동해 울릉분지 남서 주변부의 이산화탄소 저장 용량 예비 평가

김유리¹ · 이금석² · 조소현¹ · 김민준¹ · 김종수¹ · 박명호^{1*}

¹한국석유공사 석유개발연구원(EPTI), ²글로벌기술지원센터(GTRC)

A Preliminary Evaluation on CO₂ Storage Capacity of the Southwestern Part of Ulleung Basin, Offshore, East Sea

Yulee Kim¹, Keumsuk Lee², Sohyun Jo¹, Minjun Kim¹, Jong-Soo Kim¹ and Myong-ho Park^{1*}

¹E&P Technology Institute, Korea National Oil Corporation, Anyang, Gyeonggi-do 431-711, Korea

²Global Technology & Research Centre, 330 5th Avenue SW, Calgary, Canada T2P 0L6

A theoretical CO₂ storage capacity is estimated on the southwestern continental shelf margin of Ulleung Basin, offshore Korea using 2D/3D multi-channel seismic and wellbore data acquired in the area over the two decades since the late 1980s. For the first time in Korea, the present study applies an efficiency factor to the capacity calculation, together with the other required parameters. For possible CO₂ storage volume estimation of the study area, we interpreted the seismic data in the Gorae area from 800 m to 3,000 m below the seafloor integrated with the well data, and identified five different seismic units; the limited depth interval is considered because of fluid state of CO₂ and tightness of the formation. The total volumes of each seismic unit were converted with a time-depth relation inferred from the checkshot surveys before the other required parameters including porosity and density were applied to compute the potential storage capacity. The accumulated possible storage volume from the five depositional units in the study area is estimated to be approximately 5,100 Mton (P₅₀). The approaches made in this study will be applied to the rest area of the basin and other continental shelves (i.e., Yellow Sea and northern part of East China Sea) in the next phase.

Key words : CO₂ storage capacity, seismic unit, Ulleung Basin, East Sea

이 연구에서는 방대한 양의 2D/3D 탄성과 자료와 시추공 자료에 대한 분석결과를 토대로 국내 최초로 대륙붕 해양분지 내 퇴적환경에 대한 저장 효율 계수를 적용하여 동해 울릉분지 남서 주변부에 대한 이산화탄소 저장 능력을 개략적으로 평가하였다. 저장 능력 평가의 중요 인자인 퇴적체의 파괴 계산을 위해 유효 구간(800 m ~ 3,000 m) 내 탄성과 해석을 실시한 결과 지중저장지층으로 활용될 수 있는 5개의 퇴적 단위를 확인하였으며 시추공 자료를 이용하여 심도 보정 후 필요 매개 변수와 함께 저장 능력을 평가하였다. 산정된 이산화탄소 저장 가능 용량은 P₅₀ 기준 51억톤으로 이는 동해 울릉분지 남서 주변부 유효구간 내 전체 퇴적체를 대상으로 이산화탄소 지중저장을 가정한 경우이다. 이 연구 결과를 토대로 향후 정밀 분석을 통하여 보다 실증적인 저장 능력이 제시될 것이며, 저장 능력 산정을 위한 이러한 접근 방법은 서·남해 대륙붕에도 동일하게 적용되어 한반도 주변 해역의 이산화탄소 지중 저장 능력 평가를 위한 규격화된 모델을 제시할 것이다.

주요어 : 이산화탄소 저장용량, 퇴적 단위, 울릉분지, 동해

1. 서 언

지구온난화의 주요 원인으로 간주되고 있는 이산화

탄소의 국내 대륙붕 지중저장 가능성이 제시됨에 따라 동해 울릉분지 남서주변부에 대한 관심이 고조되고 있다(Fig. 1; Park *et al.*, 2009a, 2009b). 동 지역은 서·

*Corresponding author: myongho@knoc.co.kr

Fig. 1. Location map of multi-reflection seismic lines and boreholes drilled in the study area.

남해에 비해 상대적으로 탐사성숙도가 높으며 장기간 탐사활동으로 축적된 다량의 자료 활용이 가능하므로 국내 대륙붕 지역 중 이산화탄소 지중저장 연구를 할 수 있는 최적지로 여겨진다. 이 지역에서는 발견된 유·가스 관련 구조와 심부 대염수층(saline aquifer)이 잠재적 이산화탄소 지중저장 후보지로 고려될 수 있다.

발견된 구조 중 상업적 생산을 하고 있는 국내 유일의 가스전(동해-1)이 고갈될 경우 이산화탄소를 주입하여 회수증진을 고려할 수 있으며, 이 지역에서 발견된 소규모 가스배태 구조와 연계된 대염수층에 이산화탄소 주입과 동시에 경제성 확보를 전제로 가스의 개발·생산에 도모할 수 있다(Oldenburg *et al.*, 2001). 이 지역은 대부분이 대륙붕 환경으로 최소 3 km 이상의 두꺼운 퇴적물이 집적되었으며(Chough and Barg, 1987; Chough *et al.*, 2000; Yoon *et al.*, 2003), 불투수성 지층에 둘러싸인 사암질 퇴적체 내의 대염수층 등이 확인되면 이산화탄소를 주입하여 영구 저장할 수 있을 것으로 추정하고 있다(Hovorka *et al.*, 2004).

동해 울릉분지 남서주변부에 대한 기존의 이산화탄소 지중저장 평가는 특정 지역에 제한되거나 개략적으로 실시되어왔다. 예를 들면, 현재 생산 중인 고래-V 구조에 대한 저장 용량 평가를 실시하여 총 1억5천만 톤 규모를 제시한 사례와 이 지역에 대한 광역적 시뮬레이션실험을 통하여 연 100만톤 이상의 저장용량을 추산한 경우가 대표적이다(Park *et al.*, 2009a). 따라서

이 지역의 가용한 석유탐사 자료를 활용하여 체계적이고 다각적인 접근방법으로 저장 용량 평가를 수행할 필요가 있다.

한국석유공사는 현재 국내 해양 퇴적분지(울릉분지, 군산분지, 제주분지)에 대한 이산화탄소 지중 저장소 정밀 탐색 및 잠재 저장 용량 평가를 통한 데이터베이스 구축 작업을 수행하고 있다. 이 연구의 목적은 울릉분지 남서주변부의 지하 지층 내에 이산화탄소 지중 저장 부지를 물색하여 잠재 저장 용량을 평가하는 데 있다. 저장 용량 평가 대상 규모는 기존의 연구에 비해 폭넓은 지역과 심도를 다루며, 이를 통해 가장 유력한 이산화탄소 지중저장 후보지에 대한 잠재 저장 용량 분석 예비 결과를 제시하고자 한다.

2. 지질개요

연구 지역은 울릉분지의 남서 주변부(면적: 약 13,000 km²)로서, 이 지역의 지질은 지구조적으로 울릉분지의 생성과 관계가 있다(Fig. 1). 울릉분지는 후기 올리고세에서 초기 마이오세동안 분지열개에 의해 생성된 후열도 분지(backarc basin)이다(Lee *et al.*, 1999). 중기 마이오세 말에 동으로는 태평양 판, 남으로는 필리핀 판에 의한 횡압력이 작용하여 분지가 부채꼴 모양으로 닫히고 한반도와 일본 열도 사이에서 구조적인 변형이 일어났다(Kim *et al.*, 2007). 구조 운동의 직접적인 영향을 받은 돌고래 지역과 상대적으로

Fig. 2. Structural outline and bathymetry of the study area. Contours in meters.

그 영향이 적은 고래지역으로 구분한다(Fig. 2).

이 지역은 현재 대륙붕과 대륙사면으로 이루어져 있으며 퇴적층의 연령은 마이오세로부터 현재에 이르고 있다(Fig. 2; Yoon *et al.*, 2003). 마이오세 초기에 발생한 급격한 침강에 이어 다량의 쇄설성 퇴적물이 유입되었으며, 퇴적층은 상대적 해수면 변동에 민감하게 반응하여 전진퇴적(progradation)과 후퇴퇴적(retrogradation)이 반복적인 누적행태를 보이고 있다(Chough *et al.*, 2000; Yoon and Hwang, 2009). 이로 인해 육성-천해-대륙붕-대륙사면-분지저에 이르는 다양한 퇴적환경 기원의 퇴적체가 형성되었으며 퇴적물 두께는 북동쪽으로 갈수록 증가하여 4 km 이상 최대 10 km에 이른다(Yoon *et al.*, 2003). 이후 마이오세 중기에 후배호(backarc)가 닫히며 받은 북서 방향의 횡압력으로 인해 침강물이 급격히 저하됨과 동시에 연구지역의 남동부에 중소 규모의 용기대가 발달하였으며 용기층이 삭박되어 대륙붕 환경에 재퇴적되었다(Fig. 2; Yoon and Hwang, 2009). 마이오세 후기에는 압축 구조 운동 완료에 이은 해퇴로 인해 노출된 퇴적층이 삭박되었으나 플라이오세-현재 동안에 열적 침강과 해수면의 상승으로 퇴적물이 주로 천해환경에 집적되었다(Yoon and Hwang, 2009). 울릉분지 퇴적층의 최상부는 후기 플라이스토세 시기의 저탁류층과 홀로세 시기의 반원양성 이질퇴적물이 교호하는 층으로 구성되어 있으며(Park *et al.*, 2003, 2007), 울릉분지 서쪽은 MIS(Marine Isotope Stage) II 시기에 퇴적물이 높게 나타나는데 이는 해수면 변동에 따른 사면으로부터의 퇴적물 유입과 관련이 있는 것으로 추정된다(Park *et al.*, 2006).

3. 탄성과 자료 분석

탄성과 해석은 울릉분지 남서 주변부에서 취득한 2차원(약 8,500 L-km) 및 3차원(약 2,400 km²) 탄성과 자료 및 시추공 자료를 이용하였다(Fig. 1). 탄성과 자료는 취득 년도가 다르지만 해석 가능한 양호한 품질을 가지고 있으며 시추공 자료는 공 별로 다양한 물리 검층을 하였으나, 이 연구에서는 공극 및 투수율 관련 검층 자료(예, gamma, sonic, neutron-density)를 사용하였다.

탄성과 해석은 석유 탐사에 널리 적용되는 해석 방법을 적용하였으며(Mitchum and Vail, 1977) 해석 범위는 상대적으로 변형이 적은 고래 지역과 횡압력의 영향을 받은 일부 돌고래 지역으로 제한하였다(Fig. 2). 이 연구에서는 부정합면을 경계로 하는 퇴적 시퀀스

단위의 광역적 층서 해석에 중점을 두었으며, 이산화탄소 저장 가능 부피 산정에 필요한 퇴적체 단위 구분 및 형태 분석을 중심으로 연구를 수행하였다.

분석 대상 구간의 상부 경계는 미국의 NETL(National Energy Technology Laboratory)에서 제안한 해저면 이하 800 m이며(NETL, 2010), 하부 경계는 공극율 및 투수율이 급격히 감소하는 깊이인 3,000 m(SEI, 2002)로 제한하였고 탄성과 단면상 왕복 주시 범위는 평균 0.9초에서부터 2.4초이다(Fig. 3). 탄성과 단면상 층서 해석 대상 구간은 음향기반암(acoustic basement)

Fig. 3. Variation in permeability with depth. Note that the permeability significantly decreases at around 3,000 m in depth.

Fig. 4. An interpreted seismic profile showing the seismic sequences below the seafloor.

으로부터 해저면(seafloor)에 이르고, 동 구간 내에 총 10개의 이산화탄소 저장 대상 탄성과 퇴적 시퀀스(SU)를 확인 하였다(Fig. 4).

4. 이산화탄소 저장 능력 평가 기준

현재까지 심부 대염수층을 대상으로 연구된 이산화탄소 지중 저장 용량 산정은 미국의 NETL(2010)과 국제기구인 CSLF(Carbon Sequestration Leadership Forum)에서 제시한 방법이 대표적이며(CSLF, 2007), 대염수층의 총 공극 부피(Total Pore Volume)를 이산화탄소 저장 공간으로 환산하는 것은 큰 차이가 없으나 주입 가능한 이산화탄소의 양에 관한 매개변수 산정에 대한 접근은 다르다.

CSLF가 제시한 방법은 대상지층의 부동수포화율(irreducible water saturation)을 고려하며, 지중 압력 변화에 따른 이산화탄소의 밀도를 적용하여 유효한 저장 질량(mass capacity)의 범위를 구한다. 이 계산 방법에서 용량 계수(capacity coefficient)는 구조트랩의 저류암 균질도, 이산화탄소의 부력과 확산률 등을 고려하고 있지만 구체적인 수치는 제시되지 않고 있다. 이에 반해 NETL의 평가 방법은 모든 종류의 트랩을 포함하는 대염수층 부피에 대한 이산화탄소의 주입량을 산정하며, 저장 효율 계수는 이산화탄소의 지중 저장에 영향을 미치는 매개변수들에 대해 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 범위값을 산출한다(Table 1).

NETL의 방법에서는 부동수포화율을 별도로 고려하지 않으나, 저장 효율 계수 산출 과정에서 공극 내의 이산화탄소 이동 효율(displacement efficiency)에 해당하는 매개변수에 그 의미가 포함되어 있다(Table 1;

CSLF, 2007). 따라서 이 연구에서는 NETL의 계산식에 따라 이산화탄소 저장 능력을 평가하였다.

5. 이산화탄소 저장 능력 계산

5.1. 대염수층의 부피 산정

해석한 퇴적 단위별 경계면을 시추공 자료에 근거하여 심도변환(time-depth conversion)을 한 다음 등층 후도를 작성하여 퇴적 시퀀스 단위별 부피값(bulk rock volume)을 얻었다(Fig. 5). 석유 매장량 산정과 같이 퇴적 단위의 부피는 저장 능력 평가의 가장 중요한 요소이다. 탄성과 해석으로 얻어진 부피에 필수 매개 변수를 곱하여 식(1)에 따라 유효 저장 질량을 산정하였다.

$$M_{CO_2} = A \times h \times \phi \times \rho_{CO_2} \times E \quad (1)$$

M_{CO_2} : 유효 저장 질량

A : 트랩 가능한 대염수층의 면적

h : 트랩 가능한 대염수층의 평균 두께

ϕ : 대염수층 내 공극률

ρ_{CO_2} : 지중에서의 이산화탄소 평균 밀도

E : 저장 효율 계수

5.2. 공극률, 밀도, 저장 효율 계수 산정

탄성과 해석 자료를 통해 구한 대염수층 부피에 대해 공극률과 지중 평균 이산화탄소 밀도, 저장 효율 계수를 적용하였다. 공극률은 시추공 검층 자료 또는 시추시료로부터 측정된 결과를 외삽 후 평균값을 계산하고, 이산화탄소의 밀도는 취득한 검층자료로부터 대염수층의 예상 압력과 온도를 이용하여 구하였다.

저장 효율 계수는 NETL(2010) 계산식의 변수 중의

Table 1. Terms included in storage efficiency factor for saline formations (NETL, 2010)

	Term	Description
Geologic parameters	$E_{An/AI}$	Net to total area ratio, fraction of the total basin area suitable for CO ₂ storage
	$E_{hm/hg}$	Net to gross thickness, fraction of the total geologic unit meets minimum porosity and permeability requirements for injection
	$E_{\phi e/\phi t}$	Effective to total porosity, fraction of total interconnected porosity
Displacement parameters	E_A	Areal displacement efficiency, fraction of planar area surrounding the injection well CO ₂ can contact, influenced by heterogeneity and CO ₂ mobility
	E_L	Vertical displacement efficiency, fraction of vertical cross section or thickness with the volume defined by the area can be contacted by the CO ₂ plume from a single well, affected by the aquifer dip and CO ₂ buoyancy
	E_g	Gravity displacement efficiency, fraction of net thickness contacted by CO ₂ as a consequence of the density and mobility difference between CO ₂ and in-situ water
	E_d	Microscopic displacement efficiency, fraction of water-filled pore volume can be replaced by CO ₂ , directly related to irreducible water saturation

Fig. 5. Isopach maps of the interpreted seismic units: SU2 (A), SU3 (B), SU4 (C), and SU5 (D).

하나로서 대염수층의 공극 내 실제로 이산화탄소를 저장할 수 있는 비율에 해당하는 개념으로 총 7개의 매개변수가 요구된다(Table 1). 이 연구에서 저장 효율 계수는 모든 탄성과 퇴적 시퀀스 단위에 대해 대염수층을 간극체(porous media)라고 가정하였으며 사암 비율(net to gross ratio)을 고려하지는 않았다. 연구지역이 대륙붕 퇴적 환경이 우세한 것으로 해석되므로 이 환경에 해당하는 각각의 매개변수에 대하여 EERC(2009)에서 제시한 값을 사용하였으며 몬테카를로 시뮬레이션을 적용한 결과 P_{10} 과 P_{50} , P_{90} 에 대해 각각 2.2%,

5.5%, 13.7%를 도출하였다(Table 3).

6. 연구 결과

6.1. 퇴적 단위의 해석

이 연구에서는 탄성과 해석으로 10개의 퇴적 단위(SU)와 11개의 경계면(SB)을 정의하였다. 이들 중 초임계 상태의 이산화탄소 주입 및 상부의 덮개암 존재 가능 여부를 고려하여 천부 5개(SU 6~10)를 제외한 나머지 심부 5개의 퇴적 단위(SU 1~5)를 대상으로 저

Table 2. Parameters for each seismic unit

Seismic Unit	Area (km ²)	Bulk Rock Volume (km ³)	Porosity (%)	Total Pore Volume (km ³)	Average Depth (m)	CO ₂ Density (kg/m ³) Avg
1	50	12	0.20	2.4	2,450	625
2	411	203	0.10	20.3	2,480	628
3	670	298	0.10	29.8	2,290	622
4	998	372	0.18	67.0	2,480	626
5	1,145	199	0.15	29.9	2,360	623
Total	-	1,084	-	149.3	-	-

Table 3. Estimated storage volume for each seismic unit

Seismic Unit	P10 Theoretical storage capacity in Mt (E=2.2%)	P50 Theoretical storage capacity in Mt (E=5.5%)	P90 Theoretical storage capacity in Mt (E=13.7%)
1	33	83	206
2	280	701	1,747
3	408	1,019	2,539
4	922	2,305	5,743
5	409	1,023	2,548
Total	2,053	5,131	12,782

장 용량을 산정하였다(Table 2).

SU1

최하부의 퇴적 단위이며 하부와 상부 경계면은 음향 기반암과 UB1이다. 이 퇴적 단위는 국지적으로 발달된 정단층을 충전하는 열개동시성(syn-rift) 퇴적물로 해석되며 퇴적 단위중 최소 부피를 나타낸다.

SU2

SU2의 퇴적 단위 상하 경계는 UB1와 UB2이며 퇴적물의 두께 변화는 남북 방향의 선형 구조를 보이며 최대 800 m에 이른다(Fig. 5A). 이 퇴적물 분포는 하부의 열개동시성 단층의 국부적 재활성(reactivation)을 암시하며 남북 방향의 퇴적 구조는 대륙붕-대륙사면 환경이 발달하기 시작하면서 형성된 것으로 사료된다.

SU3

SU3의 퇴적 단위 상하 경계는 UB2와 UB3이며 퇴적물의 두께는 해석된 퇴적단위의 중심부로 갈수록 증가하는 경향을 보이나 SU2에 비해 비교적 고른 두께 분포를 갖는다(Fig. 5B). 대륙붕단(continental break)은 단조로운 남북 방향의 SU2에 비해 L자 형태를 이루어 남북 방향의 대륙붕단이 동쪽으로 7~8 km 전진한 것으로 보아 전 시대에 비해 퇴적물 유입량이 상대적으로 증가한 것으로 사료 되며, 북동-남서 방향의 대륙붕단은 남쪽으로부터의 횡압력을 의미하는 것으로 판단된다.

SU4

SU4의 퇴적 단위 상하 경계는 UB3과 UB4이며 이전의 퇴적층에 비해 고른 두께 분포(평균 두께 370 m)를 가지며 대륙 사면은 SU3에 비해 동쪽과 북쪽으로 10 km 이상 전진하여(Fig. 5C) 빠른 열적침강이 진행됨과 동시에 퇴적활동이 상대적으로 활발한 것으로 사료된다.

SU5

SU5의 퇴적 단위 상하 경계는 UB4와 UB5이며 퇴적층의 두께 변화는 이전 시대의 SU4에 비해 상대적으로 얇지만 넓은 분포를 갖으며 대륙붕단이 북쪽을 향해 멀리 전진하였다(Fig. 5D). 이는 열적 침강과 퇴적 작용이 상대적으로 감소하였으나 남쪽으로부터 횡압력이 지속적으로 작용하였음을 지시한다.

6.2. 저장 용량 평가

이번 연구에서는 앞서 제시한 대륙붕 쇄설성 퇴적암의 저장 능력 평가를 위하여 제안된 식과 산출된 매개변수를 이용하여 동해 울릉분지 남서부 대륙붕의 이산화탄소 저장 능력을 계산하였다. 이 연구에서 평가된 대륙붕의 퇴적 시퀀스 단위별 저장 능력은 Table 3과 같다.

저장 용량 평가 대상인 탄성과 퇴적 단위별 대염수층의 총 공극 부피는 2.4 km³에서 67 km³의 범위로 산정되며, 개별 단위의 평균 부피는 약 30 km³이다. 총 공극 부피가 가장 작은 대상 지층은 최하부 탄성과 퇴적 단위로 국지적인 음향기반암의 단층과 연계되어 범위가 상대적으로 제한적이다(Fig. 5A). 지층별 총 공극 부피의 상향 증가 경향은 이 지역의 지속적인 침강과 다량의 퇴적물 유입에 따라 대륙붕이 점진적으로 확장되었기 때문이다(Yoon and Hwang, 2009). 이 연구에서 평가된 대륙붕 환경의 쇄설성 퇴적물에 대한 이산화탄소 저장 능력은 약 20억톤(P₁₀)에서 128억톤(P₉₀)으로 추정되며 P₅₀기준으로는 약 51억톤이다.

7. 토 의

이번 연구는 주로 고래 구조 주변지역의 탄성과 자료를 해석하여 산출된 결과로서 돌고래 구조 주변 지역이 포함되지 않았다. 향후 지층의 상대적 변형이 심한 돌고래 지역에 대한 해석 결과를 추가하고 해당 지층

Fig. 6. Storage capacity classification proposed by CO2CRC (2008).

의 코어시료 분석을 통한 퇴적상(sedimentary facies)을 추가한다면 구체적인 퇴적 환경을 제시할 수 있으므로 보다 정확한 저장 용량 평가 결과가 예상된다. 이번 연구에서 산정된 저장 능력은 CO2CRC(2008)가 제안한 분류 기준(Fig. 6)의 총 공극 부피에 해당하는 범주이며 정밀 평가 후 보다 실증적인 값이 도출될 것이다.

이산화탄소 저장 능력 평가에 사용된 공극률, 투수율, 심도변환 속도는 연구 지역에서 취득된 시추공 자료의 평균치로서 향후 정밀 평가에는 퇴적 환경 및 심도를 고려한 값을 적용하여 저장 능력 평가의 신뢰도를 제고할 필요가 있다. 또한 저장 능력 공간의 안정성에 필수 요소인 덮개암의 밀봉 능력을 확인하고 단층 및 시추공에 의해 이산화탄소가 누출될 위험성도 충분히 고려해야 한다(CO2CRC, 2008).

이 연구에서 각 지층별 저장 효율 계수는 대륙붕을 지시하는 제한적인 값을 사용 하였으나 퇴적 환경에 따라 가변적이므로(EERC, 2009) 연구지역에 대한 정밀분석(예, 탄성파시층서, 압층서, 생층서 등)을 통하여 퇴적 환경에 대한 신뢰도를 확보한 후 적용을 고려해야 한다. 예를 들면, 저장 효율 계수에 사용된 울릉분지 남서 주변부 대부분의 퇴적 구간은 시추공 시료의 퇴적상과 퇴적 구조를 분석해 보면 최소 30 m 보다 깊지 않은 조간대 또는 대륙붕의 천해 환경이었음을 알 수 있다(Choi, 2011). 그러나 생층서를 이용한 최근 연구에 의하면(Byun, 2011), 고래 I, I-1, VII-IX 등의 일부 시추공 심부 구간은 반심해대(bathyal zone)의 퇴적 환경으로 분석되었다. 이러한 결과를 반영한다면, CSLF(2007)의 저장 효율 계수는 P값에 따라 $\pm 20\%$ 정도 변하고 저장 용량도 P_{50} 기준으로 최대 20%까지 증가한다. 그러나 현재 분석된 결과는 추가적인 연구와 검증이 필요한 내용이므로 이번 저장용량

계산에서는 반영하지 않았다.

국내 대륙붕 해양 퇴적분지 내 이산화탄소 저장소 선정을 위한 예비 단계로서 진행된 이번 연구는 동해 울릉분지 남서부의 저장 능력 평가 결과를 제시하는데 그 의의가 있으며, 앞으로 진행될 정밀 분석을 통해 보다 실증적인 저장 능력이 평가 될 것이다. 또한 이번 연구에서 활용한 방대한 자료와 다각적인 접근 방법은 서·남해 대륙붕에도 동일하게 적용되어, 향후 이산화탄소 지중저장 능력에 대한 구체화된 모델 연구를 통하여 국내 해상의 주요 퇴적분지에 대한 저장용량 평가를 제시하려고 한다.

8. 결 론

1. 이 연구에서는 방대한 양의 탐사 자료를 이용하여 동해 울릉분지 남서주변부에 대한 이산화탄소 저장 능력을 평가했으며 국내 최초로 대륙붕 해양분지 내 퇴적 환경을 반영한 저장 효율 계수를 적용하였다.

2. 탄성과 해석을 통해 울릉분지 남서 주변부 대륙붕을 대상으로 이산화탄소 저장 능력이 예상되는 유효 구간(800 m ~ 3,000 m) 내에 5개의 퇴적 단위를 확인 하였으며 시추공 자료를 통합 활용하여 저장 능력을 평가 하였다. 산정된 저장 능력은 P_{50} 기준 51억톤으로 동해 울릉분지 남서부의 이산화탄소 지중저장 능력에 대한 가능성을 확인하였다.

3. 이번 연구는 국내 대륙붕 해양 퇴적분지 내 이산화탄소 저장소 선정을 위한 예비 단계로서 동해 울릉분지 남서부의 저장 능력 평가 결과를 제시하는데 그 의의가 있으며 향후 정밀 분석을 통해 보다 실증적인 저장 능력 평가를 수행할 것이다.

4. 이 연구에서 활용한 다각적인 접근 방법은 서·남해 대륙붕에도 동일하게 적용하여 국내 대륙붕의 이산화탄소 지중저장 능력 평가를 위한 최적화된 모델을 제시할 것이다. 나아가 이 연구를 통하여 이산화탄소 지중저장과 관련하여 대부분의 투자와 연구가 이산화탄소 포집에 치중되고 있는 현실에서 국내 대륙붕을 대상으로 하는 이산화탄소 저장소 조사 및 평가의 중요성에 대한 인식의 전환을 기대한다.

사 사

이 연구에서는 지식경제부 지원에 의한 국내 대륙붕 석유 탐사 개발 사업으로 취득한 자료를 분석에 활용 하였으며, 국토해양부 주관 하에 한국해양과학기술진흥

원의 지원에 의한 CO₂ 해양지중저장개발사업의 일환으로 수행되었습니다. 또한 국내외 위탁기관과의 공동연구(자연사연구소, 전남대, 호주 CO2CRC)와 자문(미국 Texas Univ. Austin/Dallas)을 통해 기술적 지원을 받았으며, 논문수정에 도움을 주신 석유공사 CCS 전담반 팀원들에게 감사드립니다. 또한 논문을 리뷰해주신 지질자원연구원의 권이균 박사님과 신영재 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

- Byun, H.S. (2011) Lithostratigraphic and biostratigraphic studies of carbon storage in Korean area (Undeformed area of Ulleung basin). Unpubl. Report for MLTM's CCS Project of KNOC, 391p.
- Choi, K.S. (2011) High-resolution analysis and stratigraphic architecture of reservoir rocks in Block VI-1, offshore SE Korea: Implication to the CO₂ storage potential of reservoir rocks. Unpubl. Report for MLTM's CCS Project of KNOC, 73p.
- Chough, S.K. and Barg, E. (1987) Tectonic history of Ulleung basin margin, East Sea (Sea of Japan). *Geology*, v.15, p.45-48.
- Chough, S.K., Lee, H.J. and Yoon, S.H. (2000) Marine Geology of Korean Seas. Elsevier 2nd edition, 313p.
- CO2CRC. (2008) Storage Capacity Estimation, Site Selection and Characterisation for CO₂ Storage Projects. Cooperative Research Centre for Greenhouse Gas Technologies, Canberra, p.10-16.
- CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum). (2007) Estimation of CO₂ storage capacity in geological media. June 2007, 43p.
- EERC (Energy & Environmental Research Center). (2009) Development of Storage Coefficients for Carbon Dioxide Storage in Deep Saline Formations. IEA Greenhouse Gas R&D Programm, 52p.
- Hovorka, S.D., Doughty, C., Benson, S.M., Pruess, K. and Knox, P.R. (2004) The impact of geological heterogeneity on CO₂ storage in brine formations: a case study from the Texas Gulf Coast. Geological Society, London, Special Publications, v.233, p.147-163.
- Kim, H.J., Han, S.J., Lee, G.H., Cho, H.M., Yoo, H.S., Park, G.T. and Kim, J.S. (2007) Evolution of the eastern margin of Korea: constraints on the opening of the East Sea (Japan Sea). *Tectonophysics*, v.436, p.37-55.
- Lee, G.H., Kim, H.J., Suh, M.C. and Hong, J.K. (1999) Crustal structure, volcanism, and opening mode of the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *Tectonophysics*, v.308, p.503-525.
- Mitchum, R.M., Jr. and Vail, P.R. (1977) Seismic stratigraphy and global changes of sea level; Part 7, Seismic stratigraphic interpretation procedure: AAPG Memoir v.26, p.135-143.
- NETL (National Energy Technology Laboratory). (2010) Carbon Sequestration Atlas of the United States and Canada. U.S. Department of Energy, p.142-147.
- Oldenburg, C.M., Pruess, K. and Benson, S.M. (2001) Process modeling of CO₂ injection into natural gas reservoirs for carbon sequestration and enhanced gas recovery. *Energy & Fuel*, v.15, p.293-298.
- Park, M.H., Kim, I.S. and Ryu, B.J. (2003) Framboidal pyrites in late Quaternary core sediments of the East Sea and their paleoenvironmental implications. *Geosciences Journal*, v.7, p.209-215.
- Park, M.H., Kim, J.H., Ryu, B.J., Kim, I.S. and Chang, H.W. (2006) AMS radiocarbon dating of the marine late Pleistocene-Holocene sediment cores in the western Ulleung Basin, East/Japan Sea. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, v.243, p.211-215.
- Park, M.H., Kim, J.H. and Kil, Y.W. (2007) Identification of the late Quaternary tephra layers in the Ulleung Basin of the East Sea using geochemical and statistical methods. *Marine Geology*, v.244, p.196-208.
- Park, Y.C., Yoo, D.G., Sung, W.M., Hwang, S.H. and Park, K.G. (2009a) Core technology development for sequestration of CO₂ in marine subsurface. 3rd Inter-agency Workshop for climate change response R&D program, Jeju Lotte Hotel, 95p.
- Park, Y.C., Huh, D.G., Yoo, D.G., Hwang, S.H., Lee, H.Y. and Roh, E. (2009b) A Review of Business Model for CO₂ Geological Storage Project in Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, v.45, p.579-587. (in Korean)
- SEI (Sneider Exploration Inc.). (2002) Tight formation evaluation of the B-5 Interval Gorae V, V-1and V-2. Sneider Exploration Inc., pp. 9-21.
- Yoon, S.H., Chough, S.K. and Park, S.J. (2003) Sequence model and its application to a Miocene shelf-slope system in the tectonically active Ulleung Basin margin, East Sea (Sea of Japan). *Marine and Petroleum Geology*, v.20, p.1089-1103.
- Yoon, B.S. and Hwang, I.G. (2009) Tectonics and related depositional pattern in the SW margin of Ulleung Basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, v.45, p.311-329. (in Korean)

2012년 1월 12일 원고접수, 2012년 2월 8일 게재승인