

한국 북평분지 내 대상 지층에 주입된 이산화탄소의 거동 예측 및 분석

김중휘¹ · 김준모^{2,*}

¹중원대학교 자원순환환경공학과

²서울대학교 지구환경과학부

요 약

국내 이산화탄소 지중 저장 유망 연안 퇴적분지 중 하나인 북평분지 내의 대상 지층에 주입된 이산화탄소의 거동을 예측 및 분석하기 위하여 일련의 열-수리학적 수치 모델링을 수행하였다. 두 지역에 대한 수치 모델링 결과들은 대상 지층에 주입된 이산화탄소의 삼차원 거동 양상이 지층의 구조(층상 구조) 및 공간적 분포와 수리학적 물성(고유투수계수의 이방성 등)의 영향을 크게 받음을 보여준다. 먼저 저장암인 C-4층의 공간적 분포를 따르는 수평 방향으로의 이산화탄소 이동이 수직 방향으로의 이동에 비해서 우세하게 나타난다. 또한 이산화탄소 주입량이 증가할수록 이산화탄소의 영향 범위가 증가하며, 해수면 기준으로 좀 더 심도가 얇은 곳까지 이산화탄소가 이동한다. 두 지역 모두 이산화탄소를 최대로 주입하는 경우에도 모델링 영역의 상부(해저면)로의 이산화탄소 누출은 발생하지 않는다. 이는 각 지역별로 선행 연구 결과에서 제시된 자유 유체상의 이산화탄소 유효 저장 용량까지는 이산화탄소 지중 저장이 가능함을 의미한다. 한편 시간이 지남에 따라서 수리동역학적 포획된 이산화탄소는 감소하고 용해 포획된 이산화탄소는 증가한다. 수치 모델링에서 산정된 용해 포획된 이산화탄소의 질량은 선행 연구 결과에서 제시된 수용액상의 이산화탄소 유효 저장 용량에 비해 매우 큰 값을 보여준다. 이것은 수용액상 이산화탄소의 저장 효율이 자유 유체상 이산화탄소 저장 효율에 비해서 더 높음을 의미한다. 따라서 분지 및 부지 규모의 이산화탄소 유효 저장 용량 평가 시에는 이러한 이산화탄소 상에 따른 저장 효율의 차이가 반드시 고려되어야 한다.

주요어: 북평분지, 이산화탄소 지중 저장, 이산화탄소 주입, 거동 예측 및 분석, 수치 모델링

Jung-Hwi Kihm and Jun-Mo Kim, 2013, Prediction and Analysis of Behavior of Carbon Dioxide Injected into Target Geologic Formations in the Bukpyeong Basin, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 49, no. 3, p. 389-406

ABSTRACT: A series of thermo-hydrological numerical modeling is performed to predict and analyze behavior of carbon dioxide injected into target geologic formations in the Bukpyeong Basin, which is one of the prospective offshore basins for geologic carbon dioxide storage in Korea. The results of the numerical modeling for the two areas show that the structure (i.e., layered structure), spatial distribution, and hydrological properties (i.e., anisotropy of intrinsic permeability) of the target geologic formations have significant impacts on three-dimensional behavior of carbon dioxide injected. The horizontal movement of carbon dioxide along the spatial distribution of a storage formation (unit C-4) is more dominant than the vertical movement. As the injection amount of carbon dioxide increases, carbon dioxide plume expands furthermore and reaches to the more shallow depth region from the mean sea level. Even in cases of the maximum injection of carbon dioxide, carbon dioxide does not leak through the top boundary of the modeling domain (sea floor) for both of areas. It indicates that the carbon dioxide can be stored in the two areas up to their effective storage capacities of free phase carbon dioxide presented in the previous study. As time progresses, the carbon dioxide stored by hydrodynamic trapping decreases, and the carbon dioxide stored by solubility trapping increases. The total mass of carbon dioxide stored by solubility trapping evaluated in this study is significantly greater than that presented in the previous study. It indicates that the storage efficiency of aqueous phase carbon dioxide is greater than that of free phase carbon dioxide. Therefore, this difference in the storage efficiencies of the two phases of carbon dioxide must be considered when evaluating

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

the effective storage capacities of carbon dioxide on the basin or site scale.

Key words: Bukpyeong Basin, geologic carbon dioxide storage, carbon dioxide injection, behavior prediction and analysis, numerical modeling

(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

이산화탄소 지중 저장(geologic carbon dioxide storage)은 최근 전 지구적인 기후 변화의 원인으로 주목받고 있는 이산화탄소의 배출량을 저감하는 가장 효과적인 방법 중의 하나로 고려되고 있다(Holloway, 1997; Metz *et al.*, 2005). 이산화탄소 지중 저장은 대상 지층(예, 대염수층, 석유 및 가스층, 석탄층 등)에 주입된 이산화탄소가 여러 가지 포획 기작에 의해 고정되어 대기 환경과 완전하게 분리 및 처분되는 과정을 의미한다(Metz *et al.*, 2005).

이산화탄소 지중 저장에는 다양한 기술들이 활용되며, 그 중에서 필수적으로 확보되어야 하는 6대 요소 기술은 다음과 같다(Metz *et al.*, 2005): (1) 지층 특성화 및 평가 기술, (2) 시추 및 주입 기술, (3) 거동 예측 기술, (4) 거동 관측 기술, (5) 환경 영향 평가 기술, (6) 주입 후 부지 관리 및 활용 기술. 이 중에서 (3), (4), (5), (6)에 해당하는 기술들은 감시-저감-검증(Monitoring, Mitigation, and Verification, MMV) 또는 감시-검증-계산(Monitoring, Verification, and Accounting, MVA) 기술로 구분되기도 한다(Metz *et al.*, 2005; Litynski *et al.*, 2012). 최근 발리로드맵(Bali Roadmap)에서 측정, 보고 및 검증 가능한 감축 방안에 대한 개념이 등장함에 따라서 이와 같은 감시-저감-검증 또는 감시-검증-계산 기술들의 중요성이 더욱 부각되고 있는 실정이다.

거동 예측 기술은 여러 가지 단위 수치 모델링 기술을 포함하는데 그 중에서 거동 예측 모델링 기술은 일반적으로 다상 열-수리-역학적-화학적(multi-phase thermo-hydro-mechanical-chemical, T-H-M-C) 수치 모델링을 통하여 대상 분지 또는 부지의 이산화탄소의 거동 양상을 예측 및 분석하며, 이산화탄소의 포획 및 누출 기작을 규명하는 기술이다. 이러한 거동 예측 모델링 기술은 대상 분지 또는 부지 내 지

층의 성능(주입, 저장 및 밀봉 성능) 평가와 누출 위험 분석에 직접적으로 또는 다른 모델링 기술과 연계하여 활용(Litynski *et al.*, 2011)됨으로써 거동 예측 기술 전체에서 중심적인 역할을 수행한다. 따라서 이산화탄소 지중 저장 프로젝트의 성공적인 수행을 위해서는 이러한 거동 예측 모델링 기술을 활용하는 것이 필수적이다.

국외에서는 GEM-GHG (CMG, 2009), STOMP (White and Oostrom, 2006), TOUGH2 (Pruess *et al.*, 1999) 등의 다양한 거동 예측 모델링 기술 또는 수치 모델들이 개발되었으며, 이들이 대상 지층에 주입된 이산화탄소의 거동을 예측하고 이에 수반되는 다양한 현상들을 해석하는데 적용된 바 있다(e.g., Rutqvist *et al.*, 2002; Johnson *et al.*, 2004; White *et al.*, 2005; Lindeberg *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2009; CCS, 2011; Smith *et al.*, 2011; Xu *et al.*, 2011).

국내에서도 최근 들어 거동 예측 모델링 기술을 이용한 이산화탄소 거동의 분석 및 평가가 활발하게 진행되고 있는 추세이다. 먼저 이산화탄소 지중 저장에 의한 다상 유체 유동 및 열 이동 현상을 규명하기 위하여 지질 구조와 지층의 분포를 간략화한 부지 규모의 이차원 단면상의 영역에서 일련의 열-수리학적 수치 모델링이 수행되었다(Kihm and Kim, 2007; Kim, 2008, 2009). 그리고 이산화탄소 지중 저장에 의한 다상 유체 유동과 열 이동 및 지반 변형을 통합적으로 평가하기 위하여 습곡과 단층 등의 지질 구조를 고려한 부지 규모의 이차원 단면상 영역에서(Kihm and Kim, 2008), 그리고 사암과 셰일이 교호하는 층상 구조를 고려한 분지 규모의 이차원 방사상 축대칭 영역에서(Park, S.U. *et al.*, 2011) 각각 열-수리-역학적 수치 모델링이 수행되었다. 또한 이산화탄소 주입에 의한 다상 유체 유동과 열 이동 및 지구화학적 반응성 용질 이동을 통합적으로 분석하고 이를 바탕으로 주입된 이산화탄소의 거동과 영향 범

위를 평가하기 위하여 저장압 지층만이 고려된 이차원 방사상 축대칭 영역에서 열-수리-화학적 수치 모델링이 수행되었다(Kihm *et al.*, 2012a; Kihm *et al.*, 2012c). 이 연구들은 이산화탄소 거동 예측 모델링 기술이 국내에 처음 도입되기 시작한 시점부터 수행되어 온 것으로 주로 비교적 단순한 모델링 영역에 대하여 열-수리학적, 열-수리-역학적 및 열-수리-화학적 현상들을 각각에 적합한 수치 모델로 해석하고 그 적용성을 평가하였다. 즉 이산화탄소 지중 저장에 필요한 요소 기술(또는 단위 기술)의 확보라는 목적을 가지고 연구가 진행되어 왔다.

한편 이렇게 국내에 소개되고 확보된 거동 예측 모델링 기술을 바탕으로 대상 지층의 성능이나 누출 위험 평가를 수행한 연구들이 현재까지 다양하게 진행되어 왔다. 먼저 이산화탄소의 주입에 따른 대상 지층 및 그 주변에서 발생하는 복잡한 현상들을 예측하고 대상 지층의 주입 성능을 평가하기 위하여 저장압 지층만이 고려된 삼차원 영역에서의 수리학적(Kim *et al.*, 2009; Oh *et al.*, 2010, 2011), 열-수리학적(Kihm and Kim, 2010; Kihm *et al.*, 2011), 열-수리-화학적(Kihm *et al.*, 2012b) 수치 모델링과 주입정 주변을 간략화한 삼차원 영역에서의 수리-역학적(Kim *et al.*, 2011) 수치 모델링이 수행되었다. 또한 이산화탄소 누출 기작의 분석과 누출 위험 및 밀봉 성능의 평가를 위하여 퇴적 구조를 단순화한 부지 규모의 이차원 단면에서 몬테카를로 기법을 적용한 수리학적 수치 모델링이 수행되었다(Park, E. *et al.*, 2011). 그리고 저장압 지층만이 고려된 삼차원 영역에서 이산화탄소의 거동을 예측하는 열-수리학적 수치 모델링과 저장압 상부의 지층들에서 폐공 및 단층을 통한 누출 기작을 예측하는 수치 모델링이 통합된 시스템 수준(system-level)의 수치 모델링이 수행되었다(Kim, 2012). 이러한 다양한 연구 사례들 중에서 몇몇의 연구들은 특징적으로 각각의 연구 목적에 맞는 예측 및 분석을 수행하기 위하여 기존의 수치 모델에 다른 해석 방법 또는 수치 모델을 연계하는 방법을 사용하였다(Kihm and Kim, 2010; Park, E. *et al.*, 2011; Kim, 2012). 하지만 이들 연구들 모두 제한된 삼차원의 또는 간략화된 이차원의 모델링 영역에서 수행되었으며, 부지 규모 이상의 대규모 삼차원 모델링 영역은 고려되지 못하였다.

국내에서는 Park *et al.* (2009)에 의해 처음으로 광

역적 규모의 이산화탄소 거동 예측 모델링이 수행되었다. 이 연구에서는 삼차원 지층 모델을 이용하여 동해 울릉분지의 돌고래 구조에 대하여 이산화탄소 거동을 예측 및 분석하였고 주입된 이산화탄소의 총량에 근거하여 저장 용량을 평가하였다. 하지만 이 연구에서는 해당 저장압층 내에서의 이산화탄소 거동만이 예측 및 분석되었다. 한편 Kim (2011a)은 삼차원 지층 모델링 및 열-수리학적 수치 모델링을 연계한 이산화탄소 지중 저장 용량 평가 방법을 제시하였고 이를 북평분지에 적용하여 저장 성능을 평가하였다. 이 연구에서는 분지 규모에서 저장압뿐만 아니라 덮개암과 기반암 등의 모든 지층을 삼차원 지층 모델에 고려하였고 이를 이용하여 열-수리학적 수치 모델링을 수행하였다. 하지만 이 연구에서는 이산화탄소 주입 이전 정상 상태의 지중 유체 압력과 온도만이 산정되었고 이산화탄소의 주입에 따른 다상 유체 유동은 예측 및 분석되지 않았다. 이와 같이 국내에서는 분지나 부지 규모의 대규모 삼차원 모델링 영역에 대한 이산화탄소 거동 예측 수치 모델링의 연구 사례가 매우 적은 실정이다. 따라서 국내의 거동 예측 모델링 기술의 수준을 높이기 위해서는 분지나 부지 규모에서 지층의 공간적 분포뿐만 아니라 지질 구조를 현실적으로 반영하는 삼차원 지층 모델에 기반을 둔 이산화탄소 거동 예측 및 분석 수치 모델링 연구가 수행되어야만 한다.

본 연구의 목적은 국내 이산화탄소 지중 저장 유망 연안 퇴적분지 중 하나인 북평분지 내의 대상 지층에 주입된 이산화탄소의 거동을 예측 및 분석하는 것이다. 이를 위하여 먼저 선행 연구 결과들을 기반으로 하여 북평분지 내에 이산화탄소 주입을 위한 두 지역을 선정하고 이 지역들에 대한 삼차원 지층 모델링을 수행하였다. 그리고 다상 열-수리학적 수치 모델링을 수행하여 이산화탄소 주입에 의한 다상 유체 유동 및 열 이동 현상을 예측 및 분석하였다. 마지막으로 두 지역에 대하여 이산화탄소 주입량의 변화에 대한 민감도를 분석하였다.

2. 연구 지역 개요

북평분지는 한국 동해안의 동해시 및 삼척시 근처에 분포하며, 위경도 상으로 북위 37° 35' 40", 동경 129° 20' 5" 인근에 위치한다(그림 1). 북평분지는

해안선을 따라서 북서에서 남동 방향으로 분포하고 대부분의 퇴적물이 바다 밑에 존재하며, 그중 일부가 육상에 노출되어 있다. 북평분지의 기반암은 선캄브리아기의 화강편마암과 이를 피복하는 하부 고생대의 석회암으로 구성된다(Won *et al.*, 1994). 제3기 퇴적암은 이들 기반암 상위에 부정합 관계로 놓이며, 다시 제4기 현생 퇴적물에 의해 피복된다.

북평분지에 대한 탄성파 탐사와 코어 시료 채취가 2001년에서 2002년에 걸쳐서 KIGAM (2004)에 의해 수행된 바 있다. 이렇게 획득한 자료를 바탕으로 북평분지를 포함한 광역적인 지역에 대한 탄성파 층서(seismic stratigraphy) 및 지질 구조와 분지의 발달과정이 해석된 바 있다(Kwon, 2005; Kwon *et al.*, 2009). 최근에는 북평분지가 이산화탄소 지중 저장 유망 연안 분지로 대두됨에 따라 분지의 특성화

를 위하여 인근 육상 지역에 대한 지질 조사와 시료 채취, 그리고 추가적인 탄성파 자료 해석이 이루어졌다(Kwon, 2011; Kim, 2011a). Kwon (2011)은 이렇게 새로 취득된 자료와 이전에 축적된 자료를 종합적으로 해석하여 탄성파 구조와 지층 특성을 포함하는 분지 모델을 제시하였다. 제시된 북평분지의 모델에 의하면 퇴적암층들의 탄성파 층서는 크게 A층군(unit group), B층군 및 C층군의 세 층군으로 구분된다. 하부로부터 C층군 및 B층군은 제3기의 퇴적암이며, 각각 네 개와(C-4, C-3, C-2, C-1) 세 개의(B-3, B-2, B-1) 층으로 구분된다. 가장 상위의 A층군은 제4기의 퇴적암이며, 두 개의 층(A-2, A-1)으로 구분된다. 이들 각 층의 퇴적암석학적인 특성이 Kwon (2011)에 의해 규명되었으며, 표 1에 발췌되어 있다. 이러한 특성에 근거할 때 C-4, C-2 및 B-2층

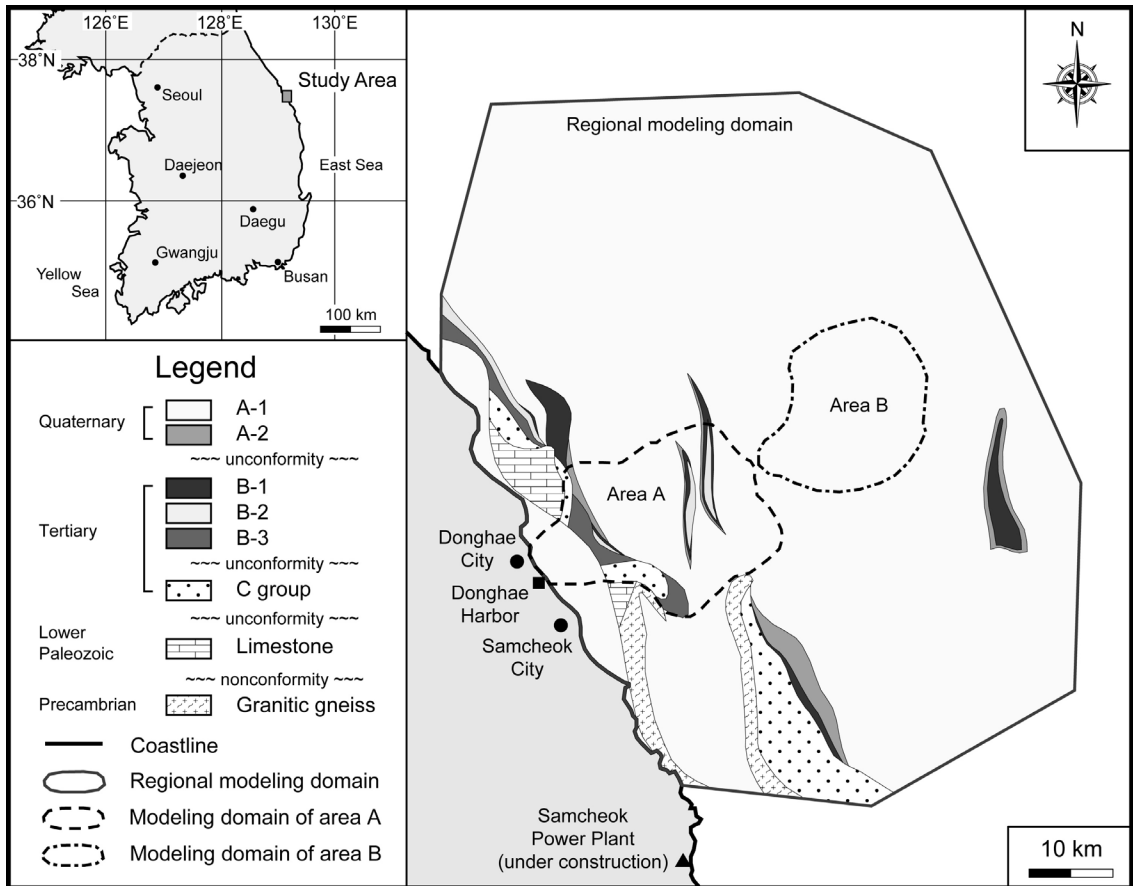


Fig. 1. Location and geologic maps of the Bukpyeong Basin with modeling domains. The geologic map is modified from Kwon (2011). The regional modeling domain was used for evaluating CO₂ storage capacities by Kim (2011a).

Table 1. Lithology of seismic units in the Bukpyeong Basin (Kwon, 2011).

Age	Unit group	Unit	Lithology
Quaternary	Group A	A-1	Alternation of clay and sandy silt layers with intercalations of sand or gravel layers (more sand-prone facies)
		A-2	Alternation of clay and sandy silt layers with intercalations of sand or gravel layers (probably basal lags of sand or gravels)
	Group B	B-1	Alternation of clay and sandy silt layers with intercalations of sand layers
		B-2	Sand-prone or gravelly sand sediments with intercalations of mud layers
		B-3	Alternation of sand and mud layers with intercalations of sand or gravel layers
	Tertiary	Group C	C-1
C-2			Sand-prone or gravelly sand sediments with intercalations of mud layers
C-3			Alternation of sand and mud layers with intercalations of sand or gravel layers
C-4			Gravel, sand, and mud (probably correlated with onshore Tertiary sediments)

은 저장암으로 그리고 각 저장암의 상위에 위치하는 C-3, C-1과 B-3, B-1과 A-2는 각각 덮개암으로 사용될 수 있다(Kim, 2011a). 또한 북평분지 인근에는 2,000 MW급의 석탄화력발전소인 삼척 발전소가 현재 건설 중에 있으며, 이 발전소는 잠재적인 이산화탄소 공급원의 역할을 할 수 있는 300 MW급 이산화탄소 포집 시설을 포함하고 있다(그림 1). 따라서 이러한 지질학적 특성과 입지 조건을 고려할 때 북평분지는 국내의 연안 분지들 중에서 이산화탄소 지중 저장 유망 분지로 평가될 수 있다.

이러한 배경 하에 북평분지에 대한 저장 용량이 평가된 바 있으며, 이때 사용된 광역 모델링 영역이 그림 1에 표시되어 있다(Kim, 2011a). 이 연구에서는 삼차원 지층 모델링 및 열-수리학적 수치 모델링을 연계한 이산화탄소 지중 저장 용량 평가 방법을 제시하였으며, 이 방법을 북평분지에 적용하였다. 이산화탄소 유효 저장 용량은 이산화탄소가 초임계로 존재하는 영역에서는 약 141 Mton, 해저면 기준 심도 500 m 이상 영역에서는 약 877 Mton으로 각각 계산되었다. 또한 북평분지 내에 초임계 이산화탄소가 존재할 수 있는 영역을 중심으로 크게 네 곳의 후보 지역에 대한 정성적인 부지 선정 예비 평가가 수행된 바 있다(Kim, 2011a). 이 연구에서는 해안과의 거리 및 해수 심도, 자료의 신뢰도, 지질 분포, 퇴적

층후, 이산화탄소 주입 능력, 이산화탄소 저장 능력, 이산화탄소 밀봉 능력의 일곱 가지 항목에 대한 정성 평가를 수행하였으며, 그 중에서 그림 1에 표시된 지역 A 및 지역 B가 다른 두 지역에 비해서 더 높은 우선 순위를 가지는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 지역 A 및 지역 B를 이산화탄소 주입에 의한 열-수리학적 현상을 예측 및 분석하기 위한 연구 대상 지역으로 선정하고 기반암과 퇴적층의 삼차원 분포를 종합적으로 고려하여 각 지역의 수치 모델링 영역을 설정하였다(그림 1의 점선 및 일점쇄선 영역 참조).

3. 삼차원 지층 모델링

지역 A 및 B에 대하여 Visual COFAT3D (Kim, 2011b)의 GUI 전처리기를 이용하여 삼차원 지층 모델을 수립하였다(그림 2). 지역 A의 모델링 영역은 동서 방향으로 약 32 km, 남북 방향으로 약 24 km이며, 최대 심도는 약 1,100 m이다. 지역 B의 모델링 영역은 동서 방향으로 약 28 km, 남북 방향으로 약 24 km이며, 최대 심도는 약 2,200 m이다. 이 지층 모델에서는 기반암(선캠브리아기 화강암질 편마암 및 하부고생대 석회암)은 고려되지 않았고 퇴적암층(A층군, B층군 및 C층군)만이 고려되었다. 해저면(sea floor)의 고도(해수면 기준) 및 각 층 경계들의 고도는 Kwon

(2011)에 의해 해석된 기본 자료를 이용하였으며, 이를 통계학적으로 처리하고 크리깅(kriging) (Isaaks and Srivastava, 1989) 기법을 이용하여 내삽(interpolation) 및 외삽(extrapolation)하였다. 이 지층 모델에서는 각 층의 공간적 분포뿐만 아니라 습곡, 정합 및 부정합 등의 지질구조가 합리적으로 고려되었다. 따라서 이 모델은 지층이 측방 변화 및 침멸(lateral change and

disappearing) 양상과 구조적인 기복(structural relief), 그리고 부정합 또는 배사 구조에 의해 상대적으로 오래된 지층들(B층군, C층군 및 기반암)이 해저면에 노출되는 양상 등을 매우 현실적으로 보여준다(그림 2a, 2b, 2c, 2d). 이렇게 작성된 지역 A 및 B에 대한 지층 모델을 각각 97,400개와 97,800개의 삼차원 육면체 격자 요소로 이산화하였다(그림 2a, 2b).

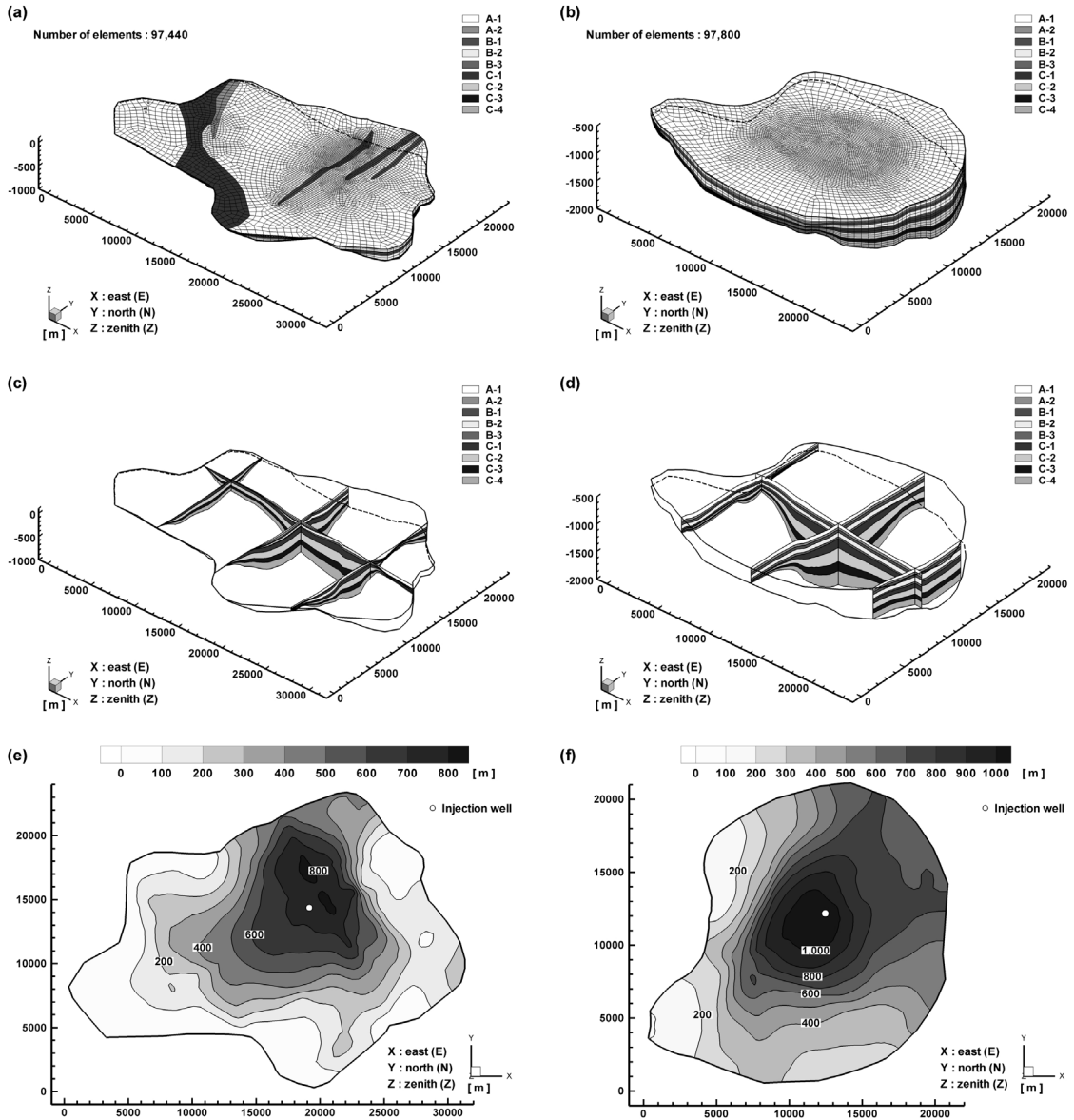


Fig. 2. Three-dimensional geologic formation models with (a) and (b) grid elements and (c) and (d) fence diagrams, and (e) and (f) isopach maps (thickness contours) of whole sedimentary formations (units) for Area A (left column) and Area B (right column) in the Bukpyeong Basin.

Table 2. Thermo-hydrological properties of sedimentary units in the Bukpyeong Basin.

Property	A-1	A-2	B-1	B-2	B-3	C-1	C-2	C-3	C-4
Porosity ⁽¹⁾	0.421	0.416	0.301	0.338	0.305	0.276	0.293	0.227	0.143
Horizontal intrinsic permeability [m ²] ⁽²⁾	8.65×10^{-13}	6.75×10^{-14}	1.20×10^{-13}	1.40×10^{-12}	1.50×10^{-13}	2.50×10^{-14}	1.40×10^{-12}	2.00×10^{-14}	1.80×10^{-12}
Vertical intrinsic permeability [m ²] ⁽³⁾	1.67×10^{-17}	8.33×10^{-18}	1.00×10^{-17}	9.99×10^{-16}	1.41×10^{-17}	1.00×10^{-17}	9.99×10^{-16}	1.19×10^{-17}	5.00×10^{-16}
Solid density [kg/m ³] ⁽⁴⁾	2,660	2,790	2,820	2,780	2,720	2,720	2,800	2,770	2,800
Specific heat [J/kg/°C] ⁽⁵⁾	1,020	960	960	1,020	960	960	1,020	960	1,020
Heat conductivity [W/m/°C] ⁽⁶⁾	2.47	2.07	2.07	2.47	2.07	2.07	2.47	2.07	2.47
Residual water saturation ⁽⁷⁾	0.159	0.074	0.149	0.159	0.149	0.207	0.159	0.207	0.159
Residual gas saturation ⁽⁸⁾	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
van Genuchten's (1980) unsaturated hydraulic parameters									
Gas-entry pressure [Pa] ⁽⁹⁾	7.36×10^4	1.57×10^4	1.96×10^4	7.36×10^4	1.96×10^4	9.81×10^3	7.36×10^4	9.81×10^3	7.36×10^4
Exponent ⁽¹⁰⁾	0.471	0.270	0.291	0.471	0.291	0.187	0.471	0.187	0.471

Notes: (1) and (4) the raw data of porosities and solid densities are acquired by KIGAM (2004), Kim (2011a), and Kwon (2011), and their representative values of each unit are obtained by Kwon (2011) for seismic interpretation; (2) and (3) the horizontal and vertical intrinsic permeabilities of each unit are up-scaled by arithmetic and harmonic averaging intrinsic permeabilities of lithologic layers (i.e., gravel, sand, silt, and mud) (Freeze and Cherry, 1979; Fetter, 1994), respectively; (5) and (6) for the thermal properties (i.e., specific heat and heat conductivity), all units are classified as the two groups (i.e., reservoir and cap rocks), and their representative values of the two groups are obtained by Kim (2009) from the work of KIGAM (2005); (7), (8), (9), and (10) the residual water and gas saturations and unsaturated hydraulic parameters (i.e., gas-entry pressure and exponent) of all units are obtained from the work of Carsel and Parrish (1988) considering their homogeneous intrinsic permeability.

퇴적암층별 열-수리학적 물성값은 기존의 문헌들을 수집 및 분석하여 그 대표값을 선정하였고 표 2에 정리되어 있다(Freeze and Cherry, 1979; van Genuchten, 1980; Carsel and Parrish, 1988; Fetter, 1994; KIGAM, 2004; KIGAM, 2005; Kim, 2009, 2011a; Kwon, 2011). 여기에서 지층의 고유투수계수는 수평 고유투수계수(horizontal intrinsic permeability)와 수직 고유투수계수(vertical intrinsic permeability) 두 가지를 고려하였다. 지층의 수평 고유투수계수와 수직 고유투수계수는 주상도(Kwon, 2011)를 활용하여 지층

내의 각 단위층(이암, 실트암, 사암 및 역암)들의 고유투수계수를 각 단위층의 두께로 가중하여 산술평균(arithmetic average)과 조화평균(harmonic average)을 구하는 방식(Domenico and Schwartz, 1990)으로 각각 업-스케일링(up-scaling)하여 산정되었다.

4. 열-수리학적 수치 모델링

4.1 열-수리학적 수치 모델

본 연구에 사용된 다차원 다상 열-수리학적 수치 모

텔은 TOUGH2 (Pruess *et al.*, 1999)이다. TOUGH2는 적분유한차분법(integral finite difference or IFD method) (Narasimhan and Witherspoon, 1976)을 이용하여 공간이산화(spatial discretization)를 하는 수치 모델이다. 이러한 적분유한차분법은 불균일한 격자(grid)를 고려할 수 있기 때문에 지질 매체에 대한 유연한 공간이산화가 가능하다는 장점이 있으며, 따라서 다양하고 복잡한 지질 조건에서의 다상 유체 유동 및 지열 이동을 모의하는데 매우 적합하다. TOUGH2는 다양한 모듈을 통하여 각 유체의 특성을 고려할 수 있으며, 본 연구에서는 일반적인 이산화탄소 지중 저장 환경에서의 이산화탄소 및 지하수의 유체 특성을 합리적으로 고려할 수 있는 ECO2N (Spycher and Pruess, 2005) 모듈을 사용하였다.

4.2 열-수리학적 수치 모델링 설정

지역 A 및 지역 B에 대하여 공통적으로 다음과 같은 경계 조건을 설정하고 정상 상태의 수치 모델링을 수행하여 이산화탄소 주입 이전 상태를 산정하였다. 먼저 수치 모델링 영역의 윗면(해저면)에 대하여 지중 유체 압력은 해수면으로부터의 수심을 반영하여 수심이 깊을수록 정수압 상태의 압력이 증가하는 Dirichlet 경계 조건을 적용하였다. 또한 온도에 대해서는 4°C 로 균일한 것으로 가정하여 Dirichlet 경계 조건을 적용하였다. 수치 모델링 영역의 바닥면에 대하여 다상 유체의 유동이 발생하지 않는 no-flux 경계 조건을 적용하였으며, 지열에 대해서는 연구 지역 주변의 지열 특성(Kim and Lee, 2007; Lee *et al.*, 2010)을 반영하여 지열류량 0.083 W/m^2 이 주어지는 Neumann 경계 조건을 적용하였다. 수치 모델링 영역의 측면에 대하여 다상 유체 유동 및 열 이동이 발생하지 않는 no-flux 및 no-transport 경계 조건을 적용하였다. 이러한 조건 하에서 정상 상태 수치 모델링을 수행하였고 그 결과로 얻어진 지중 유체 압력 및 온도의 삼차원 분포를 이산화탄소 주입 수치 모델링의 초기 조건으로 사용하였다. 이산화탄소 주입 수치 모델링에서는 정상 상태의 수치 모델링과 같은 경계 조건을 설정하였다.

한편 두 지역에 대하여 이산화탄소 주입량에 대한 민감도를 분석하기 위하여 다음과 같은 이산화탄소 주입 시나리오를 각각 적용하였다. 이산화탄소는 총 10년간 주입하였다. 그리고 이산화탄소 주입량의 최

대값은 Kim (2011a)의 연구에서 제시된 해저면 기준 심도 500 m 이하 영역의 자유 유체상 이산화탄소(수리동역학적 포획) 유효 저장 용량을 기준으로 설정하였다. 이 연구에 의하면 지역 A의 유효 저장 용량은 약 39 Mton으로 계산되었고 이를 근거로 주입 총량 10 Mton에서 40 Mton까지, 연간 주입량 1 Mton에서 4 Mton까지의 네 가지 경우(Case A-1~Case A-4)에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 또한 지역 B의 유효 저장 용량은 약 115 Mton으로 계산되었고 이를 근거로 주입 총량 30 Mton에서 120 Mton까지, 연간 주입량 3 Mton에서 12 Mton까지의 네 가지 경우(Case B-1~Case B-4)에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 이산화탄소 주입 위치는 각 지역의 경계와 퇴적암층의 두께 및 해수면 기준 심도를 종합적으로 고려하여 결정하였으며, 지역 A 및 지역 B에 대하여 그림 2e 및 그림 2f에 각각 도시되어 있다. 두 지역 모두 저장암의 특성을 가지고 있는 가장 하부의 층인 C-4층에 이산화탄소 주입을 실시하였다. 수치 모델링 기간은 주입 기간 10년을 포함하여 1,000년으로 하였다.

5. 열-수리학적 수치 모델링 결과

5.1 지역 A의 열-수리학적 수치 모델링 결과

지역 A 내에 지중 주입된 이산화탄소의 삼차원 이동과 주입량 변화에 따른 양상이 그림 3과 그림 4에 걸쳐서 도시되어 있다. 주입된 이산화탄소는 주입정을 중심으로 수직 방향보다는 수평 방향으로 넓게 퍼지면서 이동한다(그림 3, 4). 대부분의 이산화탄소는 저장암인 C-4층이 분포한 지역을 따라서 수평 이동하며, 일부분의 이산화탄소는 주입정 주변에서 오랜 시간에 걸쳐서 상부로 이동하여 덮개암인 C-3층의 하부까지 이른다(그림 3a, 3c, 3e, 3g). 초기에는 이산화탄소가 주입정과 주변 지층간의 압력차에 의해 이동하지만 주입 기간이 종료된 10년 후부터는 주로 부력에 의해 이동하며, 이때 상대적으로 낮은 수직 고유투수계수의 영향으로 해수면 기준 심도가 더 낮은 지역으로 수평 이동하는 양상이 우세하게 나타난다. 또한 지역 A 내에서는 이산화탄소가 서쪽과 남쪽 방향의 두 갈래로 나뉘어 이동하는 양상이 특징적으로 나타난다. 이러한 양상은 지역 A의 C-4층과 C-3층간 경계면의 공간적 분포의 영향에 의해 나타나는 것으로 해석된다. 한편 이산화탄소 포화도는 주입 기간 동

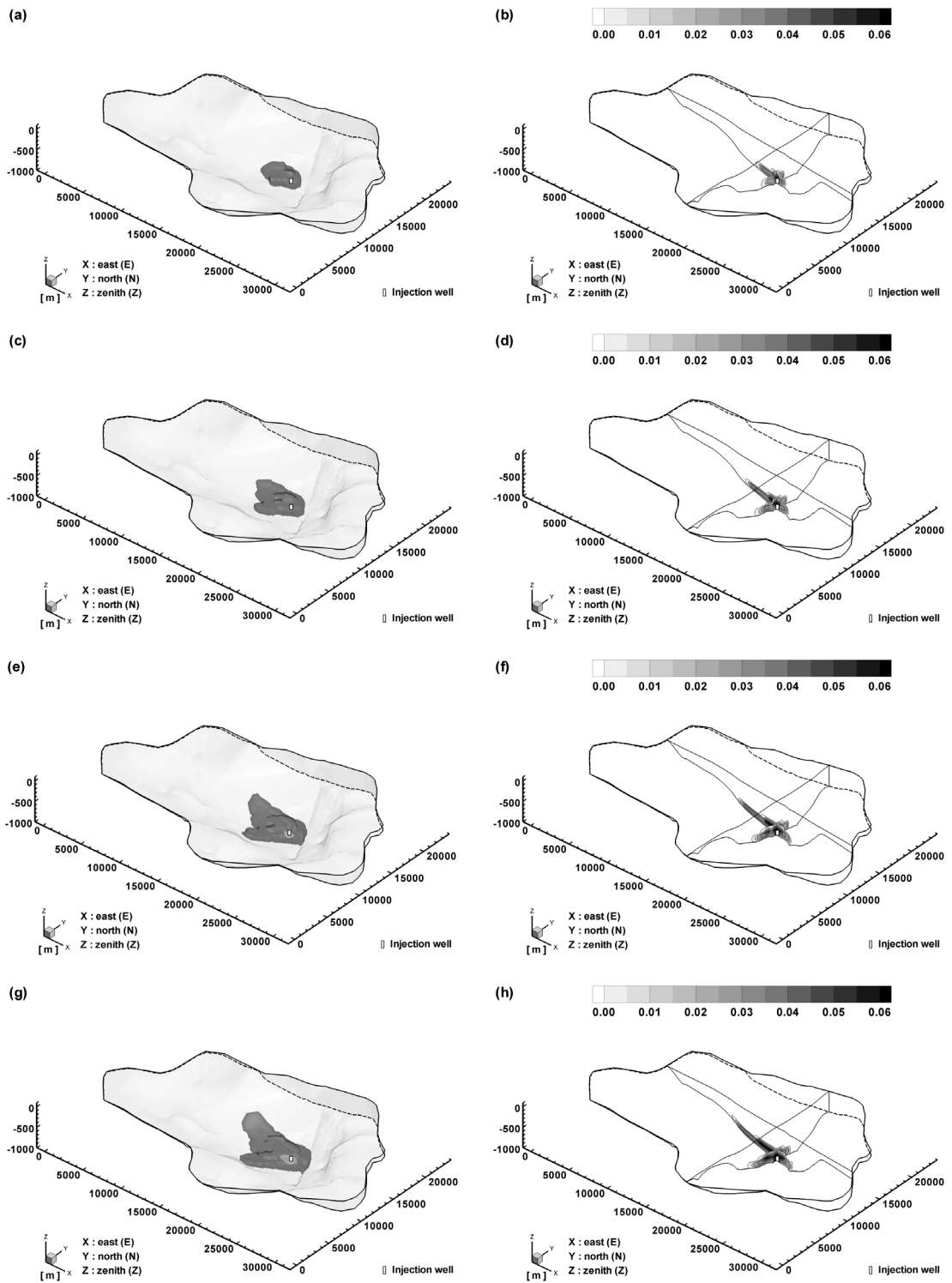


Fig. 3. Three-dimensional spatial distributions of CO₂ plumes (left column) and CO₂ saturations in two vertical sections (right column) after 1,000 years in Area A for (a) and (b) Case A-1, (c) and (d) Case A-2, (e) and (f) Case A-3, and (g) and (h) Case A-4.

안 주입정을 중심으로 상승하여 주입량이 가장 큰 경우(Case A-4) 0.35에 이르나 이후에 이산화탄소가 확산되고 지하수에 용해되는 용해 포획이 진전됨에 따라서 점차적으로 감소하여 1,000년 후에 모든 경우에서 0.06 이하가 된다(그림 3b, 3d, 3f, 3h).

이산화탄소 주입량이 가장 작은 경우(Case A-1) 이산화탄소는 동심원상으로 이동하며, 남서쪽으로 고도 -850 m까지 이동한다(그림 4a). 이산화탄소 주입량이 증가함에 따라서(Case A-1~Case A-4) 서쪽과 남쪽으로 더 높은 고도까지 이산화탄소가 이동하며, 주입량이 가장 큰 경우(Case A-4) 서쪽으로 고도 -600 m까지 이산화탄소가 이동한다(그림 4d). 즉 이산화탄소 주입량이 증가할수록 이산화탄소가 이동하는 범위가 증가하며, 앞에서 언급한 서쪽과 남쪽 방향의 두 갈래로 이동하는 양상이 더욱 심화된다(그림 4). 하지만 이산화탄소 주입량이 가장 큰 경우

(Case A-4)에도 이산화탄소가 모델링 영역의 상부(해저면) 또는 측면 경계까지 이동하지는 않는다.

지역 A 내에 지중 주입된 이산화탄소의 포획 기작별 효율의 시간에 따른 변화 양상이 그림 5에 도시되어 있다. 수리동역학적으로 포획된 이산화탄소(자유 유체상)는 시간이 지남에 따라서 점차적으로 용해 포획된 이산화탄소(수용액상)로 전환되며, 1,000년 후에는 34.90~39.35% (Case A-1~Case A-4)가 수리동역학적으로 포획되고 60.65~65.10% (Case A-4~Case A-1)가 용해 포획된다(그림 5). 주입량이 증가할수록 수리동역학적 포획의 효율은 소폭 증가하고 용해 포획의 효율은 소폭 감소하지만 주입량에 따른 큰 차이를 보이지는 않는다.

5.2 지역 B의 열-수리학적 수치 모델링 결과

지역 B 내에 지중 주입된 이산화탄소의 삼차원 거

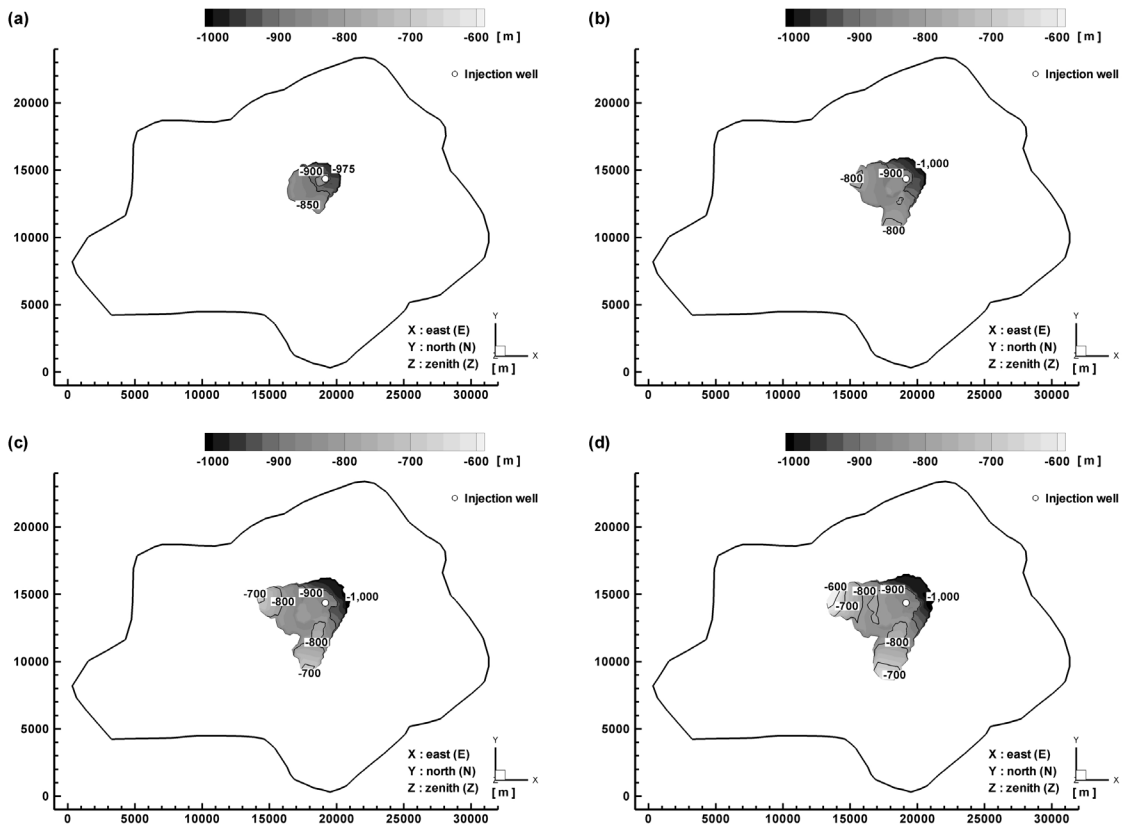


Fig. 4. Depth maps (elevation contours from the mean sea level) of top boundaries of CO₂ plumes after 1,000 years in Area A for (a) Case A-1, (b) Case A-2, (c) Case A-3, and (d) Case A-4.

동과 주입량 변화에 따른 양상이 그림 6과 그림 7에 걸쳐서 도시되어 있다. 지역 A와 유사하게 지역 B에 주입된 이산화탄소 역시 주입정을 중심으로 수직 방향보다는 수평 방향으로 넓게 퍼지면서 이동한다(그림 6, 7). 이산화탄소는 지역 A 경우와 유사하게 주로 C-4층이 분포한 지역을 따라서 이동하며, 이산화탄소가 덮개암인 C-3층의 하부까지 이르는 지역이 지역 A 경우 보다는 더 넓게 나타난다(그림 6a, 6c, 6e, 6g). 지역 A 경우와 마찬가지로 지역 B 경우에서도 이산화탄소가 오랜 시간에 걸쳐서 해수면 기준 심도가 더 낮은 지역으로 수평 이동하는 양상이 나타난다. 하지만 지역 A 경우와는 다르게 지역 B에서는 특징적으로 이산화탄소가 서쪽 방향으로 고도가 낮은 지역을 향하여 급격하게 이동하는 양상이 나타난다. 이러한 양상은 지역 B의 C-4층과 C-3층간 경계면의 공간적 분포의 영향에 의해 나타나는 것으로 해석된다. 한편 이산화탄소 포화도는 주입 기간 동안에는 주입정을 중심으로 상승하여 주입량이 가

장 큰 경우(Case B-4) 0.48에 이르나 이후에 이산화탄소가 확산되고 지하수에 용해되는 용해 포획이 진전됨에 따라서 점차적으로 감소하여 1,000년 후에 모든 경우에서 0.07 이하가 된다(그림 6b, 6d, 6f, 6h).

이산화탄소 주입량이 가장 작은 경우(Case B-1) 이산화탄소는 동심원상으로 이동하며, 전반적으로 고도 -1,800 m까지 이동한다(그림 7a). 이산화탄소 주입량이 증가함에 따라서(Case B-1~Case B-4) 주입정을 중심으로 그 이동 범위가 동심원상으로 급격히 넓어지며, 앞에서 언급한 것과 같이 서쪽 방향으로 고도가 낮은 지역을 향하여 이동하는 양상이 더욱 심화된다(그림 7). 따라서 이산화탄소 주입량이 가장 큰 경우(Case B-4) 서쪽으로 고도 -1,200 m까지 이산화탄소가 이동하며, 모델링 영역의 측면 경계까지 이동한다(그림 6g, 7d). 하지만 이 경우(Case B-4)에 대해서도 이산화탄소가 모델링 영역의 상부(해저면)까지는 이동하지 않는다.

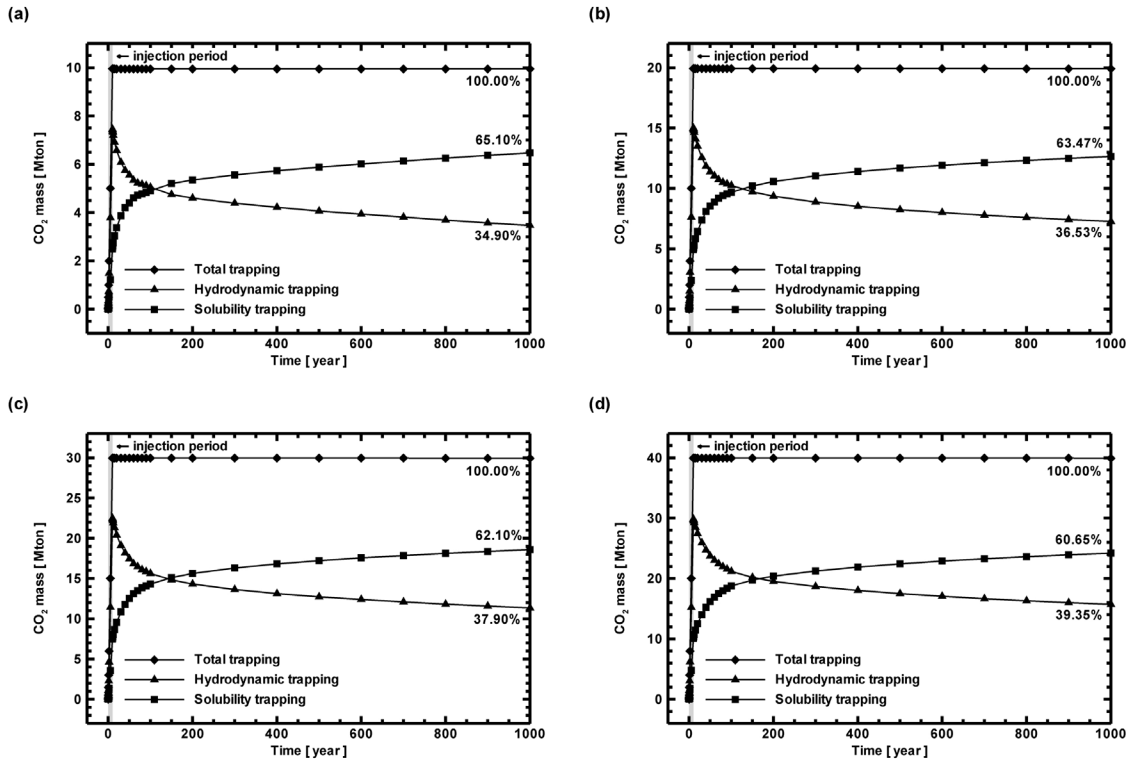


Fig. 5. Temporal changes in masses of CO₂ stored by hydrodynamic and solubility trapping mechanisms in Area A for (a) Case A-1, (b) Case A-2, (c) Case A-3, and (d) Case A-4.

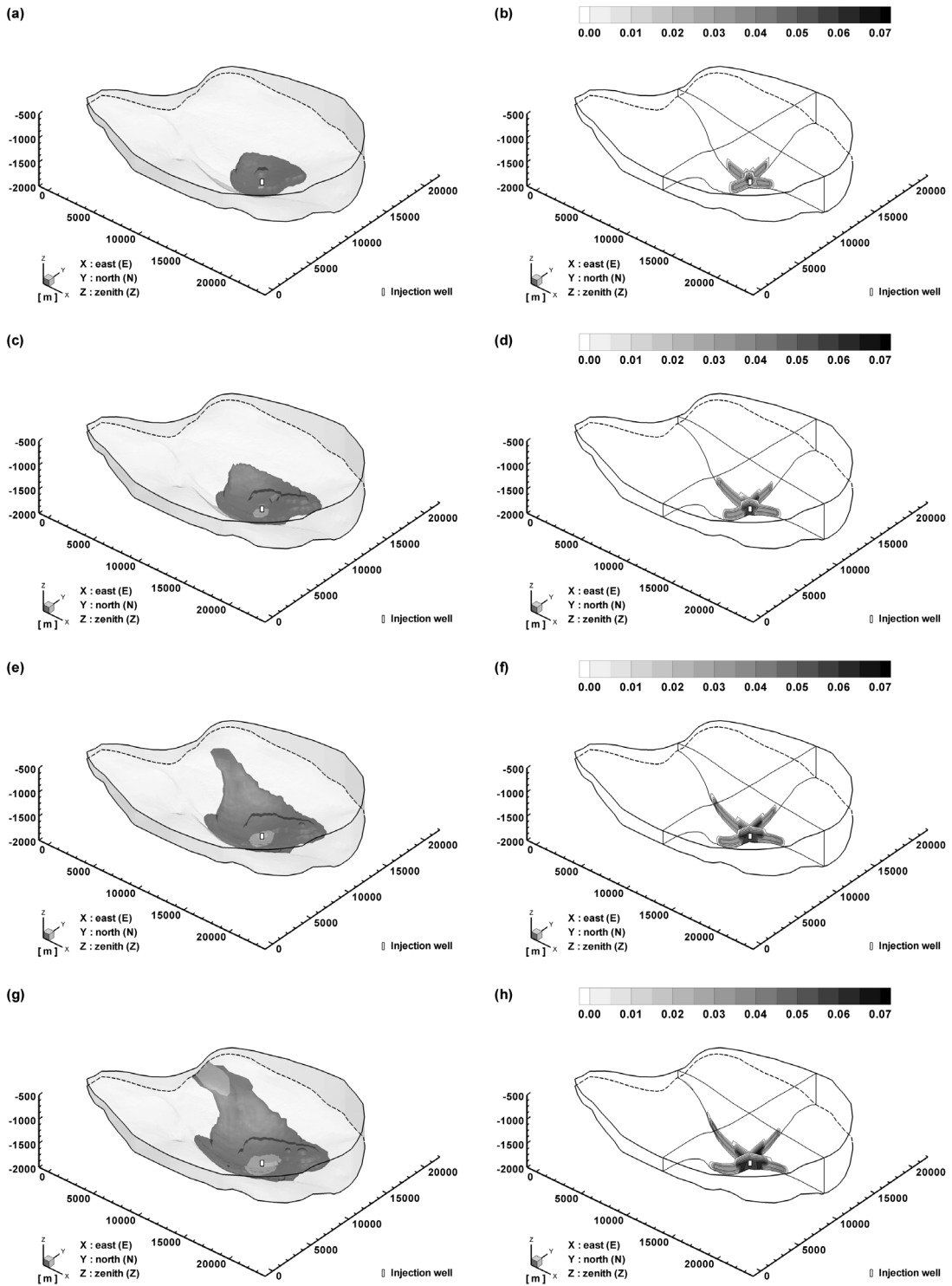


Fig. 6. Three-dimensional spatial distributions of CO₂ plumes (left column) and CO₂ saturations in two vertical sections (right column) after 1,000 years in Area B for (a) and (b) Case B-1, (c) and (d) Case B-2, (e) and (f) Case B-3, and (g) and (h) Case B-4.

지역 B 내에 지중 주입된 이산화탄소의 포획 기작별 효율의 시간에 따른 변화 양상이 그림 8에 도시되어 있다. 지역 A의 경우와 마찬가지로 수리동역학적으로 포획된 이산화탄소(자유 유체상)는 시간이 지남에 따라서 점차적으로 용해 포획된 이산화탄소(수용액상)로 전환된다(그림 8). 하지만 1,000년 후에 41.62~44.25% (Case B-1~Case B-4)가 수리동역학적으로 포획되고 55.75~58.38% (Case B-4~Case B-1)가 용해 포획되어 지역 A의 경우보다 수리동역학적 포획에서 용해 포획으로 전환되는 비율이 감소하였다. 이것은 지역 A보다 3배 많은 이산화탄소를 지역 B에 주입하였기 때문이다. 한편 지역 A 경우와 마찬가지로 주입량이 증가할수록 수리동역학적 포획의 효율은 소폭 증가하고 용해 포획의 효율은 소폭 감소하지만 주입량에 따른 큰 차이를 보이지는 않는다.

5.3 주입된 이산화탄소의 거동 및 대상 지층의 저장 성능

앞에서 언급한 바와 같이 지역 A 및 지역 B에 대한 이산화탄소 저장 용량 평가가 수행된 바 있다 (Kim, 2011a). 선행 연구에서 수행된 방법은 전 세계적으로 널리 사용되고 있는 미국 Department of Energy (DOE) 방법(NETL, 2007)과 유사한 일종의 부피 기반의 산정 방법(volumetric based estimation method)이다. 여기에서 자유 유체상 이산화탄소 잠재 저장 용량은 대상 지층의 공극을 자유 유체상의 이산화탄소가 전부 채웠을 때의 이산화탄소 전체 질량이고 수용액상 이산화탄소 잠재 저장 용량은 대상 지층의 공극 내의 지하수에 수용액상의 이산화탄소가 완전하게 포화되었을 때의 이산화탄소 전체 질량이다. 또한 전체 공극 부피에 대하여 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소가 점유하는 비율을 이산

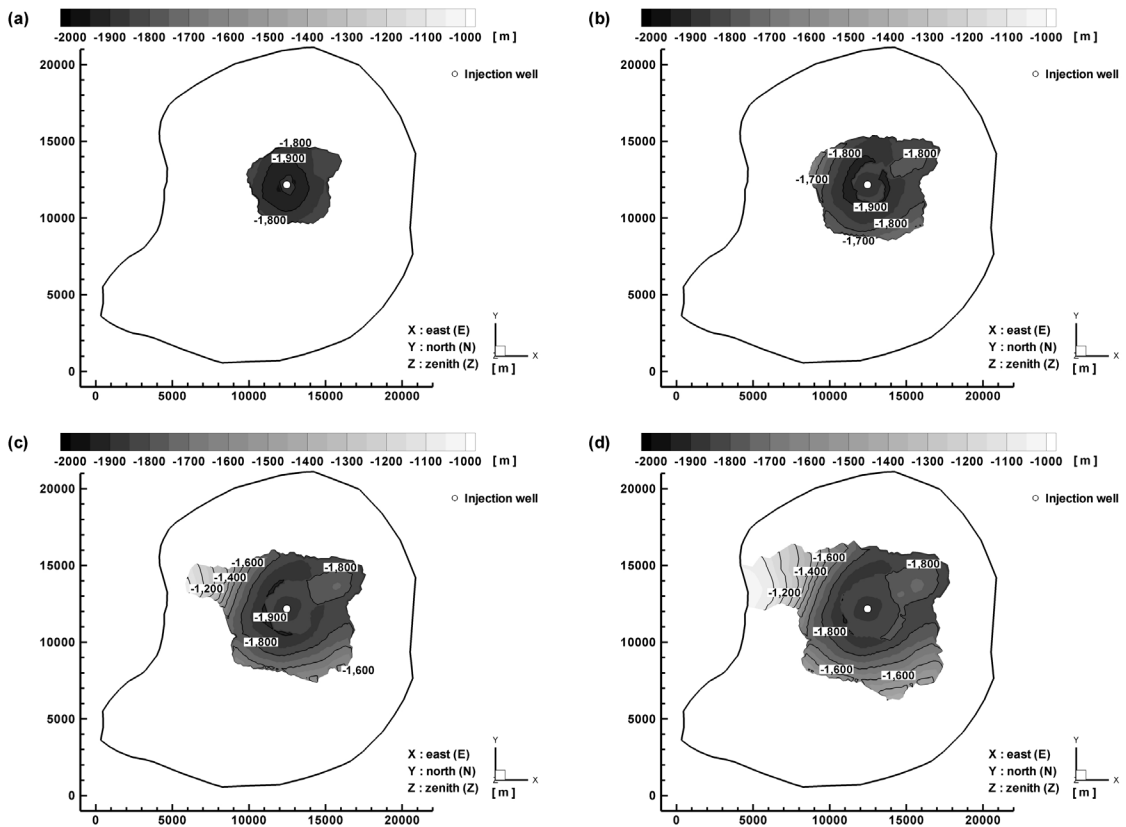


Fig. 7. Depth maps (elevation contours from the mean sea level) of top boundaries of CO₂ plumes after 1,000 years in Area B for (a) Case B-1, (b) Case B-2, (c) Case B-3, and (d) Case B-4.

화탄소 저장 효율(NETL, 2007, 2010)로 표현하게 되며, 이것을 이산화탄소 잠재 저장 용량에 곱하여 유효 저장 용량을 산출한다. 일반적으로 대상 지층에 주입된 자유 유체상 이산화탄소는 그 밀도가 지하수보다 가벼우므로 부력에 의해 상부로 이동하여 누출될 위험성이 있다. 이러한 자유 유체상 이산화탄소는 시간이 지남에 따라서 점차적으로 지하수에 용해되어 수용액상 이산화탄소로 변환된다. 이렇게 변환된 수용액상 이산화탄소는 지하수 자체의 밀도를 증가시켜서 하부로 가라앉기 때문에 상부로의 이산화탄소 누출 위험성을 줄일 수 있다. 따라서 대상 지층에 용해 포획될 수 있는 이산화탄소의 최대 질량 즉 수용액상 이산화탄소 저장 용량은 이산화탄소의 장기적인 저장 안정성 또는 안전성을 대변하는 지표로서 활용될 수 있다.

선행 연구에서는 해저면 기준 심도 500 m 이하 영역의 자유 유체상 이산화탄소(수리동역학적 포획) 및 수용액상 이산화탄소(용해 포획) 유효 저장 용량을 각

각 제시하였다. 지금까지 자유 유체상과 수용액상 이산화탄소의 저장 효율이 개별적으로 제시된 바 없기 때문에 두 저장 효율 모두 같은 값(2.5%, NETL, 2007)을 사용하여 산정되었다. 이에 따르면 지역 A에서의 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소의 유효 저장 용량은 각각 38.62 Mton, 2.54 Mton으로 산정되었다. 또한 지역 B에서는 각각 114.30 Mton, 7.22 Mton으로 산정되었다.

한편 두 연구 지역 내의 대상 지층에 주입된 이산화탄소의 삼차원 거동 양상은 전체적으로 지층의 구조(층상 구조) 및 공간적 분포와 수리학적 물성(고유 투수계수의 이방성 등)의 영향을 크게 받는 것으로 나타난다. 이러한 영향으로 C-4층의 공간적 분포를 따르는 수평 방향으로의 이동이 수직 방향의 이동에 비해 우세하게 나타나며, 지역 A와 지역 B에서 각각 다른 형태의 이산화탄소 이동 양상이 나타난다. 또한 이산화탄소 주입량이 증가할수록 이산화탄소의 영향 범위가 증가하며, 해수면 기준으로 좀 더 심도

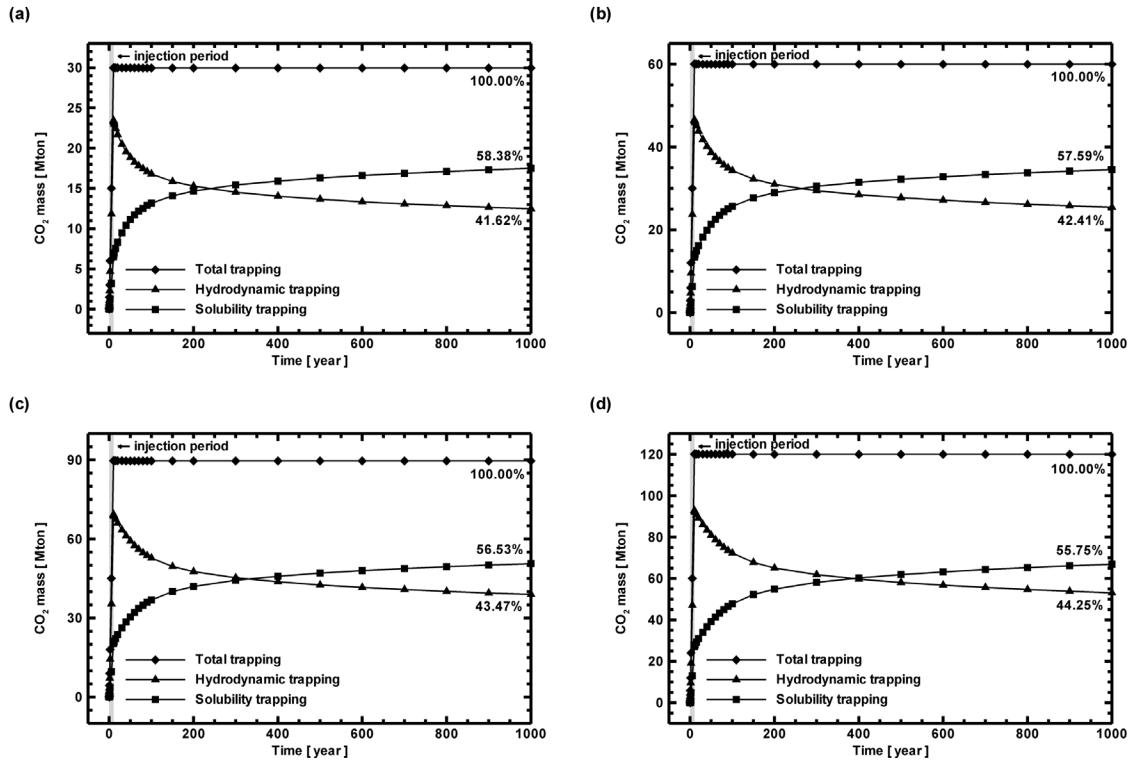


Fig. 8. Temporal changes in masses of CO₂ stored by hydrodynamic and solubility trapping mechanisms in Area B for (a) Case B-1, (b) Case B-2, (c) Case B-3, and (d) Case B-4.

가 얇은 곳까지 이산화탄소가 이동한다. 이와 같은 이산화탄소 거동 양상을 종합하여 이산화탄소 저장 용량을 산정하는 방법을 동적 수치 모델링 기반 선정 방법(dynamic numerical simulation based estimation method)이라 한다(e.g., Lindeberg *et al.*, 2009; SCCS, 2011; Smith *et al.*, 2011).

본 연구에서 수행된 수치 모델링 결과들은 지역 A에서는 40 Mton, 지역 B에서는 120 Mton까지 각각 해저면으로의 누출 없이 이산화탄소가 주입 및 저장될 수 있음을 보여준다(그림 3, 4, 6, 7). 즉 지역 A 및 지역 B에서 선정된 자유 유체상의 이산화탄소 유효 저장 용량까지는 이산화탄소 지중 저장이 가능함을 의미한다. 다만 지역 B에서 120 Mton 주입 시에 이산화탄소가 모델링 영역의 측면 경계까지 도달하는데(그림 6g, 7d) 이러한 모델링 영역의 측면은 대부분 퇴적암층이 계속 연장되며, 일부 지역에서 기반암과 접한다. 따라서 향후 지중 저장 용량 평가와 연계하여 이러한 모델링 영역의 측면 경계의 특성에 대한 추가적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

선행 연구에서 선정된 수용액상 이산화탄소의 유효 저장 용량은 자유 유체상 이산화탄소의 유효 저장 용량에 대하여 지역 A와 지역 B에서 각각 6.58%, 6.32%에 불과하다. 그러나 수치 모델링 결과에서는 1,000년 후 전체 이산화탄소 주입량 대비 용해 포획된 이산화탄소의 비율이 지역 A와 지역 B에서 각각 60.65~65.10%, 55.75~58.38%로 매우 높으며, 시간이 지남에 따라서 지속적으로 증가하는 양상을 보여준다(그림 5, 8). 이러한 차이는 크게 두 가지 원인에 의한 것으로 해석된다. 먼저 자유 유체상 이산화탄소는 그 포화도가 모든 지역에서 1.0이 되지 못하며, 주입 종료 후 오랜 시간이 지나게 되면 넓은 영역에 걸쳐서 매우 낮은 값을 가지는 반면에 지하수에 용해된 이산화탄소의 질량 분율은 넓은 영역에 걸쳐서 해당 환경(지중 유체 압력 및 온도와 염분 농도) 하의 용해도의 최대값에 거의 근접하는 값을 가진다. 그리고 자유 유체상 이산화탄소는 부력에 의해 저장암의 최상부에 위치하는 반면 수용액상 이산화탄소는 지하수 밀도차에 의한 대류 현상으로 저장암의 상하부 전체에 걸쳐서 존재할 수 있다. 즉 실제로는 공극 부피를 자유 유체상 및 수용액상 이산화탄소가 차지하는 비율이 위와 같이 달라질 수 있음에도 불구하고 같은 저장 효율을 사용하였기 때문에 선행 연구 결

과와 본 연구의 결과 간에 차이가 나타나는 것이다. 앞에서 언급된 비교 및 분석 결과들을 종합하여 보면 수용액상 이산화탄소의 저장 효율이 자유 유체상 이산화탄소 저장 효율에 비해서 상당히 높을 수 있음을 의미한다. 따라서 분지 및 부지 규모의 이산화탄소 유효 저장 용량 평가 시에는 이러한 이산화탄소 상에 따른 저장 효율의 차이가 반드시 고려되어야 한다.

6. 결론

본 연구에서는 국내 이산화탄소 지중 저장 유망 연안 퇴적분지 중 하나인 북평분지 내의 대상 지층에 주입된 이산화탄소의 거동을 예측 및 분석하기 위하여 일련의 열-수리학적 모델링을 수행하였다. 먼저 북평분지의 이산화탄소 지중 저장 용량 예비 평가와 정성적인 부지 선정 예비 평가를 수행한 선행 연구 결과를 바탕으로 지역 A 및 지역 B를 연구 대상 지역으로 선정하고 기반암과 퇴적층의 삼차원 분포를 종합적으로 고려하여 각 지역의 수치 모델링 영역을 결정하였다. 그리고 이 지역들에 대하여 지층의 공간적 분포뿐만 아니라 지질 구조를 현실적으로 반영하는 삼차원 지층 모델을 작성하였다. 이렇게 작성된 삼차원 지층 모델을 기반으로 다상 열-수리학적 수치 모델을 이용하여 이산화탄소 주입에 의한 대상 지층 내의 지하수 및 이산화탄소 유동과 열 이동 현상을 예측 및 분석하였으며, 이산화탄소 주입량의 변화에 따른 민감도를 분석하였다. 수치 모델링 결과들은 이산화탄소의 삼차원 거동 양상이 지층의 구조(층상 구조) 및 공간적 분포와 수리학적 물성(고유투수계수의 이방성 등)의 영향을 크게 받음을 보여준다. 먼저 주입된 이산화탄소는 두 지역 모두에서 저장암인 C-4층이 분포한 곳을 따라서 수평 이동하며, 일부분의 이산화탄소는 주입정 주변에서 오랜 시간에 걸쳐서 상부로 이동하여 덮개암인 C-3층의 하부까지 이른다. 지역 A에서는 이산화탄소가 서쪽과 남쪽 방향의 두 갈래로 나뉘어 이동하는 양상이 나타나는 반면 지역 B에서는 이산화탄소가 동심원상으로 이동하다가 서쪽 방향으로 고도가 낮은 지역을 향하여 급격하게 이동하는 양상이 나타난다. 두 지역 모두 이산화탄소 주입량이 증가할수록 이산화탄소의 영향 범위가 증가하며, 해수면 기준으로 좀 더 심도가 얇은 곳까지 이산화탄소가 이동한다. 지역 A에서는 40 Mton,

지역 B에서는 120 Mton을 각각 주입하여도 모델링 영역의 상부(해저면)로의 이산화탄소 누출은 발생하지 않는다. 이는 각 지역의 선행 연구 결과에서 제시된 자유 유체상의 이산화탄소 유효 저장 용량까지는 이산화탄소 지중 저장이 가능함을 의미한다. 한편 시간이 지남에 따라서 자유 유체상 이산화탄소는 지하수에 용해되어 수용액상 이산화탄소로 변화하며, 이에 따라서 수리동역학적 포획된 이산화탄소는 감소하고 용해 포획된 이산화탄소는 증가한다. 주입량이 증가할수록 수리동역학적 포획의 효율은 소폭 증가하고 용해 포획의 효율은 소폭 감소하지만 주입량에 따른 큰 차이가 나타나지는 않는다. 1,000년 이후에 지역 A에서는 60.65~65.10%, 지역 B에서는 55.75~58.38%의 이산화탄소가 수용액상으로 존재한다. 수치 모델링에서 산정된 용해 포획된 이산화탄소의 질량은 선행 연구 결과에서 제시된 수용액상의 이산화탄소 유효 저장 용량에 비해 매우 큰 값을 보여준다. 이것은 수용액상 이산화탄소의 저장 효율이 자유 유체상 이산화탄소 저장 효율에 비해서 더 높음을 의미한다. 따라서 분지 및 부지 규모의 이산화탄소 유효 저장 용량 평가 시에는 이러한 이산화탄소 상에 따른 저장 효율의 차이가 반드시 고려되어야 한다. 본 연구에서는 북평분지 내의 두 지역에 대하여 삼차원 지층 모델을 작성하고 이산화탄소 주입량의 변화에 따른 이산화탄소 거동 양상을 예측 및 분석하였으며, 이를 대상 지역들의 이산화탄소 저장 용량 평가와 연계하여 해석하였다. 이러한 해석 방법 및 연구 결과들은 향후 북평분지 또는 국내의 다른 육상 및 연안 퇴적분지에서 이산화탄소 지중 저장 프로젝트를 수행 시 대상 지층의 성능을 정량적으로 평가할 때에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

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 구민호 교수님과 김태희 박사님께 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Carsel, R.F. and Parrish, R.S., 1988, Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resources Research*, 24, 755-769.
- CMG (Computer Modelling Group), 2009, GEM-GHG user's guide: Advanced compositional and GHG reservoir simulator, version 2009. Technical Report, Computer Modelling Group (CMG), Calgary, Canada, 1123 p.
- Domenico, P.A. and Schwartz, F.W., 1990, *Physical and Chemical Hydrogeology*. John Wiley and Sons, New York, USA, 824 p.
- Fetter, C.W., 1994, *Applied Hydrogeology*, third edition. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA, 691 p.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A., 1979, *Groundwater*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 604 p.
- Holloway, S., 1997, An overview of the underground disposal of carbon dioxide. *Energy Conversion and Management*, 38, 193-198.
- Isaaks, E.H. and Srivastava, R.M., 1989, *Applied Geostatistics*. Oxford University Press, Oxford, UK, 561 p.
- Johnson, J.W., Nitao, J.J. and Knauss, K.G., 2004, Reactive transport modeling of CO₂ storage in saline aquifers to elucidate fundamental processes, trapping mechanisms, and sequestration partitioning. In: Baines, S.J. and Worden, R.H. (eds.), *Geological Storage of Carbon Dioxide*, Special Publications, No. 233. Geological Society of London, UK, 107-128.
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2004, Study on the techniques for gas hydrate exploration and development. Final Report KR-04(c)-09, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon, Korea, 525 p (in Korean with English abstract).
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2005, Mid- and long-term planning of research and development on geothermal resources utilization technologies. Final Report 2004-R-NC02-P-01-0-000, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon, Korea, 104 p (in Korean with English abstract).
- Kihm, J.H. and Kim, J.M., 2007, Numerical simulation of behavior characteristics and trapping mechanisms of carbon dioxide injected into a deep saline aquifer for geologic storage. Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstracts), Chuncheon, October 25-26, 69 p (in Korean).
- Kihm, J.H. and Kim, J.M., 2008, Numerical simulation of thermo-hydro-mechanical stability evaluation of carbon dioxide geologic storage with various character-

- istics of geologic structures and injection locations. Annual Conference of the Korean Society of Economic and Environmental Geology (Abstracts), Seoul, April 23-25, 83 p (in Korean).
- Kihm, J.H. and Kim, J.M., 2010, Evaluation of impacts of hydrological properties of geologic formations on injection efficiency of carbon dioxide. Annual Spring Conference of the Korean Society of Engineering Geology (Abstracts), Gyeongju, April 8-9, 161-167 p (in Korean).
- Kihm, J.H., Park, S.U. and Kim, J.M., 2011, Evaluation of injection efficiency of carbon dioxide using an integrated injection well and geologic formation numerical simulation scheme. Annual Fall Conference of the Korean Society of Engineering Geology (Abstracts), Jeongseon-Gun, November 10-11, 65-68 p (in Korean).
- Kihm, J.H., Park, S.U. and Kim, J.M., 2012a, Evaluation of carbon dioxide plume injected in the Gyeongsang Basin, Korea. Second Korea CCS Conference (Abstracts), Jeju, March 14-16 (in Korean).
- Kihm, J.H., Park, S.U. and Kim, J.M., 2012b, Impacts of geochemical characteristics of formation system on injection efficiency of carbon dioxide using numerical simulation. Annual Conference of the Korean Society of Economic and Environmental Geology (Abstracts), Goseong-Gun, April 18-20, 65 p (in Korean).
- Kihm, J.H., Kim, J.M., Wang, S. and Xu, T., 2012c, Hydrogeochemical numerical simulation of impacts of mineralogical compositions and convective fluid flow on trapping mechanisms and efficiency of carbon dioxide injected into deep saline sandstone aquifers. *Journal of Geophysical Research*, 117, B06204.
- Kim, H.C. and Lee, Y., 2007, Heat flow in the Republic of Korea. *Journal of Geophysical Research*, 112, B05413.
- Kim, H.M., Cheon, D.S., Park, E.S., Shin, J.H. and Huh, D.G., 2011, Evaluation of injection pressure and interpretation of long-term mechanical stability of storage structure in the process of geologic storage of carbon dioxide. Annual Conference of the Korean Society of Economic and Environmental Geology (Abstracts), Mokpo, April 27-29, 271 p (in Korean).
- Kim, J.M., 2008, Development and application of a fully coupled multiphase numerical model for thermo-hydro-mechanical analysis of optimal geologic sequestration of carbon dioxide. Final Report M102KP010017-07K1601-01710, Seoul National University, Seoul, Korea, 131 p (in Korean with English summary).
- 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., 2011a, Integrated prediction and analysis of performance of target geologic formation systems for geologic storage of carbon dioxide. Annual Report 2010T100100500, Seoul National University, Seoul, Korea, 72 p (in Korean).
- Kim, J.M., 2011b, Field application and practicalization of a generalized multidimensional hydrodynamic dispersion numerical model. Final Report, Seoul National University, Seoul, Korea, 132 p (in Korean with English summary).
- Kim, J.M., 2012, Development of technologies for risk analysis of geologic storage of carbon dioxide and performance improvement of target geologic formation systems. Annual Report 16-2011-01-002-00, Seoul National University, Seoul, Korea, 163 p (in Korean with English summary).
- Kim, K.Y., Kim, T., Kim, J.C. and Han, W.S., 2009, Numerical study on pressure variation due to subsurface CO₂ injection. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45, 435-448 (in Korean with English abstract).
- Kwon, Y.K., 2005, Sequence stratigraphy of the Taebaek Group (Cambrian-Ordovician), Mideast Korea and seismic stratigraphy of the western South Korea Plateau, East Sea. Ph.D. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, 205 p.
- Kwon, Y.K., 2011, Geological survey and assessment technology development of CO₂ storage formation adjacent to CO₂ capture facility. Annual Report 2010201020001C, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, Korea, 73 p (in Korean).
- Kwon, Y.K., Yoon, S.H. and Chough, S.K., 2009, Seismic stratigraphy of the western South Korea Plateau, East Sea: Implications for tectonic history and sequence development during back-arc evolution. *Geo-Marine Letters*, 29, 181-189.
- 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.
- Lindeberg, E., Vuillaume, J.F. and Ghaderi, A., 2009, Determination of the CO₂ storage capacity of the Utsira formation. *Energy Procedia*, 1, 2777-2784.
- Litynski, J., Rodosta, T., O'Dowd, W. and Fernald, W., 2011, Best practices for risk analysis and simulation for geologic storage of CO₂, version 1.0. Technical Report DOE/NETL-2011/1459, National Energy Technology Laboratory (NETL), Washington, DC, USA, 65 p.
- Litynski, J., Rodosta, T. and Brown, B., 2012, Best practices for monitoring, verification, and accounting of CO₂

- stored in deep geologic formations - 2012 update, second edition. Technical Report DOE/NETL-2012/1568, National Energy Technology Laboratory (NETL), Washington, DC, USA, 136 p.
- Metz, B., Davison, O., de Coninck, H., Loos, M. and Mayer, L.A. (eds.), 2005, Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 431 p.
- Narasimhan, T.N. and Witherspoon, P.A., 1976, An integrated finite difference method for analyzing fluid flow in porous media. *Water Resources Research*, 12, 57-64.
- NETL (National Energy Technology Laboratory), 2007, Carbon sequestration atlas of the United States and Canada. Technical Report, 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. Technical Report, National Energy Technology Laboratory (NETL), Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 160 p.
- Oh, J.H., Kim, K.Y., Kim, T. and Kim, J.C., 2010, Simulation of salt precipitation characteristics due to carbon dioxide injection into geologic formation. Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstracts), Gyeongju, October 27-30, 311 p (in Korean).
- Oh, J.H., Kim, K.Y., Kim, T. and Kim, J.C., 2011, Impacts of injection well arrangement on geologic storage of carbon dioxide. Annual Conference of the Korean Society of Economic and Environmental Geology (Abstracts), Mokpo, April 27-29, 248 p (in Korean).
- Park, E., Han, W.S., Jeong, J. and Jun, C.P., 2011, Evaluation of leakage potential of carbon dioxide in the hypothetical site of geologic storage using Monte Carlo simulation. Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstracts), Seogwipo, October 26-29, 88 p (in Korean).
- Park, S.U., Kihm, J.H. and Kim, J.M., 2011, Evaluation of land deformation and stability changes due to geologic storage of carbon dioxide using thermo-hydro-mechanical numerical model. First Korea CCS Conference (Abstracts), Jeju, April 13-15 (in Korean).
- Park, Y.C., Yoo, D.G., Sung, W.H., Hwang, S.H. and Park, K.G., 2009, Core technology development for sequestration of CO₂ in marine subsurface. Third Inter-Agency Workshop on Climate Change Response R&D Program (Abstracts), Seogwipo, January 14-17 (in Korean).
- Pruess, K., Oldenburg, C. and Moridis, G., 1999, TOUGH2 user's guide, version 2.0. Technical Report LBNL-43134, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, USA, 198 p.
- Rutqvist, J., Wu, Y.S., Tsang, C.F. and Bodvarsson, G., 2002, A modeling approach for analysis of coupled multiphase fluid flow, heat transfer, and deformation in fractured porous rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39, 429-442.
- SCCS (Scottish Carbon Capture and Storage), 2011, Progressing Scotland's CO₂ storage opportunities. Technical Report, Scottish Carbon Capture and Storage (SCCS), Edinburgh, UK, 60 p.
- Smith, D.J., Noy, D.J., Holloway, S. and Chadwick, R.A., 2011, The impact of boundary conditions on CO₂ storage capacity estimation in aquifers. *Energy Procedia*, 4, 4828-4834.
- 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.
- van Genuchten, M.Th., 1980, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.
- White, M.D. and Oostrom, M., 2006, STOMP user's guide: Subsurface transport over multiple phases, version 4.0. Technical Report PNNL-15782, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington, USA, 108 p.
- White, S.P., Allis, R.G., Moore, J., Chidsey, T., Morgan, C., Gwynn, W. and Adams, M., 2005, Simulation of reactive transport of injected CO₂ on the Colorado Plateau, Utah, USA. *Chemical Geology*, 217, 387-405.
- Won, C.K., Park, B.K. and Lee, S.H., 1994, Geological report of the Samchok-Gosari sheets (1:50,000). Korea Institute of Geology, Mining and Materials, 21 p (in Korean with English abstract).
- Xu, T., Zheng, L. and Tian, H., 2011, Reactive transport modeling for CO₂ geological sequestration. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 78, 765-777.
- Zhang, W., Li, Y., Xu, T., Cheng, H., Zheng, Y. and Xiong, P., 2009, Long-term variations of CO₂ trapped in different mechanisms in deep saline formations: A case study of the Songliao Basin, China. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 3, 161-180.

투 고 일 : 2013년 5월 29일

심 사 일 : 2013년 6월 5일

심사완료일 : 2013년 6월 27일