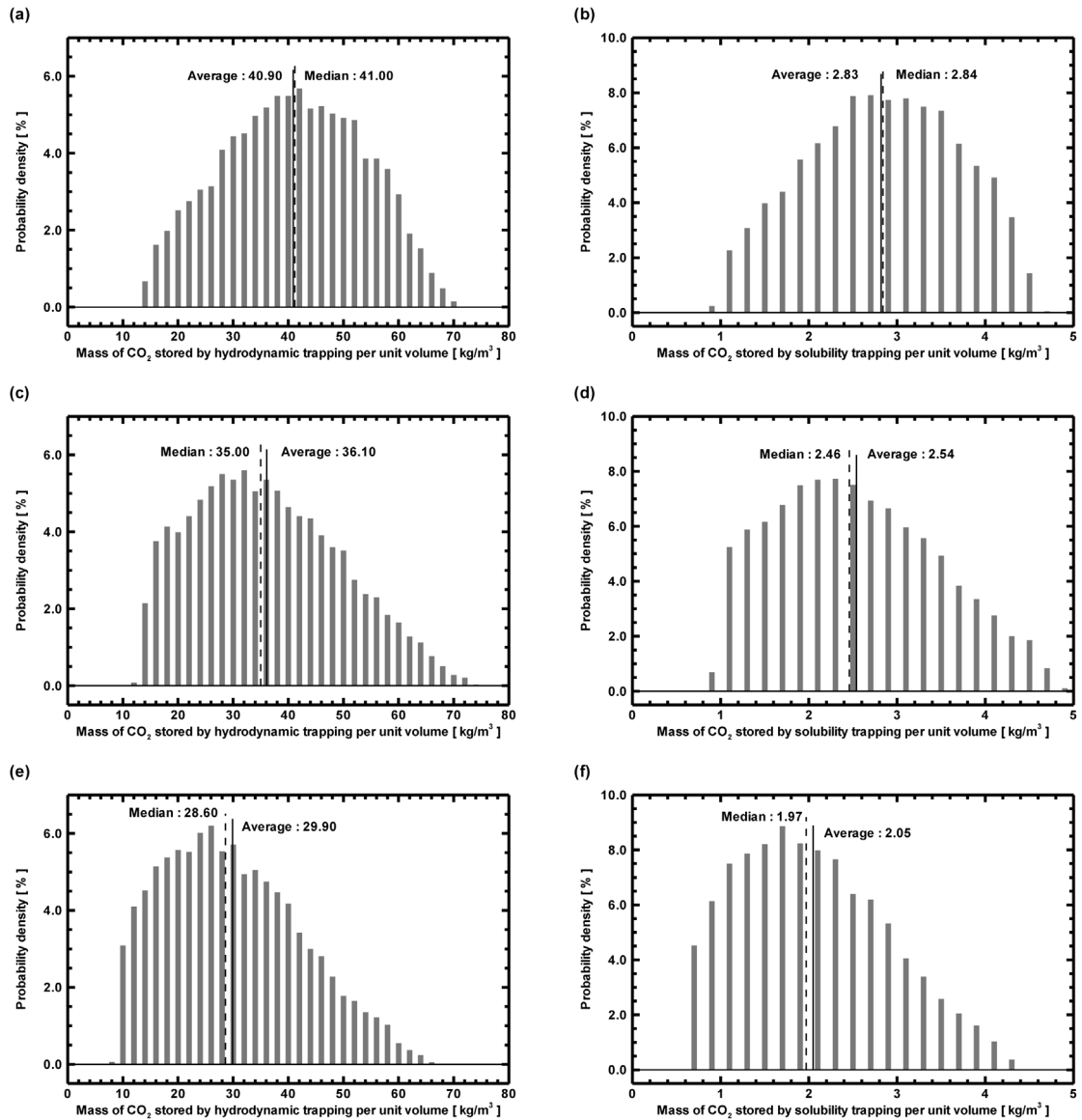


Fig. 3. Probability density distributions of storage density of free phase CO₂ (left column) and storage density of aqueous CO₂ (right column) for the Hasandong Formation in (a) and (b) the northern area, (c) and (d) the central area, and (e) and (f) the southern area of the Gyeongsang Basin.

Table 5. Statistical values of theoretical storage capacity of free phase CO₂ for the Hasandong Formation.

Statistical value [Mton/km]	Northern area	Central area	Southern area
Average	299.00	60.30	210.00
Standard deviation	99.10	22.40	127.00
Minimum	86.50	19.80	35.10
P ₁₀ (10th percentile)	167.00	31.70	81.70
P ₂₅ (1st quartile)	224.00	42.70	120.00
P ₅₀ (median)	297.00	58.10	179.00
P ₇₅ (3rd quartile)	369.00	75.90	265.00
P ₉₀ (90th percentile)	432.00	91.60	379.00
Maximum	608.00	130.00	908.00

Table 6. Statistical values of theoretical storage capacity of aqueous CO₂ for the Hasandong Formation.

Statistical value [Mton/km]	Northern area	Central area	Southern area
Average	20.60	4.24	14.40
Standard deviation	6.77	1.55	8.69
Minimum	6.19	1.49	2.49
P ₁₀ (10th percentile)	11.60	2.24	5.62
P ₂₅ (1st quartile)	15.50	3.01	8.24
P ₅₀ (median)	20.50	4.08	12.30
P ₇₅ (3rd quartile)	25.50	5.34	18.10
P ₉₀ (90th percentile)	29.70	6.44	26.10
Maximum	40.10	8.67	60.2

서 계산된 값(약 14배)은 바로 이러한 지역적 또는 공간적인 특성을 종합적으로 고려한 것으로 국내 퇴적분지에 대한 이산화탄소 지중 저장 용량 평가 시에 중요한 연구 사례로써 활용될 수 있다.

북부 지역에서는 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 저장 밀도의 분포가 대칭을 유지하고 정규 분포에 가깝게 나타나며, 양 끝에서 빈도수가 감소하는 절단정규분포의 형태를 잘 보여준다(그림 3a, 3b). 이것은 북부 지역의 공극률이 다른 두 지역의 값들에 비해서 상대적으로 더 대칭에 가깝게 분포하기 때문이다. 또한 공극률 및 지온 경사를 절단정규분포를 따르는 것으로 고려하였기 때문에 상한과 하한에서 그 빈도수가 급격히 감소하는 양상이 나타나는 것으로 해석된다. 이와는 다르게 중부 및 남부 지역에서는 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 저장 밀도의 분포가 왼쪽으로 치우치고 왼쪽이 절단된 정규분포(left-truncated normal distribution)에 가깝게 나타난다(그림 3c, 3d, 3e, 3f). 이것은 북부 지역에서 공극률이 대칭에 가깝게 분포하는 것과는

다르게 중부 및 남부지역에서는 공극률이 하한쪽으로 즉 왼쪽으로 치우친 분포를 가지기 때문이다.

5.2 이산화탄소 잠재 저장 용량

몬테카를로 시뮬레이션에 의해 산정된 대상 지층 평가 영역 전체의 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 잠재(이론) 저장 용량의 확률론적 분포가 그림 4의 좌우에 각각 도시되어 있고 이들의 통계값이 표 5와 표 6에 각각 정리되어 있다.

앞에서 언급한 바와 같이 자유 유체상 이산화탄소 잠재 저장 용량은 수리동역학적 포획될 수 있는 이산화탄소 최대 질량을 의미하며, 수용액상 이산화탄소 잠재 저장 용량은 용해 포획될 수 있는 이산화탄소의 최대 질량을 의미한다. 일반적으로 대상 지층에 주입된 자유 유체상 이산화탄소는 부력에 의해 상부로 이동하는 반면 수용액상 이산화탄소는 지하수의 밀도를 증가시켜서 점성 운지(viscous fingering) 형태로 하부로 이동한다. 즉 이산화탄소 지중 저장의 안정성 또는 누출 위험성을 고려할 때 주입된 이산화

탄소가 자유 유체상보다는 수용액상으로 존재하는 것이 바람직하며, 따라서 수용액상 이산화탄소 잠재 저장 용량은 안정적으로 저장될 수 있는 이산화탄소의 총량을 지시하기 때문에 중요한 의미를 가진다.

자유 유체상 이산화탄소 잠재 저장 용량은 북부, 남부 및 중부 순으로 크며, 수용액상 이산화탄소 잠재 저장 용량 역시 같은 순서로 나타난다(그림 4; 표 5, 6).

특히 이산화탄소 저장 밀도와는 다르게 중부 지역에서의 이산화탄소 잠재 저장 용량이 다른 두 지역에 비해서 상대적으로 더 작다. 이것은 중부 지역에서의 대상 지층이 얇고 경사가 급하여 800~2,000 m 심도에 해당하는 대상 지층의 부피가 다른 두 지역에 비해서 상대적으로 더 작기 때문이다. 즉 이산화탄소 잠재 저장 용량은 저장 대상 지층의 부피를 결정하

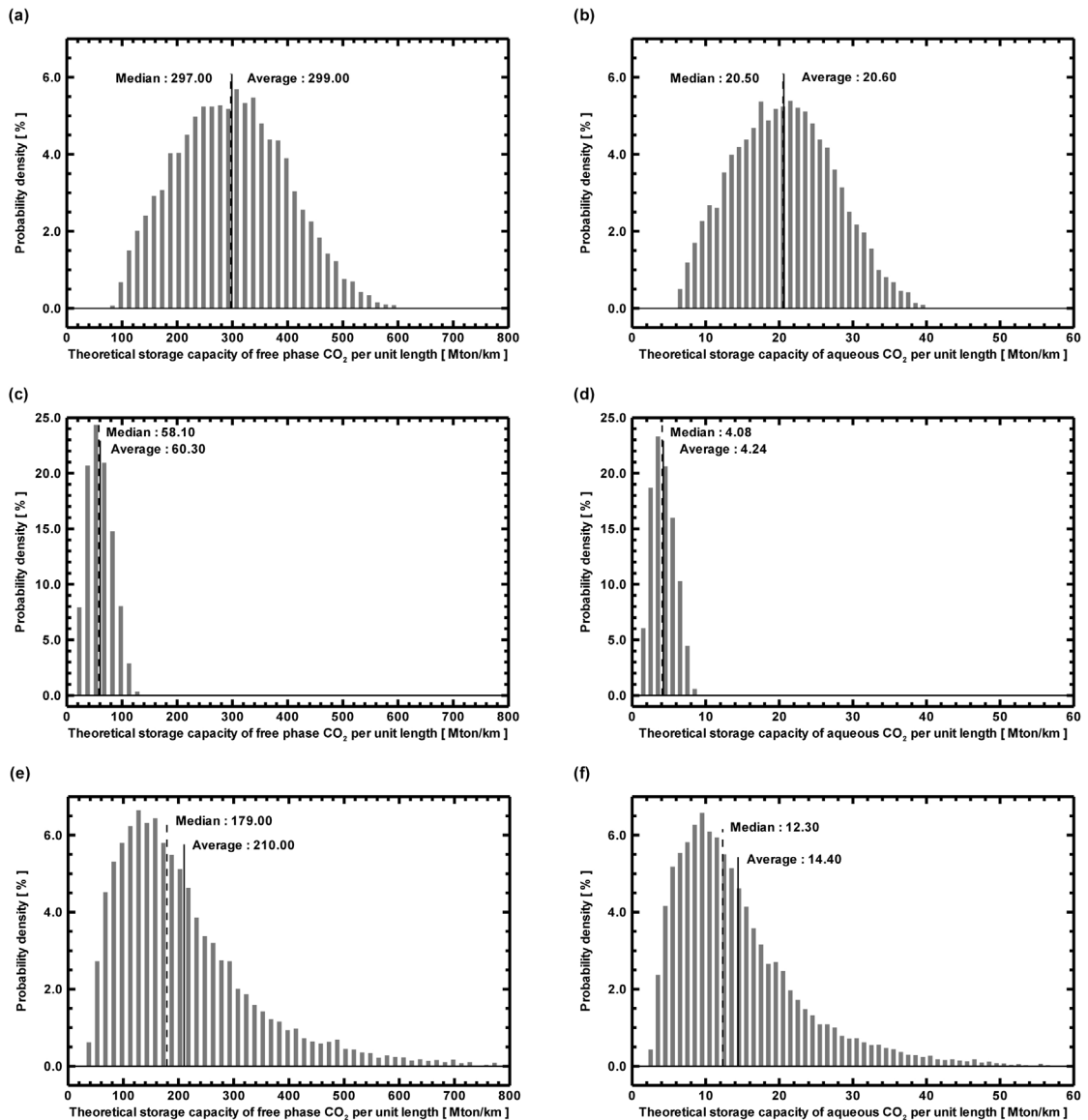


Fig. 4. Probability density distributions of theoretical storage capacity of free phase CO₂ (left column) and theoretical storage capacity of aqueous CO₂ (right column) for the Hasandong Formation in (a) and (b) the northern area, (c) and (d) the central area, and (e) and (f) the southern area of the Gyeongsang Basin.

는 지층의 두께와 경사에 더 민감함을 보여준다.

북부 지역에서는 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 잠재 저장 용량의 분포가 정규분포에 가깝게 나타난다(그림 4a, 4b). 그리고 중부 지역에서는 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 잠재 저장 용량의 분포가 왼쪽이 절단된 정규분포에 가깝게 나타난다(그림 4c, 4d). 북부와 중부 지역에서는 각각의 이산화탄소 잠재 저장 용량의 분포가 이산화탄소 저장 밀도의 분포와 거의 유사하게 나타난다. 이외는 다르게 남부 지역에서는 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 잠재 저장 용량의 분포가 급격히 왼쪽으로 치우치고 상한값의 분포가 오른쪽으로 길게 늘어져서 대수정규분포(log-normal distribution)에 가깝게 나타난다(그림 4e, 4f). 이것은 북부와 중부 지역에서는 지층 경사의 변화폭이 5° 이지만 남부 지역에서는 15°로 저장 대상 지층의 부피의 변화량이 크기 때문에 남부 지역에서 더 넓은 범위를 가지는 분포가 나타나는 것으로 판단된다.

이산화탄소 저장 밀도와 마찬가지로 자유 유체상 이산화탄소 잠재 저장 용량 역시 수용액상 이산화탄소 잠재 저장 용량의 약 14배로 계산된다. 이것은 앞 절에서 언급한 바와 같이 경상분지 지역의 지층 유체 압력과 온도 및 염분 농도 등의 특성들이 종합적으로 고려된 일종의 변환요소이다.

한편 이산화탄소 잠재 저장 용량에 대한 일련의 민감도 분석을 수행하고 이를 tornado diagram에 도시하였다(그림 5). 이 도표는 몬테카를로 시뮬레이션에서 각 요소들에 대한 결과값의 민감도를 막대(bar)로 보여주며, 일반적으로 채워진 막대(shaded bar)는 해당 요소와 결과값 간의 양의 상관관계를, 비워진 막대(blank bar)는 해당 요소와 결과값 간의 음의 상관관계를 각각 보여준다. 하나의 요소에 대한 민감도를 분석할 때에는 다른 모든 요소들에 대해서는 각각의 중앙값(median)을 이용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하며, 그 결과들의 하한과 상한을 중앙값으로부터 막대로 표현한다. 따라서 막대의 크기가 클수록 또는 중앙값으로부터 거리가 멀어질수록 결과값이 해당 요소에 대하여 더 민감함을 지시한다. 본 연구에서는 지층 경사(Factor A), 공극률(Factor B) 및 지온 경사(Factor C)를 민감도 분석의 대상으로 하였다.

공극률은 다른 두 요소에 비해서 모든 지역에서

자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 잠재 저장 용량에 상대적으로 가장 큰 영향을 끼치며, 지온 경사는 다른 두 요소에 비해서 모든 지역에서 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 잠재 저장 용량에 상대적으로 가장 작은 영향을 끼치는 것으로 나타난다(그림 5). 공극률(Factor B)이 증가할수록 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 잠재 저장 용량 모두가 증가하는 양의 상관관계가 나타난다. 공극률의 변화에 따른 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 잠재 저장 용량의 변화 양상은 북부 지역(그림 5a, 5b)에서는 중앙값이 우측으로, 중부 지역(그림 5c, 5d) 및 남부 지역(그림 5e, 5f)에서는 중앙값이 좌측으로 치우쳐서 나타나며, 이는 표 1에 정리되어 있는 공극률의 지역별 분포와 같은 경향을 보여준다. 이것은 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 잠재 저장 용량 모두가 공극률에 대하여 선형적인 비례 관계를 가짐을 의미한다. 한편 지층 경사(Factor A)가 증가할수록 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 잠재 저장 용량 모두가 감소하는 음의 상관관계가 나타난다. 지층 경사가 감소할수록 이산화탄소 지층 저장 대상 심도의 지층 부피는 증가하므로 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 잠재 저장 용량은 증가하며, 지층 경사가 감소할수록 지층 부피의 증가량 역시 증가하므로 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 잠재 저장 용량의 분포가 중앙값을 중심으로 오른쪽으로 더 길게 나타난다. 또한 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 잠재 저장 용량에 대한 지층 경사의 영향 정도는 북부 및 중부 지역에 비해서 남부 지역에서 크게 나타나며, 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 지층 경사의 변화폭이 남부 지역에서 가장 크기 때문이다. 또한 지온 경사(Factor C)가 증가할수록 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 잠재 저장 용량 모두가 감소하는 음의 상관관계가 나타난다. 이것은 지온 경사가 증가하여 해당 지층의 지온이 증가하면 이산화탄소 밀도와 지하수에 대한 이산화탄소 용해도 모두가 감소하기 때문에 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 잠재 저장 용량 모두가 감소하는 것으로 판단된다.

본 연구에서 사용된 부피 기반의 이산화탄소 지층 저장 용량 평가 방법은 앞에서 언급한 바와 같이 계산 과정이 간단하기 때문에 몬테카를로 시뮬레이션을 적용하기 쉽다는 장점이 있는 반면에 대상 지

층에 주입된 이산화탄소의 거동과 이에 따른 공간적 및 시간적 분포를 고려하기 어렵다는 단점이 있다. 이러한 단점들을 극복하기 위하여 다양한 조건에서 수행된 이산화탄소 거동 수치 모델링 결과를 종합적으로 분석하고 이를 저장 효율에 포함하여 산정하는 연구들이 진행된 바 있다(Gorecki *et al.*, 2009; NETL, 2010). 즉 이산화탄소 잠재 저장 용량에 이렇게 산정된 저장 효율(예, 1~4%; NETL, 2007)을 곱하여 이산화탄소 유효 저장 용량을 제시함으로써 주입된 이산화탄소의 거동과 분포의 영향을 합리적으로 고려하는 것이다. 이러한 저장 효율이 여러 연구자들에 의해서 제안된 바 있으나(NETL, 2007; Gorecki *et al.*,

2009; Kopp *et al.*, 2009a, 2009b; NETL, 2010) 연구자에 따라서 넓은 범위 내에서 각각 서로 다른 값을 제시하였기 때문에 본 연구에서는 어느 특정한 값을 사용하여 이산화탄소 유효 저장 용량을 평가하는 대신에 저장 효율을 고려하기 이전의 이산화탄소 잠재 저장 용량만을 평가하여 제시하였다. 따라서 본 연구에서 제시된 이산화탄소 잠재 저장 용량을 활용 또는 적용 시에 이러한 제한성을 고려하여야 한다. 또한 향후 경상분지의 수리지질학적 특성을 종합적으로 반영할 수 있는 저장 효율값을 산정하는 연구와 이를 확률론적 이산화탄소 유효 저장 용량 평가 방법에 적용하는 연구들이 추가적으로 수행되어야 한다.

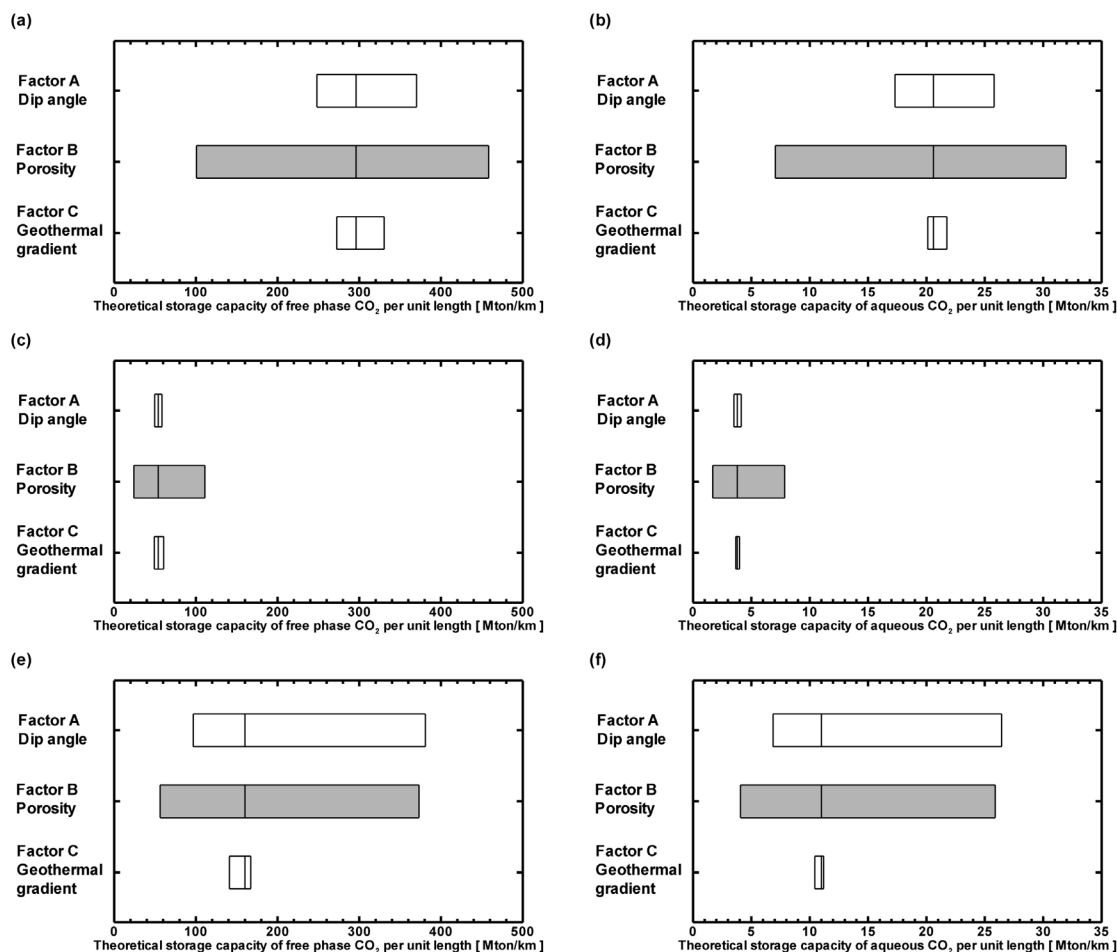


Fig. 5. Tornado diagrams of theoretical storage capacity of free phase CO₂ (left column) and theoretical storage capacity of aqueous CO₂ (right column) for the Hasandong Formation in (a) and (b) the northern area, (c) and (d) the central area, and (e) and (f) the southern area of the Gyeongsang Basin. The shaded bars indicate positive relationships, and the blank bars indicate negative relationships between factors and theoretical storage capacity values.

6. 결 론

본 연구에서는 확률론적 방법을 이용하여 국내 이산화탄소 지중 저장 유망 육상 퇴적분지 중 하나인 경상분지 내 하산동층(대상 지층)의 이산화탄소 지중 저장 용량을 예비적으로 평가하였다. 국내에서 기존에 수행된 이산화탄소 지중 저장 용량 평가는 평균값과 상한 및 하한 등의 결정론적 수치를 도출해 내거나 저장 효율의 확률 분포를 일부 활용하여 특정한 확률의 값을 산정하여 왔다. 반면에 본 연구에서는 이산화탄소 지중 저장 용량에 대한 불확실성을 평가할 수 있도록 확률론적 또는 추계론적 방법에 기반을 둔 이산화탄소 저장 용량 평가 방법을 제시하고 이를 경상분지 내 하산동층에 적용하였다. 먼저 기존의 문헌들로부터 경상분지의 세 지역(북부, 중부 및 남부) 내 대상 지층의 지질학적 특성(두께 및 경사), 물성(공극률) 및 환경(심도별 지중 유체 압력 및 지온 경사)의 범위와 확률론적 분포를 선정하였다. 다음으로 대상 지층의 이산화탄소 지중 저장 용량 산정을 위하여 몬테카를로 시뮬레이션 기반의 확률론적 예비 평가 방법을 제안하였다. 마지막으로 이 방법을 이용하여 세 지역 내 대상 지층에 대해서 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 저장 밀도(지층의 단위 체적당 저장될 수 있는 이산화탄소 질량)와 잠재(이론) 저장 용량을 각각 산정하였다. 여기에서 이산화탄소 잠재 저장 용량은 지역별 특성과 영향을 합리적으로 고려할 수 있도록 주향 방향의 단위 길이 당 저장 용량(Mton/km)으로 제시하였다. 평가 결과 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 저장 밀도는 북부, 중부 및 남부 지역 순으로 크다. 이러한 경향은 세 지역 내 대상 지층의 공극률 특성과 유사한데 이는 공극률이 이산화탄소 저장 밀도에 가장 큰 영향을 끼침을 지시한다. 한편 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소 잠재 저장 용량은 북부, 남부 및 중부 지역 순으로 크다. 특히 중부 지역에서의 이산화탄소 잠재 저장 용량이 다른 두 지역에 비해서 상대적으로 더 작다. 이는 중부 지역에서의 대상 지층이 얇고 경사가 급하여 이산화탄소 지중 저장 대상 심도에 분포하는 대상 지층의 부피가 다른 두 지역에 비해서 상대적으로 더 작기 때문이다. 산정된 이산화탄소 잠재 저장 용량은 왼쪽이 절단된 정규분포 내지 대수정규분포를 따르는 것으로 나타

났다. 본 연구에서는 대상 지층의 지질학적 특성, 물성 및 환경의 범위와 확률론적 분포를 종합적으로 고려하는 확률론적 예비 평가 방법을 제시하고 이를 이용하여 경상분지 하산동층의 이산화탄소 지중 저장 용량에 대한 예비 평가를 수행하였다. 이러한 예비 평가 방법 및 결과들은 향후 예상되는 국내 이산화탄소 지중 저장 프로젝트에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 하지만 지금까지 국내에서는 이산화탄소 지중 저장 대상 퇴적분지 및 지층에 대한 분석 및 축적된 자료가 매우 부족하기 때문에 본 연구에서 제시한 확률론적 이산화탄소 지중 저장 용량 평가 방법과 결과들을 실제 대상 분지 또는 부지에 적용할 때에 신뢰성 등의 한계점을 가진다. 따라서 국내 이산화탄소 지중 저장 유망 퇴적분지 및 지층의 이산화탄소 지중 저장 용량을 정확하게 평가하기 위해서는 이러한 기본 자료들을 분석 및 축적하는 선행 연구들의 수행이 무엇보다도 절실하게 필요하다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부 산하 한국에너지기술평가원의 에너지자원융합원천기술개발사업 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 본 연구는 또한 부분적으로 미래창조과학부 산하 한국연구재단의 Brain Korea 21 사업 지원에 의해 수행되었습니다. 아울러 본 논문의 심사 과정에서 발전적인 조언과 비판을 해주신 왕수균 교수님과 익명의 심사자님께 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Bachu, S., Bonijoly, D., Bradshaw, J., Burruss, R., Holloway S., Christensen, N.P. and Mathiassen, O.M., 2007, CO₂ storage capacity estimation: Methodology and gaps. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 1, 430-443.
- Bradshaw, J., Bachu, S., Bonijoly, D., Burruss, R., Holloway S., Christensen, N.P. and Mathiassen, O.M., 2007, CO₂ storage capacity estimation: Issues and development of standards. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 1, 62-68.
- Chang, K.H., 1968, Geological report of the Habcheon sheet (1:50,000). Geological Survey of Korea, 21 p (in

- Korean with English abstract).
- Chang, K.H., 1975, Cretaceous stratigraphy of Southeast Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 11, 1-23.
- Chang, K.H., Lee, Y.J. and Park, B.G., 1981, Geological report of the Gunwi sheet (1:50,000). Geological Survey of Korea, 20 p (in Korean with English abstract).
- Cheong, C.H., Koh, I.S., Kim, S.W. and Kim, H.M., 1989, Geological report of the Sönsan sheet (1:50,000). Korea Institute of Energy and Resources, 26 p (in Korean with English abstract).
- Choi, Y., Cheong, C.H., Lee, D.S., Kim, S.W. and Kim, S.J., 1964, Geological report of the Danseong sheet (1:50,000). Kyeongsangnamdo, 28 p (in Korean with English abstract).
- CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum), 2005, A taskforce for review and development of standards with regards to storage capacity measurement. Technical Report CSLF-T-2005-915, Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF), Washington, DC, USA, 16 p.
- Egawa, K., Hong, S.K., Lee, H., Choi, T., Lee, M.K., Kang, J.G., Yoo, K.C., Kim, J.C., Lee, Y.I., Kihm, J.H. and Kim, J.M., 2009, Preliminary evaluation of geological storage capacity of carbon dioxide in sandstones of the Sindong Group, Gyeongsang Basin (Cretaceous). *Journal of the Geological Society of Korea*, 45, 463-472 (in Korean with English abstract).
- Gorecki, C.D., Sorensen, J.A., Bremer, J.M., Knudsen, D.J., Smith, S.A., Steadman, E.N. and Harju, J.A., 2009, Development of storage coefficients for determining the effective CO₂ storage resource in deep saline formations. In: 2009 SPE International Conference on CO₂ Capture, Storage, and Utilization, San Diego, California, USA, November 2-4, SPE 126444, 35 p.
- Hong, S.K., Lee, H., Egawa, K., Choi, T., Lee, M.K., Yoo, K.C., Kihm, J.H., Lee, Y.I. and Kim, J.M., 2009, Preliminary evaluation for carbon dioxide storage capacity of the Chungnam, Taebaksan, Mungyeong and Honam basins. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45, 449-462 (in Korean with English abstract).
- Kaldi, J.G. and Gibson-Poole, C.M. (eds.), 2008, Storage capacity estimation, site selection and characterization for CO₂ storage projects. CO₂CRC Report RPT08-1001, Cooperative Research Centre for Greenhouse Gas Technologies (CO₂CRC), Canberra, Australia, 52 p.
- Kihm, J.H., Park, S.U. and Kim, J.M., 2011, A new method for evaluating geologic carbon dioxide storage capacity: Case study of the Bukpyeong Basin. Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstracts), Jeju, October 26-29, 367 p (in Korean).
- Kim, H.C. and Lee, Y., 2007, Heat flow in the Republic of Korea. *Journal of Geophysical Research*, 112, B05413.
- Kim, J.M., 2009, Development and field validation of characterization, drilling, injection, and prediction technologies for geologic sequestration of carbon dioxide. Annual Report 16-2008-08-001-00, Seoul National University, Seoul, Korea, 128 p (in Korean with English summary).
- Kim, J.M., 2011, Integrated prediction and analysis of performance of target geologic formation systems for geologic storage of carbon dioxide. Annual Report 201020102001A-1, Seoul National University, Seoul, Korea, 72 p (in Korean).
- Kim, J.M., 2012, Integrated prediction and analysis of performance of target geologic formation systems for geologic storage of carbon dioxide. Annual Report 201020102001A-2, Seoul National University, Seoul, Korea, 54 p (in Korean).
- Kim, O.J., Yoon, S. and Gil, Y.J., 1969, Geological report of the Jinju sheet (1:50,000). Geological Survey of Korea, 11 p (in Korean with English abstract).
- Kim, Y., Lee, K., Jo, S., Kim, M., Kim, J.S. and Park, M.H., 2012, A preliminary evaluation on CO₂ storage capacity of the southwestern part of Ulleung Basin, offshore, East Sea. *Economic and Environmental Geology*, 45, 41-48 (in Korean with English abstract).
- Kopp, A., Class, H. and Helmig, R., 2009a, Investigations on CO₂ storage capacity in saline aquifers, Part 1. Dimensional analysis of flow processes and reservoir characteristics. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 3, 263-276.
- Kopp, A., Class, H. and Helmig, R., 2009b, Investigations on CO₂ storage capacity in saline aquifers, Part 2. Estimation of storage capacity coefficients. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 3, 277-287.
- Kwon, Y.K., 2011, Evaluation of porosity distribution characteristics of sandstone in sedimentary rocks, Gyeongsang Basin for geologic storage of carbon dioxide. Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstracts), Jeju, October 26-29, 107 p (in Korean).
- Lee, J.I., 2000, Provenance and thermal maturity of the lower Cretaceous Gyeongsang Supergroup, Korea. Ph.D. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, 129 p.
- Lee, Y., Park, S., Kim, J., Kim, H.C. and Koo, M.H., 2010, Geothermal resource assessment in Korea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2392-2400.
- McKay, M.D., Beckman, R.J. and Conover, W.J., 1979, A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, 21, 239-245.

NETL (National Energy Technology Laboratory), 2007, Carbon sequestration atlas of the United States and Canada. National Energy Technology Laboratory (NETL), Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 86 p.

NETL (National Energy Technology Laboratory), 2010, Carbon sequestration atlas of the United States and Canada, third edition. National Energy Technology Laboratory (NETL), Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 160 p.

Spycher, N. and Pruess, K., 2005, CO₂-H₂O mixtures in the geological sequestration of CO₂, II. Partitioning in chloride brines at 12-100°C and up to 600 bar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69, 3309-3320.

투 고 일 : 2013년 5월 6일

심 사 일 : 2013년 5월 7일

심사완료일 : 2013년 6월 17일