

서해 군산분지 이산화탄소 잠재 저장층 탐색을 위한 시추암편 공극률 분석

송인선¹ · 김구영¹ · 이창윤² · 신영재^{3,*}
¹한국지질자원연구원 기후변화대응연구본부
²한국지질자원연구원 해저지질에너지연구본부
³한국해양대학교 해양과학융합학부

Porosity analysis of drill cuttings for seeking out reservoir formations suitable for CO₂ geological storage in Gunsan Basin, West Sea of Korea

Insun Song¹ · Kue-Young Kim¹ · Changyoon Lee² · Young Jae Shinn^{3,*}

¹Climate Change Response Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,
Daejeon 34132, Republic of Korea

²Marine Geology and Energy Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,
Daejeon 34132, Republic of Korea

³Division of Convergence on Marine Science, Korea Maritime and Ocean University,
Busan 49112, Republic of Korea

요 약

서해 군산분지에서 이산화탄소 지중저장 잠재 지층을 탐색하기 위해 잉어-1, 까치-1 공에서 각각 155, 171 개의 시추암편 시료를 채취하여 암상과 공극률을 평가하였다. 까치-1 공은 기반암 위에 전기 백악기 층과 후기 백악기 층이 차례로 올라오며, 후기 백악기 지층은 중기 마이오세 부정합면에 의해 삭박되었다. 백악기 지층의 공극률은 평균 $8.65 \pm 2.42\%$ 이며, 심도에 따른 변화가 미미하다. 까치-1 공이 위치하는 서소분지의 백악기 지층은 낮은 공극률과 치밀한 사암 특성 때문에 이산화탄소 주입성이 불량할 것으로 예상된다. 잉어-1 공은 동소분지에서 시추되었고, 하부에 두꺼운(2,728~4,103 m) 전기 백악기 현무암질 화산암과 화산쇄설성 암석이 나타난다. 그 상부에 이질암이 우세하고 공극률이 낮은($<10\%$) 지층 구간(2,316~2,728 m)이 나타난다. 이 지층 위에 올라오는 지층 구간(506~2,316 m)에서 산출되는 암편시료들의 공극률은 대개 10~20% 정도로 이산화탄소 지중저장에 비교적 양호하다. 이 중에서 초임계 이산화탄소 저장 심도(최소 800 m)에 부합하고 공극률이 양호하며 사암이 우세한 1,767.8~1,959.9 m 지층 구간이 유망 저장층으로 판단된다. 전기 마이오세에 해당되는 지층(506~917.5 m)에도 공극률이 높은 사암이 분포하는 것으로 해석되나 잉어-1 지역에서는 심도가 낮고 분포가 제한적이다. 따라서, 전기 마이오세 지층이 넓고 두껍게 분포하는 동소분지 북부 지역에서 시추를 통한 잠재성 평가가 필요하다.

주요어: 이산화탄소 지중저장, 군산분지, 공극률, 저장층, 시추암편

ABSTRACT: This study addresses the evaluation of lithology and porosity of 155 and 171 drill-cuttings obtained respectively from Inga-1 and Kachi-1 boreholes in order to screen deep saline reservoir formations suitable for storing CO₂ in the Gunsan Basin, offshore Korea. The sedimentary succession of Kachi-1 consists mainly of Early and Late Cretaceous rocks. The upper part of the Late Cretaceous succession is truncated by the regional middle Miocene unconformity. The porosity range of the Cretaceous succession is $8.65 \pm 2.42\%$ with minor variations along the depth. It is expected that the Cretaceous succession in the West Subbasin, where Kachi-1 was drilled, has poor injectivity due to its low porosity and tight texture. The Inga-1 was drilled in the East Subbasin and penetrated

*Corresponding author: +82-51-410-4322, E-mail: shinn21@kmou.ac.kr

the Early Cretaceous basaltic and volcanoclastic rocks (2,728~4,103 m) in the lower part. The overlying succession (2,316~2,728 m) is dominated by fine-grained deposits and has low porosity less than 10%. It is, however, overlain by a thick sedimentary succession (506~2,316 m) with relatively high porosity (about 10~20%). Within this succession, the section from 1,767.8 to 1,959.9 m has relatively high content of sandstone with the porosity and depth suitable for storing a great amount of CO₂ in supercritical phase. The Early Miocene succession ranging from 506 to 917.5 m in depth is interpreted to contain porous sandstones, but its distribution and thickness are quite limited to the area surrounding Inga-1 borehole. We suggest to drill the northern part of the East Subbasin where the Early Miocene succession is relatively thick and extensive for evaluating its CO₂ geological storage potential in the Gunsan Basin.

Key words: CO₂ geological storage, Gunsan Basin, porosity, storage formation, drill-cuttings

1. 서론

지구 온난화에 대응하기 위해 많은 국가들이 2050년까지 이산화탄소 순배출 제로를 목표로 제시하고 있으며, 이를 달성하기 위해 에너지 전환과 저탄소 기술 개발을 적극적으로 추진하고 있다. 2021년에 우리나라는 2050 탄소중립을 선언하였으며, 이 도전적인 목표를 달성하기 위해 2050년에 연간 최대 6천만톤의 이산화탄소를 포집 및 저장 기술(CCS, CO₂ capture and storage)로 처분해야 한다(Republic of Korea, 2021). 정부는 국내와 해외에서 CCS 사업을 통해 각각 연간 3천만톤을 지중에 처분하는 것을 제안하였는데(Republic of Korea, 2021), 현재 국내외 기술 수준을 고려하면 도전적인 목표가 아닐 수 없다. 최근 산업부와 해수부가 공동으로 발표한 국내 저장용량 평가 결과에 따르면, 현재까지 가용한 자료와 분석기법을 통해 추정된 저장용량은 대략 7.3억톤 정도로 평가 되었다(Kwon, 2021). 특히, 서해 군산분지의 퇴적층을 최대한 활용하는 경우 이론적으로 대략 42억톤의 이산화탄소를 처분할 수 있을 것으로 추정되었다(KIGAM, 2019).

군산분지 저장용량 평가를 위한 기존 연구는 물리검층 자료로부터 도출한 공극률 값을 이용하였다. 본 연구에서는 서해 군산분지의 잉어-1 및 까치-1 공에서 채취한 시추암편(drill cuttings)의 암상과 공극 특성을 분석하였다. 공극은 서로 연결되어 있어 지하유체의 이동경로가 되고 자원이나 폐기물의 저장 공간이 되기 때문에 암석의 매우 중요한 특성이 다. 또한 지각응력이나 공극압에 의한 암석의 변형은 압축성이 거의 없는 고체입자보다는 훨씬 유연한 공극에서 많이 발생한다. 암석의 파괴도 대부분 이 공간으로부터 시작되기 때문에 암석의 물리역학적

성질이 빈공간의 특성과 관련이 깊다. 퇴적층에서 공극의 크기와 형태는 퇴적환경 및 속성작용 등 지질학적 조건에 따라 변화한다. 특히 퇴적암의 공극률은 지질작용 및 구조를 이해하는데 중요할 뿐 아니라 석유가스자원, 이산화탄소 지중저장, 분지해석 연구에 꼭 필요한 기본인자이다. 이번 연구에서는 가용한 시추암편 시료를 이용하여 저장용량 평가의 기본적인 매개변수인 공극률을 심도별로 최대한 많이 측정하여 잠재 저장층 구간을 제시하고자 한다. 연구결과는 기존의 물리검층 공극률 자료를 보완하고, 향후 이산화탄소 저장소 탐색을 위한 시추 위치 선정과 지구물리 탐사 지역을 선정하는데 기여할 것이다.

2. 군산분지 지질

군산분지는 서해 중부에 위치하고 있으며, 면적은 30,000 km² 이상으로 대략 경상남북도 면적과 유사하다(그림 1). 분지 충진물은 백악기-신생대 육성층으로 알려져 있고, 퇴적층의 두께는 최대 6 km에 이른다(Ryu *et al.*, 2000; Park *et al.*, 2010; Shinn *et al.*, 2010). 1970년대 이래 이루어진 석유탐사 활동을 통해 분지내 발달하는 습곡과 단층에 의한 집유 구조가 다수 존재함이 밝혀졌으며, 5 공의 탐사시추가 있었지만 탄화수소의 발견은 이루어지지 않았다.

군산분지는 내부에 발달하는 기반암 융기대에 의해 구획되는 적어도 5개의 소분지로 구성된다(그림 1). 소분지의 경계 단층과 내부에 발달하는 단층은 북동-남서 방향의 주향이동성 단층, 동-서(혹은 서북서-동남동) 방향과 북서-남동 방향의 공액단층 시스템이 우세하게 나타난다.

시추공 생층서 연구에 따르면, 군산분지는 전기

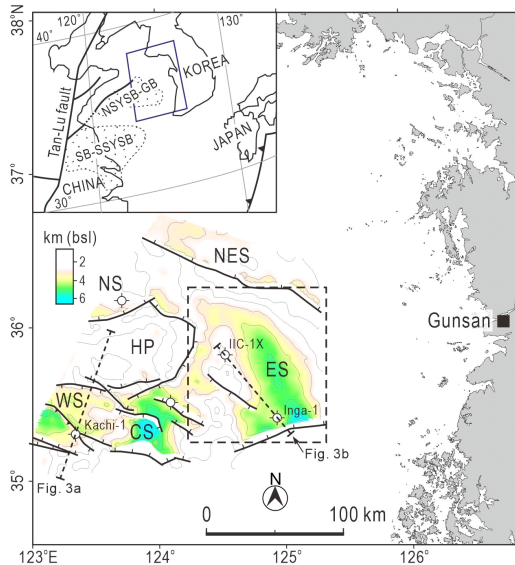


Fig. 1. Major geological structures demarcating basement highs and subbasins in the Gunsan Basin (after Shinn *et al.*, 2010). The Cretaceous to Tertiary basin-fills comprise nonmarine deposits up to 6 km thick. A black dashed-line box denotes location of Fig. 7. bsl = below sea level; GB = Gunsan Basin; NSYSB = Northern South Yellow Sea Basin; SB = Subei Basin; SSYSB = Southern South Yellow Sea Basin; CS = Central Subbasin; ES = East Subbasin; WS = West Subbasin; HP = Haema Platform; NS = North Subbasin; NES = Northeast Subbasin.

백악기-신생대 퇴적층으로 충진되어 있다(그림 2). 초기 연구에서 시추공 생층서는 주로 화분/포자 화석을 바탕으로 분대를 구분하였고 고제3기 지층이 주로 분지를 충진하고 있는 것으로 해석하였다(Ryu *et al.*, 2000; Byun *et al.*, 2013). 선행 연구는 신생대 화분/포자 화석과 동시에 산출되는 백악기 개형층 화석을 재퇴적에 의한 결과로 해석하였으나, 일부의 연구는 개형층 화석을 바탕으로 퇴적시기가 백악기일 가능성을 제안하였다(그림 2)(KIGAM, 2004).

군산분지 발달사는 전기 백악기에서 신생대 동안 탄루 단층에 의한 광역적인 변형과 고태평양판의 섭입 작용에 영향을 받았다(Ryu *et al.*, 2000; Shinn *et al.*, 2010; Shinn, 2015; Lee *et al.*, 2016). 전기 백악기 군산분지는 주변의 분지와 유사한 열개분지 혹은 인리형 분지로 해석되었다(Ryu *et al.*, 2000). 기존의 생층서에 의하면 백악기 퇴적층이 국지적으로 얇게 나타나고, 고제3기 퇴적층이 두껍게 분지를 충진

하고 있기 때문에 분지가 대규모로 확장되는 시기를 고제3기로 해석하였다(Ryu *et al.*, 2000; Park *et al.*, 2010). 백악기를 지시하는 개형층 화석을 근거로 고제3기 퇴적층을 백악기 퇴적층으로 해석한 연구 결과는 분지의 주요 확장 시기가 백악기일 수도 있음을 지시한다. 하지만 소분지마다 분지 형성 시기와 진화 과정이 다를 수 있기 때문에 군산분지 전체를 하나의 기작으로 설명하기는 어렵다. 분지의 본격적인 확장이 언제 있었는지 이견이 있을 수 있으나, 대개 올리고세와 중기 마이오세에는 압축성 구조운동이 우세했던 것으로 알려져 있다(Shinn *et al.*, 2010; Shinn, 2015). 중기 마이오세에 압축성 구조운동이 끝나고 광역 부정합면이 서해 전역에 형성되었고, 중기 마이오세-현생 퇴적층이 평탄하게 퇴적되었다(Chough *et al.*, 2000; Hong and Shinn, 2014).

3. 연구 방법

공극 특성 중 가장 중요한 인자는 공극률(n)로 암석 전체부피(bulk volume)에 대한 공극부피(pore volume)의 비로 표현된다.

$$n = \frac{V_p}{V_b} \tag{1}$$

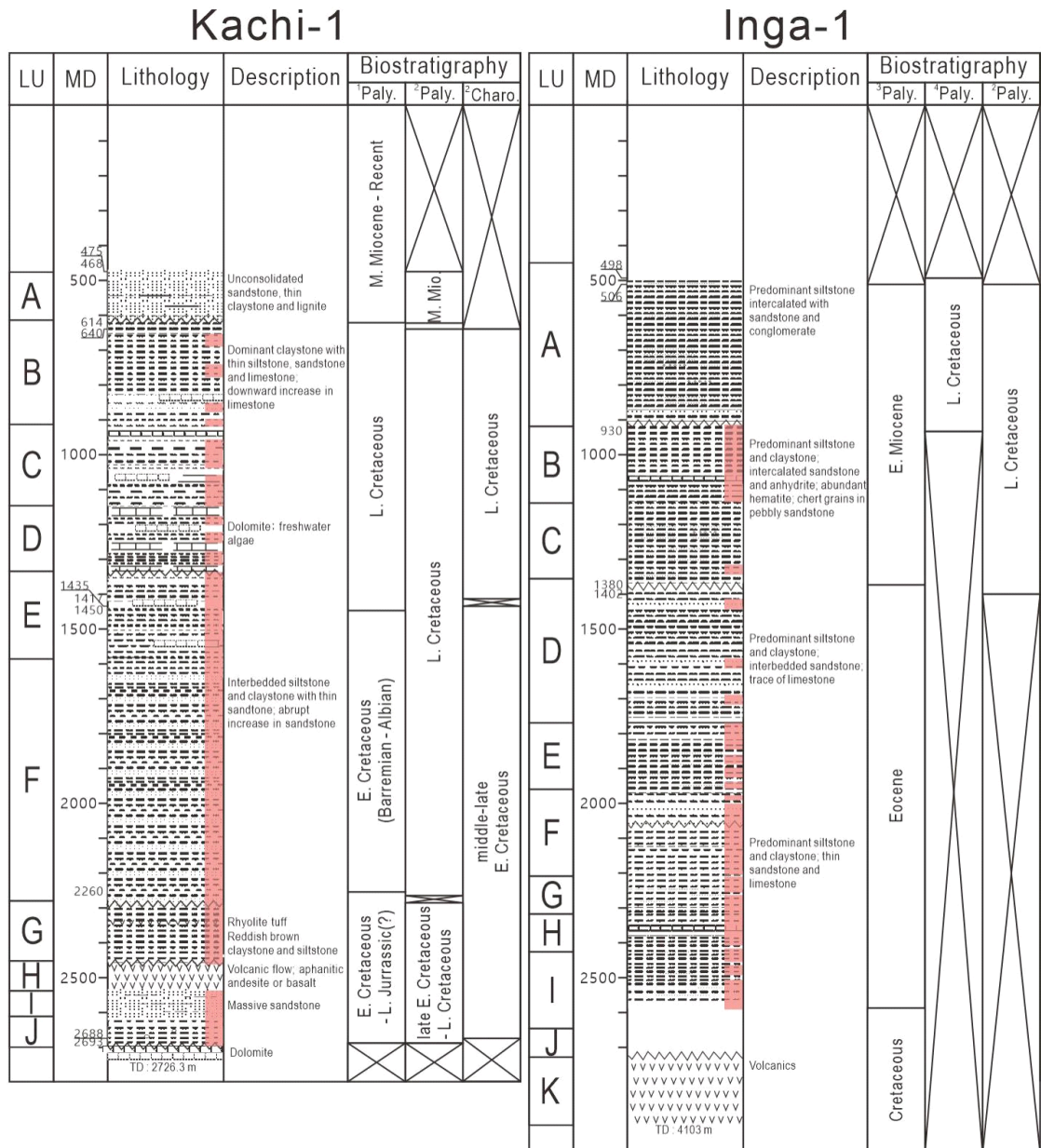
여기에서 V_p 와 V_b 는 각각 공극부피와 공극을 포함하는 암석의 전체부피이다. 공극률은 암석 내의 빈공간의 크기를 나타내며 유체의 저장량에 관한 인자로 가장 기본적인 공극의 특성이다. 본 연구에서는 공극률을 측정하기 위하여 두 가지 방법을 사용하였다. 첫 번째 방법은 가스밀도측정기(gas pycnometer)를 이용하여 암석시료의 건조밀도와 포화밀도를 구하고 이들의 상 관계(phase relationship)를 이용하여 공극률을 계산하는 간접적 방법이고, 두 번째 방법은 수은에 압력을 가하여 시료의 공극에 주입하고 주입된 양을 측정하여 공극률을 계산하는 직접적 방법이다.

3.1 시료의 상 관계를 이용한 공극률 측정

본 연구에서는 외양이 불규칙한 시추암편을 사용하였으므로 각 성분의 상 관계를 이용하여 밀도와

공극률을 구하였다(Noorany, 1984). 염수로 포화된
해저 퇴적층은 퇴적물과 공극수(pore water) 및 공
극수에 녹아있는 염분으로 구성된다. 시추 당시 획

득한 암석시료는 염수로 포화되어 있지만 건조되면
공극수는 증발하고 염분과 퇴적물만 남는다. 저울과
가스밀도측정기를 이용하면 건조시료와 포화시료



¹Yi *et al.*, 2003
²Unpublished data (Subsurface Consultants & Associates, 2002)
³Byun *et al.*, 2013
⁴Yi and Batten, 2002

Fig. 2. Lithologic unit, geologic log and biostratigraphy of Kachi-1 and Inga-1 boreholes (modified from Cheong *et al.*, 1998; Shinn *et al.*, 2010). Note that capitalized lithologic units have no correlation between the two boreholes. LU = lithologic unit; Md = measured depth; Paly = palynology; Charo = charophytes.

의 질량과 부피를 구할 수 있다.

M_b : 염수로 포화된 시료의 전체질량
(퇴적물과 염수의 질량)

V_b : 염수로 포화된 시료의 전체부피
(퇴적물과 염수의 부피)

M_d : 건조된 시료의 질량
(퇴적물과 침전된 염분의 질량)

V_d : 건조된 시료의 부피
(퇴적물과 침전된 염분의 부피)

이들 중 3개의 측정치만 있으면 상 관계를 이용하여 해저지층의 각 성분의 부피와 질량을 구할 수 있다(Blum, 1997). 공극이 포함된 불규칙한 시료의 전체부피(V_b)의 측정치는 오차가 심하여 사용하지 않았다(Lee *et al.*, 2015). 나머지 세 개의 측정치로부터 중요한 성분, 즉 증발된 물의 질량(M_{water}), 공극수의 질량(M_f), 염분의 질량(M_{salt}), 공극부피($V_{pore} = V_f$), 염분의 부피(V_{salt}) 및 시료의 전체부피(V_b)는 아래 상 관계를 이용하여 구하였다(Noorany, 1984).

$$M_{water} = M_b - M_d \quad (2)$$

$$M_f = M_{water} / (1 - s) \quad (3)$$

$$M_{salt} = M_f - M_{water} \quad (4)$$

$$V_f = V_{pore} = M_f / \rho_f \quad (5)$$

$$V_{salt} = M_{salt} / \rho_{salt} \quad (6)$$

$$V_b = V_d + V_f - V_{salt} \quad (7)$$

여기서 s , ρ_f , ρ_{salt} 는 각각 공극수의 염도, 밀도 및 염분 밀도로 일반적으로 사용하는 표준값은 다음과 같다(Blum, 1997).

$$s = 0.035 \quad (8)$$

$$\rho_f = 1.024g/cm^3 \quad (9)$$

$$\rho_{salt} = 2.220g/cm^3 \quad (10)$$

이 값은 지역에 따라 편차가 있으나 상 관계에서

큰 영향을 미치지 않는 못한다. 본 연구에서는 대상 지층이 육성 퇴적층이어서 염도는 0이 되고 따라서 V_{salt} 도 0이 된다. 공극수의 밀도는 증류수(ρ_w)와 같은 $1.0 g/cm^3$ 을 사용하였다. 위의 주요 성분으로부터 포화(습윤)밀도(ρ_{wet}), 건조밀도(ρ_{dry}), 광물밀도(ρ_{min}) 및 공극률(n)을 다음 식으로 구하였다.

$$\rho_{wet} = M_b / V_b \quad (11)$$

$$\rho_{dry} = M_d / V_b \quad (12)$$

$$\rho_{min} = M_s / V_s = (M_d - M_{salt}) / (V_d - V_{salt}) \quad (13)$$

$$n = V_f / V_b \quad (14)$$

사용된 시료는 서해 군산분지 잉어-1 및 까치-1 공에서 10 m 마다 시추이수(drill mud)와 함께 획득한 암편이다. 약 $500 cm^3$ 플라스틱 봉지에 시추이수와 뒤섞여 건조 보관되어 오던 시추암편들을 담수로 세척하여 이수를 분리하였다. 이 중 장경이 3.35 mm (Seive No. 6) 이상의 암편들을 24시간 진공상태($\sim 7 \times 10^{-3}$ Pa)에서 증류수로 포화시켰다. 이 과정에서 손실된 시료를 제외하고 같은 깊이에서 나온 암편들을 모아 그 질량이 3 g 이하 되는 시료는 분석에서 제외시켰다. 분석에 충분한 양($M_b > 3$ g)이 되는 시료의 포화질량(M_b)을 구하고 60°C오븐에서 24시간 건조하여 건조질량(M_d) 및 건조부피(V_d)를 구하였다. 고화된 암석의 경우 열에 의한 탈수 및 미세균열 발생을 방지하기 위해 오븐의 온도를 60°C로 제한하였다(Lin, 2002; ASTM International, 2005). 샘플의 건조부피는 Quantachrome사에서 제작한 자동가스밀도측정기(Auto Gas Pycnometer: Model PENTAPYC5200e)를 이용하여 측정하였다.

3.2 수은주입법을 이용한 공극률 측정

수은주입법(mercury injection method)은 수은의 압력을 점차 증가시키며 암석시료에 주입시켜서 들어간 양으로 공극의 부피를 구하여 공극률을 구하는 방법이다. 습윤성(wetting) 유체와는 달리 비습윤성(nonwetting) 유체인 수은은 암석의 공극이 미세할수록 더 많은 압력을 가해야 주입시킬 수가 있다. 수은의 모세관압(capillary pressure)과 공극통로(pore

Table 1. Lithology and depositional environment analyzed from drill-cuttings of Kachi-1 borehole (Parson and Saltmarsh, 1991; Park *et al.*, 1997; Cheong *et al.*, 1998). mMD = meters measured depth.

Unit	Interval (mMD)		Lithology and depositional environment
	Top	Base	
A	-	613	Interbeds of unconsolidated sandstone and calcareous mudstone; the lower boundary is regional unconformity (middle Miocene unconformity)
B	613	914	Mainly composed of silty mudstone; intercalated sandstone, sandy siltstone and micritic limestone; shallow lacustrine environment
C	914	1,145	Mainly composed of silty mudstone; intercalated sandstone, sandy siltstone and micritic limestone; shallow lacustrine environment
D	1,145	1,335	Mainly composed of silty mudstone; sandier/siltier than Unit B and C; calcareous particles more frequently observed; relatively thick sandstone beds compared to Unit B and C; shallow lacustrine environment
E	1,335	1,586	Interbeds of siltstone and mudstone, with thinly intercalated sandstone and limestone; few calcareous materials observed; rare presence of reddish mudstone in the upper part; fluvial sandstone is dominant between 1,587 and 1,592 m; pores are mainly filled by calcareous minerals; fluvial to deltaic environments
F	1,586	2,280	Interbeds of siltstone, mudstone and sandstone; similar to Unit E, but sandier/siltier; intercalated sandstone beds as thick as several meters; porosity less than 10% and not over 15%
G	2,280	2,452	Composed of fragile siltstone and fissile shale; significant decrease in sandstone; rhyolitic tuff in the middle part
H	2,452	2,522	Volcanic rocks; aphanitic andesite or basalt; some mineral weathering and alteration due to subaerial exposure
I	2,522	2,607	Sandstone with volcanic fragments; poorly sorted; tightly cemented; average porosity of 3 to 5 %, estimated from neutron density logs
J	2,607	2,693	Dolomitic siltstone, mudstone and dolomite; small pebble-size clasts of dolomite and chert between 2,670 and 2,684 m

throat)의 반경과의 관계를 이용하여 공극크기의 분포도 구할 수가 있다. 어떤 압력에서 침투된 원통형 공극의 반경은 Washburn 식으로 표현된다(Brugnera *et al.*, 2006).

$$P_c = \frac{2\sigma \cos\theta}{r} \quad (15)$$

이 식에서 P_c 는 모세관압(주입압), σ 는 수은의 표면장력(485 dyne/cm), θ 는 접촉각(contact angle, 130°), r 은 공극의 반경이다. 본 연구에서는 미국 Micromeritics 제품의 자동수은공극률측정기(Automated Mercury Porosimeters: Model AutoPore IV 9510)를 사용하였으며 이 제품의 주입 압력범위는 0.2~60,000 psi이며, 공극 지름의 측정 범위는 0.003~900 μm 정도이다.

가스밀도측정기를 이용하여 측정된 광물밀도와

함수율을 가지고 산정한 공극률의 신뢰도를 분석하기 위해 공극률을 직접 측정하는 수은주입법을 사용하였다. 수은주입법에 사용된 시료는 가스밀도측정기를 이용한 물성 측정에 사용된 잉어-1 공의 건조된 시추압편들 중 무작위 추출한 일부이다. 약 3 g 정도의 압편 시료들을 Penetrometer Closer Kit의 시료 그릇에 넣고 밀봉한 다음 저압셀에 장착하고 진공을 가하여 수은을 주입한다. 이 때 주입된 양으로 공극을 포함한 샘플의 초기부피(V_0)를 구할 수 있다. 저압셀에서 수은의 압력을 30 psi까지 단계적으로 가하면서 주입한다. 저압셀에서는 공극지름이 60 μm 이상 되는 공극의 부피를 구할 수 있다. 저압셀 측정이 끝나면 Penetrometer Closer Kit를 고압셀에 장착하여 수은의 압력을 60,000 psi까지 단계적으로 올리며 주입된 양을 측정한다. 식(15)를 이용하여 수은의 압력으로부터 공극의 지름을 구하고 침투한 양으로부터 공극의 부피를 구한다.

Table 2. Lithology and depositional environment analyzed from drill-cuttings of Inga-1 borehole (Waton *et al.*, 1989; Chang *et al.*, 1990). mMD = meters measured depth.

Unit	Interval (mMD)		Lithology and depositional environment
	Top	Base	
A	506	917.5	Composed of gray siltstone, poorly-sorted sandstone and claystone; semi-consolidated; the lower boundary shows sharp lithologic break associated with unconformity
B	917.5	1,136.9	Mainly composed of claystone; consolidated; anhydric shale between 1,027 and 1,082 m; floodplain, shallow lacustrine and marginal lacustrine environments
C	1,136.9	1,356.4	Interbeds of sandstone and claystone; relative abundance of sandstone; a gradual increase of claystone to the lower part (to 1,274 m); floodplain and fluvial environments
D	1,356.4	1,767.8	Mainly composed of claystone; relatively thick claystone between 1,527 and 1,551 m; floodplain environment
E	1,767.8	1,959.9	Interbeds of sandstone and claystone; relative abundance of sandstone; floodplain and fluvial environments
F	1,959.9	2,206.8	Mainly composed of siltstone; relatively rare presence of sandstone; floodplain and fluvial environments
G	2,206.8	2,316.5	Mainly composed of siltstone; relatively rare presence of sandstone; floodplain environment
H	2,316.5	2,426.2	Mainly composed of siltstone; relatively rare presence of sandstone; calcareous or dolomitic cements frequently observed; intercalation of thin limestone beds; floodplain, shallow lacustrine and marginal lacustrine environments
I	2,426.2	2,645.7	Interbeds of sandstone and claystone; relative abundance of sandstone; a high content of calcareous material; floodplain, fluvial, shallow lacustrine and marginal lacustrine environments
J	2,645.7	2,728.0	Interbeds of siltstone and claystone; relative abundance of siltstone; volcanic fragments often observed; floodplain and fluvial environments
K	2,728.0	4,103.0	Volcanic rocks

4. 시추암편 암상

한국석유공사와 한국지질자원연구원의 시추암편 시료 분석 보고서와 본 연구를 위해 채취한 시추암편 시료 암상 분석을 종합하여 암상과 퇴적환경을 다음의 절에서 정리하였다(표 1, 2)(Waton *et al.*, 1989; Parson and Saltmarsh, 1991; PEDCO, 1991; Park *et al.*, 1997; Cheong *et al.*, 1998).

4.1 까치-1 공

까치-1 공은 군산분지 서소분지의 단층 연계 배사구조에 위치한다(그림 3a). 기존의 생층서 연구는 까치-1 퇴적층이 전기 백악기(1,445~2,280 m) 및 후기 백악기(613~1,445 m)에 퇴적되었고(그림 2), 이 백악기 지층은 압축구조 운동에 의해 용기와 변

형을 겪으면서 삭박되어 약 613 m 심도에서 중기 마이오세 지층과 부정합 관계로 만난다(그림 3a).

까치-1 시추 보고서는 암편시료의 암상을 이용하여 까치-1 시추공을 10개의 구간으로 구분하였다(표 1; 그림 2)(Parson and Saltmarsh, 1991; Park *et al.*, 1997; Cheong *et al.*, 1998). 구간 A는 미고결된 사암과 석회질 이암으로 주로 구성된다. 구간 B와 C는 주로 실트질 이암으로 구성되며 약간의 사암, 사질 실트암, 미결정질 석회암을 포함하고 있다. 구간 D는 상위에 올라오는 구간과 암상이 유사하나 상대적으로 사질 또는 실트질 입자들이 많이 포함되어 있고, 석회질 입자들이 좀 더 빈번하게 나타난다. 구간 B, C, D는 적갈색 퇴적층의 발달이 미약하고, 탄산염질 성분이 상대적으로 많은 것으로 보아 수심이 얕은 호소성 환경에서 퇴적된 지층으로 해석된다

(Park *et al.*, 1997; Cheong *et al.*, 1998).

구간 E는 주로 실트암과 이암으로 구성되어 있고, 얇은 사암과 석회암을 포함한다. 구간 E는 적갈색을 띠는 퇴적암의 발달이 뚜렷하며, 이는 하성/삼각주 환경에서 퇴적되었음을 지시한다(Park *et al.*, 1997; Cheong *et al.*, 1998). 구간 F는 실트암, 이암, 사암이 교호하는 퇴적층으로 구간 E의 암상과 유사하나 상대적으로 사질과 실트질 함량이 높고, 수 m 두께의 사암층이 협재한다. 사암은 대개 분급이 불량하고, 암편, 중광물, 석탄 파편, 석회질 입자들을 포함하고 있다.

구간 G는 잘 깨지는 실트암과 박리성(fissile) 셰일로 구성되며, 사암의 양이 현저히 적은 것이 특징이다. 구간 H는 화산암체로 두께가 약 70 m이고 주

로 비현정질(aphanitic) 안산암 또는 현무암으로 구성되어 있다. 화산암체 상부는 대기 중에 노출되어 풍화되었고 변질된 흔적이 나타난다. 구간 I는 화산암체 직하부에 나타나는 균질한 사암층으로 구성된다. 사암 분급이 매우 불량하고, 주로 세립질에서 중립질 입자로 구성되며 화산암편을 포함한다. 방해석 교질물에 의한 충진으로 조적이 치밀하다(Park *et al.*, 1997). 중성자/밀도 검층은 공극률이 평균 3~5% 정도임을 지시한다(Parson and Saltmarsh, 1991). 사암층 내 얇은 실트암과 이암이 협재한다. 구간 J는 백운암질 실트암, 이암, 백운암으로 구성된다. 잔자갈 크기의 백운암, 처트 역을 포함하는 역암이 일부 구간(2,670~2,684 m)에서 나타난다(Park *et al.*, 1997).

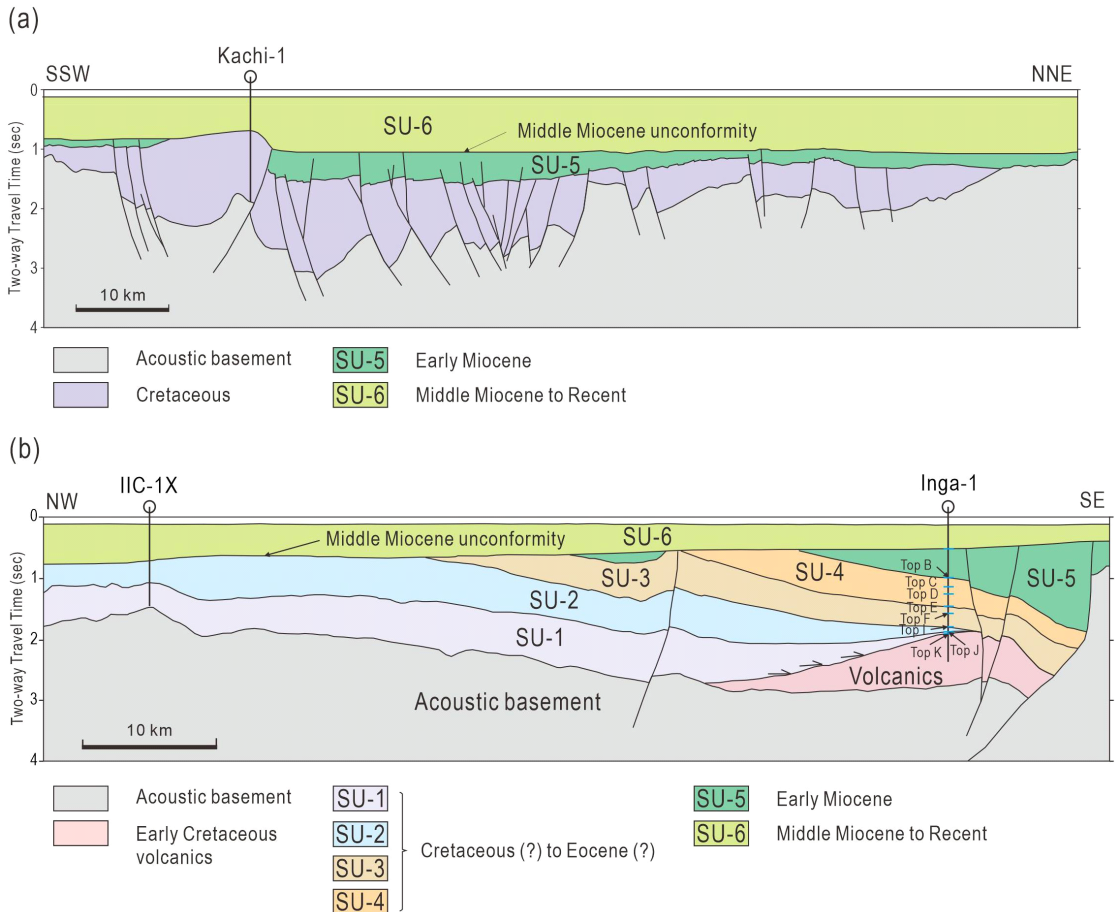


Fig. 3. A geological cross section of (a) the West Subbasin and (b) the East Subbasin of the Gunsan Basin. Note the upper boundaries of lithologic units at Inga-1 borehole. Geological ages of seismic units recognized in the East Subbasin are not fully established. For location of the cross section see Figure 1. SU = seismic unit.

Table 3. Summary of lithologic interval, sample numbers, major lithology, density and porosity of Kachi-1 borehole. MST = mudstone; VOL = volcanics; SST = sandstone.

Interval	Upper limit (m)	Sample numbers		Lithology observed	Density (g/cm ³)			Avg. porosity (%)	
		All	SST		Wet	Dry	Mineral	All	SST
A	475	5	-	MST	1.822	1.381	2.463	44.09	-
B	614	12	2	MST dominant	2.609	2.500	2.808	10.96	13.72
C	914	18	8	MST/SST	2.640	2.549	2.803	9.06	9.17
D	1,145	-	-	-	-	-	-	-	-
E	1,335	13	10	SST dominant	2.679	2.602	2.819	7.65	7.59
F	1,586	104	59	SST dominant	2.740	2.654	2.906	8.63	8.07
G	2,280	15	-	MST	2.773	2.694	2.924	7.84	-
H	2,452	3	-	MST/VOL	2.833	2.777	2.943	5.68	-
I	2,522	1	-	MST	2.778	2.682	2.966	9.59	-
J	2,607	-	-	-	-	-	-	-	-

4.2 잉어-1 공

잉어-1 공은 군산분지 동소분지 남쪽 경계 단층 인근에서 시추되었다(그림 3b). 화분/포자 화석 연구는 중기 마이오세 부정합면 아래 지층인 506~1,380 m 구간을 전기 마이오세로 해석하였다(그림 2, 3b)(Cheong *et al.*, 1998; Byun *et al.*, 2013). 하지만, 동일한 지층에 대한 화분/포자, 개형층 화석 연구는 후기 백악기일 가능성을 제시하였다(그림 2)(Yi and Batten, 2002; KIGAM, 2004). 1,380~2,714 m 구간의 퇴적층은 백악기 또는 에오세 지층으로 해석되었고(Byun *et al.*, 2013), 그 하부에는 두꺼운 화산암체가 나타난다.

잉어-1 시추공 암편시료 관찰과 선행 연구자료를 기반으로 암상을 11 개 구간으로 구분하였다(표 2; 그림 2)(Waton *et al.*, 1989). 비교적 사암이 우세한 구간은 C, E 구간이다. 한국석유공사 보고서에 의하면, 비교적 저류 가능한 사암은 대개 1,356~1,960 m 구간에 존재한다고 보고하였고 이 구간은 D, E 구간에 해당된다(PEDCO, 1991). 이번 연구를 위해 육안으로 관찰한 시추암편들 중 C, E 구간의 시추암편이 상대적으로 사암이 우세하였다(표 4). 사암은 입도가 다양하고 아각상 또는 각상의 형태를 지니고, 분급은 보통 또는 불량하며, 현미경 하 사암의 유효 공극률은 매우 낮고, 투수율은 불량한 것으로 보고

되었다(PEDCO, 1991; Cheong *et al.*, 1998).

점토암이 우세한 구간 B는 주로 석회암질 이암으로 구성되어 있고, 결정질 무수석고가 풍부한 세일층이 일부 구간에서 관찰되는 것이 특징이며, 구간 H는 부분적으로 백운암, 석회암이 협재하는 것이 특징이다(PEDCO, 1991; Cheong *et al.*, 1998). 구간 J는 하위의 화산암체를 덮고 있는 실트암과 점토암의 교호층으로 석회암질 성분을 포함하며, 화산암편을 협재한다. 구간 K는 주로 두꺼운 화산암체로 구성된다. 이 화산암의 절대연령은 후기 백악기로 보고되었다(Jin *et al.*, 1991; Cheong *et al.*, 1998).

시추암편 관찰에 따르면, 잉어-1 공 퇴적층은 주로 적색의 이암으로 구성되어 있고, 석회암질 성분과 결정질 무수석고를 포함하고 있어 주로 건조한 환경의 범람원이 넓게 분포하는 지역에서 퇴적되었을 것으로 여겨진다. 사암은 호수 주변부 하성 혹은 삼각주 환경에서 퇴적되었을 것으로 해석된다.

5. 공극률 분석 결과

5.1 까치-1 공 시추암편 공극률

까치-1공으로부터 추출된 전체 171개 시추암편 시료의 포화질량(M_b), 건조질량(M_d) 및 건조부피(V_d)의 측정치로부터 식(2)-(7)의 상 관계를 이용하

Table 4. Summary of lithologic interval, sample numbers, major lithology, density and porosity of Inga-1 borehole. MST = mudstone; VOL = volcanics; SST = sandstone.

Interval	Upper limit (m)	Sample numbers		Lithology observed	Density (g/cm ³)			Avg. porosity (%)	
		All	SST		Wet	Dry	Mineral	All	SST
A	450.0	14	7	MST	1.983	1.614	2.544	36.98	36.42
B	917.5	12	-	MST/VOL	2.481	2.323	2.761	15.79	-
C	1,136.9	26	20	SST dominant	2.399	2.211	2.725	18.84	18.92
D	1,356.4	34	7	MST dominant	2.469	2.308	2.753	16.13	17.10
E	1,767.8	24	13	SST dominant	2.404	2.246	2.668	15.84	17.54
F	1,959.9	6	4	MST dominant	2.374	2.171	2.724	20.27	24.05
G	2,206.8	3	-	MST	2.551	2.439	2.747	11.22	-
H	2,316.5	7	-	SST dominant	2.550	2.452	2.719	9.80	-
I	2,426.2	7	1	MST	2.593	2.506	2.745	8.70	10.62
J	2,645.7	5	-	MST	2.611	2.537	2.739	7.38	-
K	2,728.0	17	-	VOL	2.665	2.572	2.834	9.21	-

여 각 상의 질량과 부피를 구하였다. 이들로부터 각 시료의 포화밀도(ρ_{wet}), 건조밀도(ρ_{dry}), 광물밀도(ρ_{min}) 및 공극률(n)을 구하였다(표 3). 각 시료는 같은 깊이(10 m 단위)에서 나온 여러 개의 압편으로 구성되어 있으며 크기에 따라 분류하였기 때문에 단일 압종으로 3.35 mm 이상되는 압편이 충분하지 않을 경우 다른 압종이 다소 섞여있을 수 있다. 각 시료의 건조밀도가 가장 작고, 포화밀도, 광물밀도의 순으로 커진다. 광물밀도는 암석의 구성광물과 부피의 비율로부터도 구할 수 있으며, 공극의 크기나 모양과는 관계가 없다(Goodman, 1989). 따라서 광물밀도는 암석의 광물성분만을 반영하며 조암광물의 경우 보통 2.6~3.0 g/cm³의 좁은 범위를 가지기 때문에 측정오차를 가늠할 수 있는 자료로 사용될 수 있다. 본 조사에서는 대부분의 측정치가 이 범위 안에 들고 있어 신뢰도가 상당히 높다고 할 수 있다(그림 4a). 광물밀도의 평균값(μ)은 2.87 g/cm³로 일반적인 해저퇴적물의 평균값(2.74 g/cm³) 보다 약간 크다(Noorany, 1984; ASTM International, 2005). 이로 미루어 광물조성은 약간 염기성을 띠는 것으로 보인다.

그림 5는 깊이와 압종에 따른 각 물성의 변화를

보여준다. 까치-1 공에서의 공극률은 깊이 614 m에 있는 부정합을 경계로 확연히 달라진다(그림 5a). 부정합 상위의 중기 마이오세 지층인 구간 A에서는 공극률이 44.09±3.54%로 매우 높으나 부정합 하위의 백악기 지층에서는 8.65±2.42%로 심도 및 암상분대와 상관없이 비교적 일정하다. 이는 백악기 지층이 오래 전에 2,000 m 이상의 깊이에서 고결작용으로 암석화 되어 있다가 상부 지층이 삭박된 후 마이오세 지층이 퇴적된 것으로 보인다. 구간 I에서는 현무암이 산출되었으며 공극률이 ~10%로 상위층에 비해 소폭 증가하였고 광물밀도도 ~3.0 g/cm³로 염기성 광물로 구성되었음을 보여준다(표 3). 광물밀도(ρ_{min})가 1,500 m 이하 깊이에서부터 서서히 증가하는 것으로 보아 퇴적암의 광물성분이 염기성 광물을 많이 포함하는 것으로 보인다. 백악기 지층에서는 낮은 공극률로 포화밀도(ρ_{wet}), 건조밀도(ρ_{dry}), 광물밀도(ρ_{min})의 차이가 심하지 않다.

5.2 잉어-1 공 시추암편 공극률

잉어-1공으로부터 추출된 전체 155개 시추암편 시료에서 포화질량(M_b), 건조질량(M_d) 및 건조부피(V_d)로부터 식(2)-(7)에 나타난 상 관계를 이용하여 각

상의 질량과 부피를 구하였다. 이들로부터 각 시료의 포화밀도(ρ_{wet}), 건조밀도(ρ_{dry}), 광물밀도(ρ_{min}) 및 공극률(n)을 구하였다(표 4). 까치-1 공에서와 마찬가지로

3.35 mm 이상 되는 암편이 최소 3 g 이상이어야 하기 때문에 하나의 시료에는 하나 이상의 암종이 섞일 수 있다. 입도와 분급에서 일정하지 않

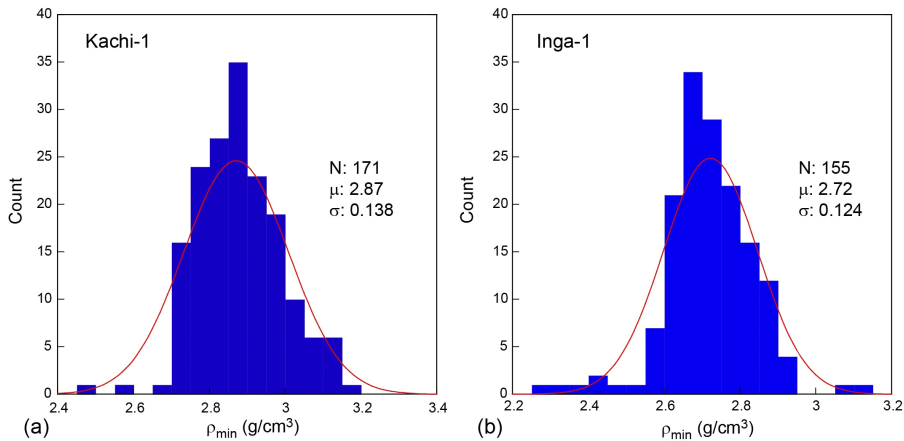


Fig. 4. The distribution of the mineral density measured from drill cuttings of (a) Kachi-1 and (b) Inga-1 boreholes. Note that μ is the average density and σ is the standard deviation of data.

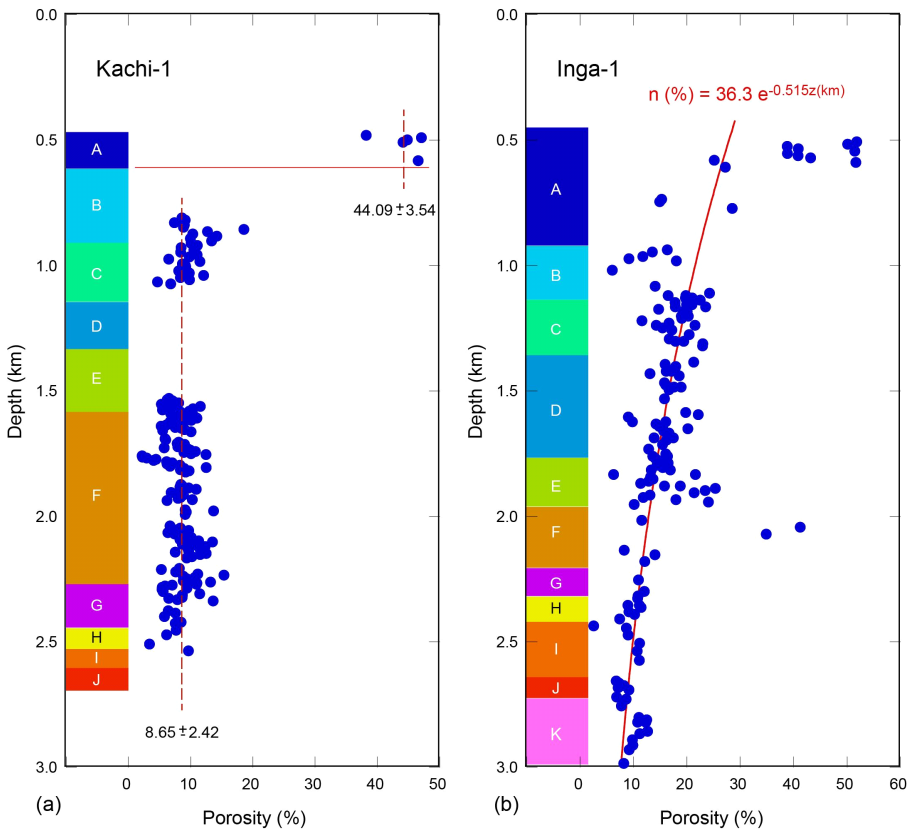


Fig. 5. Porosity measured from drill cuttings of (a) Kachi-1 and (b) Inga-1 boreholes.

을 수도 있다. 까치-1공과 마찬가지로 광물밀도의 분포가 2.6~3.0 g/cm³ 범위에 있으며 평균값은 2.72 g/cm³으로 보통 해저퇴적물의 평균값(2.74 g/cm³)과 일치한다(그림 4b). 까치-1공의 광물보다는 약간 낮은 범위의 밀도를 보여준다.

잉어-1 공의 공극률은 깊이에 따라 지수함수로 감소하는 경향을 보여준다(그림 5b). 그 이유는 상위 퇴적층이 두꺼워질수록 높은 하중에 의한 압밀현상 때문이다. 구간 A 상부의 높은 공극률(40~50%)과 구간 F의 두 시료(30~40%), 그리고 구간 B와 K에 있는 화산암을 제외하면 대체로 높은 상관관계를 보여준다(그림 5b). 구간 A 상부의 높은 공극률은 까치-1공의 구간 A와 비슷하며 미고결에 따른 결과로 보인다. 화산암의 공극률은 깊이와 관계없이 9.95±3.02% 정도의 분포를 나타내고 까치-1공의 화산암 공극률과 비슷한 결과를 보여준다. 이암과 사암의 공극률은 각각 15.87±8.99%, 20.92±8.77%로 그 차

이는 미미하다(표 4).

수은 공극률 측정기로 측정된 이암의 공극률은 비슷한 깊이에서 상 관계를 이용한 공극률 보다 약 2% 정도 낮게 나왔으며 사암에서는 8% 정도 낮아 차이가 크게 나타났다(그림 6b). 수은 공극률은 암편의 불규칙한 표면에 의한 영향을 보정하기 때문에 상관계를 이용한 공극률보다 작은 값을 나타낸다. 사암의 수은공극률이 더 크게 감소하는 것은 그 표면의 불규칙한 정도가 이암에 비해 더 크기 때문일 가능성이 크다. 2,000 m 깊이 부근에서 몇 개의 사암시료에서 보여주는 높은 공극률(30~40%)은 수은 공극률 측정치로 보아 실험 오차일 가능성이 크다.

잉어-1 공 시료들의 광물밀도가 약간 분산되기는 하지만 대부분 2.7~2.8 g/cm³ 근처에 모여 있으며 깊이와 암상 분대와 관계없이 거의 일정하다(표 4). 이 값은 규산염 광물로 이루어진 쇄설성 퇴적물의 밀도와 대체로 일치한다. 분산도는 깊이에 따라 감

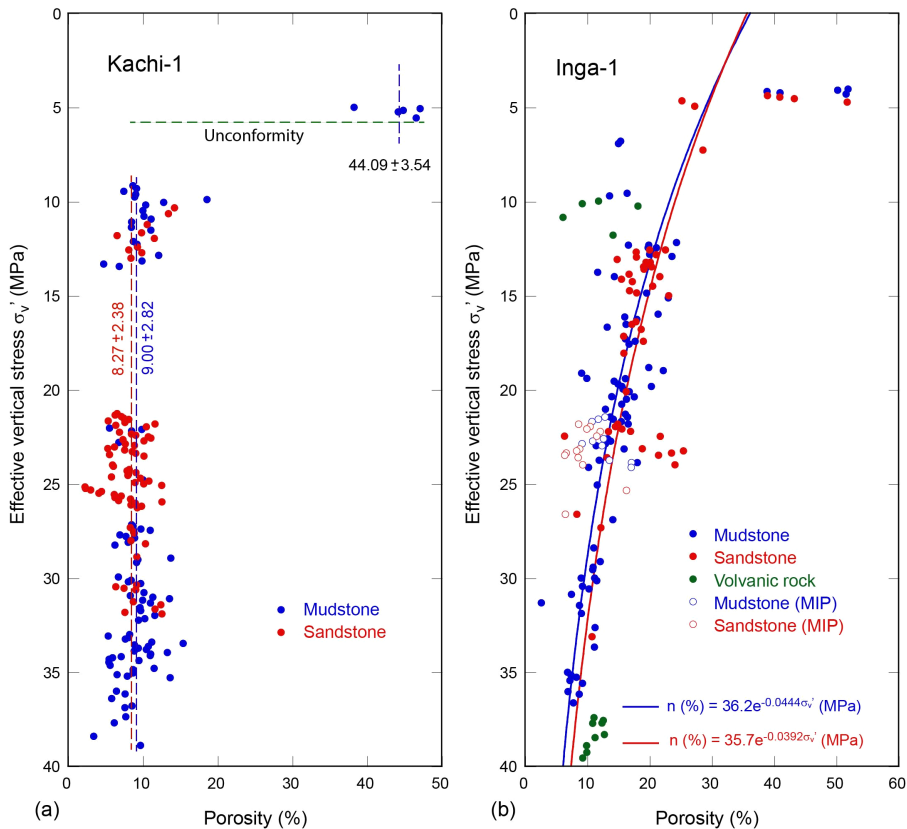


Fig. 6. Porosity variation versus the effective vertical stress (σ'_v) of (a) Kachi-1 and (b) Inga-1 boreholes. MIP = mercury intrusion porosimeter.

소하는 경향을 보여준다. 이는 깊이에 따라 암석의 고결 정도가 강해 암편이 커지고 시추이수의 영향이 작아져 나타나는 현상으로 보인다. 건조밀도와 포화 밀도는 공극을 채우는 공기나 공극수를 포함하기 때문에 공극률이 커질수록 작아진다. 따라서 건조밀도와 포화밀도는 깊이에 따라 증가하는 경향을 보인다.

6. 토 의

6.1 지층의 하중에 따른 공극률 변화

퇴적암의 공극률은 상위층의 하중에 의해 깊이가 커질수록 점이적으로 감소한다. 하중이 증가하면 이에 대한 반작용으로 공극수압이 증가하는데 공극수가 수압이 낮은 상부로 빠져나가는 원인이 된다. 공극수의 소실로 결국 공극이 줄어들어 퇴적층의 두께가 감소하는데 이를 압밀작용이라 한다(Biot, 1941; Gibson, 1958; Skempton, 1969). 그림 6은 지층의 하중(유효수직응력, σ_v')에 따른 공극률의 변화를 보여준다. 까치-1공의 공극률은 상부의 부정합면에서 하부로 급격히 감소하고, 그 아래로는 일반적으로 나타나는 하중에 따른 공극률의 점이적 감소와 다르게 비교적 일정한 값을 유지한다(그림 6a). 이는 부정합 아래의 백악기 지층이 지하 깊은 곳에서 고결되었다가 침식작용에 의해 삭박되어 지표 가까이로 용기된 결과로 보여진다. 부정합 상위층에서는 낮은 하중으로 압밀작용이 충분히 일어나지 않은 결과로 보인다. 잉어-1공에서는 압밀작용에 의한 공극률의 점이적인 감소를 잘 보여주며 하중에 의한 공극률의 감소가 지수함수로 표현된다(그림 6b). 이암에서의 하중의 증가에 따른 공극률의 감소변화가 사암에서의 공극률 감소변화보다 약간 크지만 그 차이는 미미하다. 일반적으로는 안정적인 퇴적환경에서는 이암에서의 공극률 감소율이 사암에서의 감소율보다 훨씬 크다(Magara, 1980).

6.2 이산화탄소 지중저장 잠재성

6.2.1 군산분지 서소분지

까치-1 공 백악기 지층의 구간별 시추암편 시료의 공극률 평균값은 대개 5.68~10.96% 범위에 있다(표 3). 경상분지에서 이산화탄소 저장지층 탐색을 위해 획득한 심부 시추코어의 공극률 측정 값도 대부분 8% 이하로 낮게 측정되었다(KIGAM, 2014).

낮은 공극률은 압밀 작용과 더불어 분지 심부 화성암 관입에 의한 열적 작용에 기인하는 것으로 여겨진다(Rong *et al.*, 2021). 까치-1 공 시추암편 관찰에 따르면 사암은 화성활동이 활발했던 경상분지 백악기 사암과 유사하게 공극을 채우는 교질물이 잘 발달하여 조적이 치밀한 것이 특징이다. 따라서, 서소분지 백악기 퇴적층은 공극률이 낮고 암석이 비교적 치밀하여 이산화탄소 주입성과 저장용량 측면에서 저장 잠재성이 낮을 것으로 여겨진다.

까치-1 공 시추 위치에서 백악기 지층은 반지구(half-graben)를 충진하였으나, 후기 백악기 이후에 횡압력 작용에 의해 반지구 구조가 역전되면서 백악기 지층이 경계 단층(까치 단층)을 따라 용기하면서 습곡되었다(그림 3a)(Shinn, 2015). 반지구 역전 구조를 형성하고 있는 경계 단층의 하반에 해당되는 동쪽 블록은 횡압력에 의한 구조 변형을 받지 않았다. 이 지역에서는 백악기 지층을 부정합으로 덮고 있는 신생대 지층이 비교적 두껍게 발달하고 있고, 초임계 이산화탄소 지중저장이 가능한 심도에 분포한다(그림 3a). 따라서, 서소분지는 까치-1 공 동쪽의 비변형 구조를 채우고 있는 두꺼운 신생대 지층에 대한 시추와 평가가 필요하다.

6.2.2 군산분지 동소분지

잉어-1 공 전체 시추암편 전체 시료의 평균 공극률은 16.80±9.08%, 사암 시료의 평균 공극률은 20.92±8.77%로 비교적 양호하다(표 4). 구간 A에서부터 F까지 비교적 높은 공극률을 보이고, 구간 G에서부터 공극률이 비교적 낮아지는 경향을 보여준다(그림 5). 가장 하부에 있는 화산암층 구간은 분출 화산암과 화산쇄설성 퇴적물이 복합적으로 퇴적되어 있으며 두께가 최소 1,000 m에 이른다. 이 화산암 복합층은 탄성과 단면에서 뚜렷하게 돌출된 기복을 보이며 상부 경계면을 따라 반사파들이 윗걸침(onlap)하는 배열이 잘 관찰된다(그림 3b). 화산암 복합체의 형성 시기는 최근 전기 백악기로 해석되었고(Kim *et al.*, 2012), 상부에 퇴적된 퇴적층들은 최소 후기 백악기일 가능성이 높다. 상부 퇴적체 구간 H, I, J는 상대적으로 세립질이 우세하고, 공극률이 낮은 것이 특징인데 이는 재동된 화산쇄설성 퇴적물 공급에 의한 영향으로 추정된다. 장기분지 시추코어 속성작용 분석 결과에서도 하부 화산활동의 영향을 받은 지층

이 불석화 작용 등에 의해 1차 공극의 감소가 일어난 것으로 보고된 바 있다(Kim *et al.*, 2022). 따라서, 구간 H, I, J는 응회암질 사암이 속성작용을 받아 상대적으로 이산화탄소 지중저장 유망성이 낮을 것으로 여겨진다.

구간 B에서 G에 이르는 구간의 공극률 값은 거의 유사하나 시추 보고서에 따르면 구간 C, E가 비교적 사암이 우세하다. 이번 연구에서 관찰한 시추암편도 구간 C, E에서 비교적 사암이 우세한 것으로 파악되었다(표 4). 구간 F는 이암이 우세한 구간으로 일부 시료의 공극률이 현저하게 높게 측정되었는데 전반적인 공극률 변화 양상을 고려할 때 측정 오차일 가능성이 있다. 현미경 하 관찰에서 사암 시추암편은 전반적으로 유효 공극률이 낮고, 투수도가 불량할 것으로 보고되었다(PEDCO, 1991). 그럼에도 불구하고 공극률, 암상 및 분포 면적을 고려할 때 구간 E가 상대적으로 유망할 것으로 해석된다. 구간 E에 해당되는 지층은 잉어-1 공 위치에서 북쪽 혹은 북북서쪽으로 알아지는 경향이 뚜렷하여(그림 3b) 동소분지 북부 지역에서 시추를 통해 평가가 가능할 것이다.

전반적으로 낮은 공극률은 잉어-1 공 시추 위치가 분지 경계와 가까워 일차적으로 사암의 조적이 미성숙되었을 가능성이 있으며 이차적으로 심부 화성활동에 의한 속성작용의 영향에 기인하는 것으로 여겨진다. 이러한 점을 고려할 때 분지 경계 단층에서 비교적 멀리 떨어져 있고, 화성활동의 영향이 상대적으로 작을 것으로 여겨지는 동소분지 북부 지역의 사암이 공극률과 사암의 조성이 보다 양호할 것으로 기대된다.

잉어-1 공 지층에서 공극률이 가장 양호한 구간은 A이다. 중기 마이오세 부정합면 바로 아래에 위치하는 퇴적층으로 퇴적 시기는 불명확하다. 화분/포자 화석 연구는 이 구간을 전기 마이오세로 제안하였고(Byun *et al.*, 2013), 개형층 화석 연구는 후기 백악기일 가능성을 제시하였다(KIGAM, 2004). 구간 A의 시추암편은 회색 이암과 분급이 불량한 사암이 우세하며, 이는 까치-1 공의 후기 백악기 구간에 적갈색 이암이 빈번하게 출현하는 것과 대조적이다. 또한 공극률 값의 범위도 까치-1 공에서 나타나는 후기 백악기 시추암편 공극률 값의 범위와 상이하다. 암상이나 공극률의 유사성과 차이로 시대를

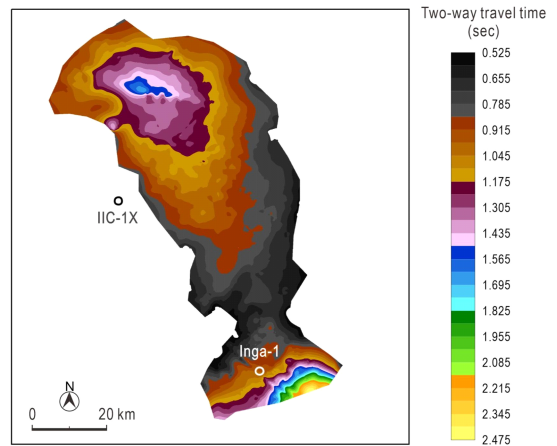


Fig. 7. Time structure map of the lower boundary of possible early Miocene unit, corresponding to the lower boundary of lithologic interval A of Inga-1 borehole. Note the extensive distribution of the early Miocene unit in the northern part of the East Subbasin. For location of the structural map see Figure 1.

유추할 수 없으나, 전기 마이오세 지층일 가능성을 배제하기는 어렵다. 구간 A는 잉어-1 공 위치에서 분포 심도가 낮아 초임계 상의 이산화탄소 지중저장이 어렵다. 또한, 지층이 점진적으로 북쪽 혹은 북서쪽으로 알아지며 중기 마이오세에 부정합면에 삭박되어 분포 면적이 좁다(그림 7). 따라서, 구간 A는 공극률이 매우 양호하더라도 잉어-1 공이 위치하는 동소분지 남쪽 지역에서는 저장층 구간으로 고려하기 어렵다. 하지만, 동소분지 북부 지역에 구간 A와 대비되는 전기 마이오세 지층이 두껍게 분포한다(그림 7). 이를 고려하면 동소분지 북부 지역에서 구간 A에 해당되는 전기 마이오세 지층에 대한 잠재성 평가가 필요하다. 특히, 기존의 시추공은 전기 마이오세 지층이 삭박되어 없거나 매우 얇은 지역에 위치하고 있어, 추가 시추를 통한 전기 마이오세 지층 평가는 매우 중요하다.

7. 결론

군산분지 서소분지와 동소분지에서 각각 시추한 까치-1, 잉어-1 공의 시추암편을 이용하여 심도별 공극 특성과 암상을 종합적으로 평가하였다. 서소분지 까치-1 공에서 획득한 백악기 지층은 평균 공극률이 $8.65 \pm 2.42\%$ 로 낮아 유망 저장층을 기대하기

어렵다. 하지만, 백악기 지층이 구조 역전을 겪으면서 동시에 형성된 제3기 지층이 까치-1 공 동쪽에 넓게 분포하고 있어 이에 대한 잠재성 평가가 필요하다. 동소분지 잉어-1 공의 주요 퇴적층은 최하부 전기 백악기 화산암 복합체를 덮고 있고 상부 퇴적층 구간에 대해서는 현재까지 지질 시대 구분이 정립되지 않았다. 중기 마이오세 부정합면 직하에 분포하는 지층 구간 A는 평균 공극률이 36.98%로 매우 양호하나 분포 심도가 낮아서 잉어-1 공 주변 지역에서는 저장층으로 기대하기 어렵다. 하지만, 이와 대비되는 지층이 동소분지 북부 지역의 적정 심도에 넓게 분포할 가능성이 있어 추가 시추가 필요하다. 하부 지층 구간에서는 지층 구간 E가 상대적으로 공극률이 양호하고 사암이 우세하다. 잉어-1 공에서 지층 구간 E는 두께가 약 192 m이며 동소분지 북부 지역으로 가면서 점차 얇아 진다. 잉어-1 공은 분지 경계 단층 인근에 위치하고, 두꺼운 화산암이 하부에 분포하고 있어 지층 구간 E를 비롯한 퇴적층 구간에서 사암의 성숙도와 공극률이 불량한 것으로 해석되며, 동소분지 북부 지역에서 동 구간의 사암 성숙도와 품질이 양호할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 “CO₂ 지중저장 안전성 확보 기술개발(20212010200020)” 사업의 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다. 또한, 이 연구는 2021학년도 한국해양대학교 신진교수 정착연구지원사업 연구비의 지원을 받아 수행된 연구임을 밝힙니다. 논문의 심사과정에서 많은 조언을 통해 논문의 질적 향상에 도움을 주신 익명의 심사자들에게 감사드립니다.

REFERENCES

- ASTM International, 2005, Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass. Annu. Book ASTM Stand., D2216-05.
- Biot, M.A., 1941, General theory of three-dimensional consolidation. *Journal of applied physics*, 12, 155-164.
- Blum, P., 1997, *Physical properties handbook: a guide to the shipboard measurement of physical properties of deep-sea cores*. ODP Tech., Note, 26, doi:10.2973/odp.tn.26.1997.
- Bruognara, M., Degasperri, E., Volpe, C.D., Maniglio, D., Penalty, A. and Siboni, S., 2006, Wettability of porous materials, II: Can we obtain the contact angle from the Washburn equation?. *Contact Angle, Wettability and Adhesion*, 4, 143-164.
- Byun, H., Chung, C.-H., Park, S.-O., Lee, B.-S., Kwon, Y., Choi, E., Park, M. and Yi, S., 2013, Review on palynofloral studies of the Kunsan Basin (northern South Yellow Sea Basin) and their implications for depositional Age. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 119-144 (in Korean with English abstract).
- Chang, J.H., Park, Y.S., Kim, C.S. and Jin, J.H., 1990, Geological study on continental shelf area (Block I and Block II). In: *Assessments of Petroleum Potential, KIER Research Report, KR-90-5B*, Korea Institute of Energy and Resources, p. 3-58 (in Korean with English abstract).
- Cheong, T.J., Kwak, Y.H., Son, J.D., Oh, J.H., Bong, P.Y., Lee, H.Y., Ryu, B.J., Son, B.K., Hwang, Y.G., Kwon, Y.I., Lee, Y.J., Kim, H.J., Park, K.S., Park, K.P., Sunwoo, D., Yoo, D.G. and Kim, K.O., 1998, *Petroleum Resources Assessment of the Kunsan Basin*. KIGAM Research Report, KR-98(C)-33, 3-194 (in Korean with English abstract).
- Chough, S.K., Kwon, S.-T., Ree, J.-H. and Choi, D.K., 2000, Tectonic and sedimentary evolution of the Korean peninsula: a review and new view. *Earth Science Review*, 52, 175-235.
- Gibson, R.E., 1958, The progress of consolidation in a clay layer increasing in thickness with time. *Geotechnique*, 8, 171-182.
- Goodman, R.E., 1989, *Introduction to rock mechanics* (2nd ed.). Wiley, New York, 562 p.
- Hong, S.K. and Shinn, Y.J., 2014, Carbon isotopic composition of Miocene-Pliocene terrestrial plant matters in Gunsan Basin, Yellow Sea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 50, 529-537 (in Korean with English abstract).
- Jin, M.S., Lee, J.S. and Kim, S.J., 1991, K-Ar whole-rock ages of native copper-bearing basaltic rocks drilled from INGA-1 Well of the 2nd Block in the continental shelf, Yellow Sea, South Korea and their tectonic implication. *Journal of the Geological Society of Korea*, 27, 212-221 (in Korean with English abstract).
- Kim, J., Jeong, J.O., Shinn, Y.J. and Sohn, Y.K., 2022, Zeolitization of the Dacitic Tuff in the Miocene Janggi Basin, SE Korea. *Economic and Environmental Geology*, 55, 63-76 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.W., Kwon, S., Ryu, I.-C., Jeong, Y.-J., Choi, S.-J., Kee, W.-S., Yi, K., Lee, Y.S., Kim, B.C. and Park, D.W.,

- 2012, Characteristics of the Early Cretaceous igneous activity in the Korean Peninsula and tectonic implications. *The Journal of Geology*, 120, 625-646.
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 2004, Petroleum resources assessment of Block II, Korean Continental Shelf. KIGAM Report for Korea National Oil Corporation, 121 p (in Korean with English abstract).
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 2014, Site selection for pilot-scale CO₂ geologic storage in the Korean Peninsula. KIGAM Report for Korea CCS 2020 Project, Ministry of Science, ICT and Future Planning, 443 p (in Korean with English abstract).
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 2019, Evaluation of large-scale CO₂ geological storage potential. KIGAM Research Report, GP2017-027-2019, KIGAM, 291 p (in Korean with English abstract).
- Korea Petroleum Development Corporation (PEDCO), 1991, Evaluation of prospective concession block in continental shelf, Korea. PEDCO, 204 p (in Korean with English abstract).
- Kwon, Y.K., 2021, Comprehensive evaluation of CO₂ geological storage prospect and capacity in Korea. Conference of The Korea Organization Promoting for CCUS Development (K-CCUS), Seoul, November 3.
- Lee, C., Shinn, Y.J. and Ryu, I.C., 2016, Development of regional uplift and uplift-related strata in Gunsan Basin, Yellow Sea: implications for Cenozoic crustal extension. *International Geology Review*, 58, 2029-2045.
- Lee, H.-M., Song, I., Lee, H. and Kim, J.-C., 2015, Measurement errors of porosity due to rock types and test methods. 2015 Fall Joint Conference of Geological Science of Korea, Jeju, Korea, 421 p (in Korean).
- Lin, W., 2002, Permanent strain of thermal expansion and thermally induced microcracking in Inada granite. *Journal of Geophysical Research*, 107(B10), 2215, <https://doi.org/10.1029/2001JB000648>.
- Magara, K., 1980, Comparison of porosity-depth relationships of shale and sandstone. *Journal of Petroleum Geology*, 3, 175-185.
- Noorany, I., 1984, Phase relations in marine soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110, 539-543.
- Park, K.-S., Lee, H.-Y., Kang, D.-H. and Shin, W.-C., 2010, Structural development and geological age of rocks in the Gunsan Basin, Yellow Sea: a perspective from seismic data interpretation. *Journal of the Geological Society of Korea*, 46, 577-593 (in Korean with English abstract).
- Park, K.S., Park, K.P., Sunwoo, D., Yoo, D.G., Cheong, T.J., Oh, J.H., Bong, P.Y., Son, J.D., Lee, H.Y., Ryu, B.J., Son, B.K., Hwang, I.G., Kwon, Y.I., Lee, Y.J. and Kim, H.J., 1997, Petroleum resources assessment on the western part of the Kunsan Basin. In: *Petroleum Resources Assessment (I)*, KIGAM Research Report, KR-97(C)-17, Korea Institute of Geology, Mining and Materials, p. 3-190 (in Korean with English abstract).
- Parson, A.L. and Saltmarsh, A.C., 1991, Final well report, Kachi-1, Block II, Yellow Sea, South Korea. Marathon Petroleum Korea, Ltd., 59 p (unpublished).
- Republic of Korea, 2021, 2050 Carbon Neutral Scenario. Available at: <https://www.korea.kr/common/download.do?fileId=196125955&tblKey=GMN> (May 17, 2022).
- Rong, H., Jiao, Y., Wu, L., Zhao, X., Cao, M. and Liu, W., 2021, Effects of igneous intrusions on diagenesis and reservoir quality of sandstone in the Songliao Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 127, 104980.
- Ryu, I.C., Kim, B.Y., Kwak, W.J., Kim, G.H. and Park, S.J., 2000, Stratigraphic response to tectonic evolution of sedimentary basins in the Yellow Sea and adjacent seas. *Korean Journal of Petroleum Geology*, 8, 1-43 (in Korean with English abstract).
- Shinn, Y.J., 2015, Geological structures and controls on half-graben inversion in the western Gunsan Basin, Yellow Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 68, 480-491.
- Shinn, Y.J., Chough, S.K. and Hwang, I.G., 2010, Structural development and tectonic evolution of Gunsan Basin (Cretaceous-Tertiary) in the central Yellow Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 27, 500-514.
- Skempton, A.W., 1969, The consolidation of clays by gravitational compaction. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 125, 373-411.
- Subsurface Consultants and Associates, LLC (SCA), 2002, Tectonostratigraphic Basin Evaluation & Play Concept Study of Blocks I & II of the South Yellow Sea, Offshore Korea. The Korea National Oil Corporation (KNOC), 164 p.
- Watson, P.V., Bailey, H.W. and McGarva, R.M., 1989, Well: Inga-1 stratigraphy of the interval 1,660'-13,461' (T.D.). Paleoservices Ltd., 23 p (unpublished).
- Yi, S. and Batten, D.J., 2002, Palynostratigraphy of Upper Cretaceous (Maastrichtian) deposits in the Yellow Sea Basin, Korea. *Cretaceous Research*, 23, 687-706.
- Yi, S.H., Yi, S.S., Batten, D.J., Yun, H.S. and Park, S.J., 2003, Cretaceous and Cenozoic nonmarine deposits of the Northern South Yellow Sea Basin, offshore western Korea: palynostratigraphy and palaeoenvironments. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 191, 15-44.

Received : June 15, 2022

Revised : July 14, 2022

Accepted : July 25, 2022