

한반도 남동부 마이오세 장기분지 내 CO₂ 지중저장 가능성 평가를 위한 지질구조/퇴적학 연구

김민철¹ · 김용식² · 손의영¹ · 손 문^{1,*} · 황인걸³ · 신영재³ · 최현수³

¹부산대학교 지질환경과학과

²과학기술연합대학원대학교 석유자원공학과

³한국지질자원연구원 석유해저연구본부

요 약

국내 육상 1만 톤급 CO₂ 지중저장의 가능성 평가를 위해, 전기 마이오세 장기분지를 대상으로 지중저장에 적합한 유망 구조구역을 도출하고 지하 잠재 저장층/덮개층의 존재를 평가하였다. 장기분지는 충전물의 상대적 퇴적 시기와 지층의 자세를 근거로 구룡포, 오천, 뇌성산, 영암리지괴와 양포소분지로 구분된다. 이들 지괴 중 뇌성산지괴는 북서쪽으로 갈수록 분지심도가 깊어지며, 후기 현무암질 화산활동에 의해 함몰되어 지중저장을 위한 필요 심도의 조건을 충족할 가능성이 높다. 야외조사 결과, 분지충전물은 포함된 화산물질의 조성파 암상에 따라 하부로부터 장기역암, 성동리층, 뇌성산현무암질암으로 구분되며, 이들은 정합관계로 순차 피복한다. 장기역암은 주로 기반암 역을 다량 함유한 역암과 이에 협재하는 테사이트질 응회질(역질)사암으로 구성되어 지층의 전반적인 공극률과 투수율이 대체로 높다. 성동리층은 최소 4매의 테사이트질 응회암과 이와 교호하는 응회질 퇴적암으로 구성된다. 응회암은 결정편과 화산유리가 풍부한 기질 내에 다량의 부석, 압편, 탄화목을 포함하고 있으며, 응회질 퇴적암의 경우 분급과 원마도가 양호한 세립질 퇴적물이 우세하다. 뇌성산현무암질암은 용암류, 응회질 각력암과 관입암으로 구성된다. 따라서 장기역암을 피복하는 두 층은 상대적으로 투수도가 낮을 것으로 판단된다. 뇌성산지괴의 시추탐사 결과(JG-1), 장기역암(겉보기 두께 129.7 m)이 약 1,003.5 m 깊이의 분지기저에 퇴적되고 이를 성동리층(겉보기 두께 753.7 m)과 뇌성산현무암질암(겉보기 두께 120.1 m)이 피복함이 밝혀졌다. 이상의 결과들은 장기분지 뇌성산지괴의 지하심부에는 장기역암(잠재 저장층)이 분지기저를 따라 연장되고 그 상부를 성동리층과 뇌성산현무암질암(잠재 덮개층)이 두껍게 피복하고 있음을 시사하고 있어, 이곳에 CO₂ 지중저장을 위해 적절한 층서트랩이 존재할 가능성이 높은 것을 판단된다. 따라서 장기분지는 육상 CO₂ 지중저장 실증에 유망한 육상 퇴적분지로 평가된다.

주요어: 장기분지, CO₂ 지중저장, 뇌성산지괴, 장기역암(저장암), 성동리층(덮개암)

Min-Cheol Kim, Yong Sik Gihm, Eui-Young Son, Moon Son, In Gul Hwang, Young Jae Shinn and Hunsoo Choi, 2015, Assessment of the potential for geological storage of CO₂ based on structural and sedimentologic characteristics in the Miocene Janggi Basin, SE Korea. Journal of the Geological Society of Korea, v. 51, no. 3, p. 253-271

ABSTRACT: Preliminary assessment of the potential for structural domain and suitable reservoir/seal assemblages was performed in the Early Miocene Janggi Basin to evaluate an onshore site of geological CO₂ storage (10,000-ton class). The basin is divided into five structural domains, *i.e.* Guryongpo, Ocheon, Noeseongsan, and Yeongamri blocks and Yangpo Subbasin, based on relative chronology and bedding attitude of the basin fills. On the basis of the structural and stratigraphic features of each domain, it is estimated that southern part of the Noeseongsan Block is the most suitable area. Evidences of northwestward block-tilting and volcanogenic collapse are well observed in this area, and thus the depth of basin floor meets the requirements of CO₂ storage. Basin fills are classified into three conformable stratigraphic units, *i.e.* Janggi Conglomerate, Seongdongri Formation, and Noeseongsan Basaltic rocks in ascending order, based on the lithological and compositional characteristics of volcanogenic materials. Janggi Conglomerate is mainly composed of conglomerates intercalated with dacitic tuffaceous sandstones, and this may imply that the layer has relatively high porosity and permeability. The overlying Seongdongri Formation includes at least four dacitic lapilli tuff layers that have a large amount of poorly-sorted

* Corresponding author: +82-51-510-2248, E-mail: moonson@pusan.ac.kr

lapilli-sized pumices and lithic fragments in crystal- and glass-rich matrix. The tuffs are intercalated with relatively well-sorted and fine-grained tuffaceous sediments. The topmost Noeseongsan Basaltic rocks consist of a variety of extrusive and intrusive volcanic rocks. Two upper strata are expected to have a lower permeability than the Janggi Conglomerate. The results of an exploratory drilling hole (JG-1), which are acquired in the Noeseongsan Block, show that basin depth of 1,003.5 m and existing stratigraphic trap are sufficient for CO₂ storage. The results of drilling log reveal that the Janggi Conglomerate (129.7 m in apparent thickness) unconformably overlying the basements is overlain by the thick Seongdongri Formation (753.7 m in apparent thickness). All the results indicate that the Janggi Basin can be one of the promising onshore sedimentary basins for the CO₂ storage in Korea.

Key words: Janggi Basin, geological CO₂ storage, Noeseongsan Block, Janggi Conglomerates (reservoir), Seongdongri Formation (seal)

(Min-Cheol Kim, Eui-Young Son and Moon Son, Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Republic of Korea; Yong Sik Gihm, Department of Petroleum Resources Technology, University of Science and Technology, Daejeon 305-350, Republic of Korea; In Gul Hwang, Young Jae Shinn and Hunsoo Choi, Petroleum and Marine Research Division, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Republic of Korea)

1. 서 언

2005년 교토의정서 체결 이후 지구온난화 해결방안 마련을 위한 전 세계적인 노력이 계속되고 있다. 이러한 노력의 일환으로 우리나라 또한 2008년과 2009년의 C8 확대 정상회의를 통해 2020년 배출전망치(BAU, Business As Usual) 대비 30% 수준의 자발적인 감축목표와 시나리오를 공표하였다. 우리나라는 현재 교토의정서에 명시된 의무감축국은 아니지만, 2011년 기준으로 경제협력개발기구(OECD: Organization for Economic Cooperation and Development) 가입국 중 7위의 CO₂ 배출국가(OECDiLibrary, 2014)로 추후 의무감축 대상이 될 가능성이 높다. 이를 대비하기 위해서는 전 세계적으로 CO₂ 감축의 효과적 기술로 평가(IPCC, 2005; IEA, 2008a, 2008b)되는 CO₂ 포집과 저장(CCS: Carbonate Capture and Storage) 기술의 도입이 필요하다. 그 중 저장기술은 해양저장, 광물탄산염화, 지중저장 등으로 구분되는데(IPCC, 2005), 해양저장은 해저에 주입된 CO₂가 생태계 문제를 야기할 수 있으며, 광물탄산염화는 화학반응을 위한 에너지 비용이 높고 탄산염 광물의 처리로 인한 새로운 환경문제를 유발할 수 있다. 한편 지중저장의 경우, 포집된 CO₂를 육상이나 해저의 지하심부에 존재하는 다공성 암석 내에 주입하여 지구대기와의 접촉을 차단하는 방법이다. CO₂ 지중저장을 위해서는 석유배태조건과 유사하게 공극의 연결성이 충분히 높은 저장암(reservoir)과 그 상부에 유체가 거의 통과하기 힘든 낮은 투수율을 가지는 덮개암

(cap rock)이 존재하여야 한다. 이러한 일련의 조합을 트랩(trap)이라 하며, 부력을 가진 유체가 저장암과 덮개암의 경계를 따라 지표 근처까지 이동되는 것을 방지하기 위해 습곡 또는 단층과 같은 지하구조를 활용하는 구조트랩(structural trap)과 저장암이 하성퇴적물 또는 데브리 팬(debris fan)과 같은 렌즈 또는 썩기형 기하를 이루고 있어 양 측면이 모두 덮개암에 의해 차단된 층서트랩(stratigraphic trap)이 주로 활용된다(Hester and Harrison, 2010). 전 세계적으로 CO₂ 지중저장 실증사업이 실시되고 있는 곳의 지질학적 조건(저장암과 덮개암의 공극률과 투수율, 심도, 두께, 염도, 지온, 지압 조건 등)은 다양하며, 대표적인 실증사업으로 노르웨이의 슬라이프너(Sleipner), 스노흐비트(Snøhvit), 알제리의 인살라(In Salah), 캐나다의 웨이번(Weyburn) 등이 있다(표 1; Michael *et al.*, 2010). CO₂가 지하심부에서 초임계 유체상태를 유지할 경우 거동이 느리고 주변 지중유체나 지층과 반응하여 용해·고착되므로 비용대비 많은 양의 CO₂를 안정적으로 저장할 수 있다(IEA, 2008a, 2008b; Park *et al.*, 2009; Jang *et al.*, 2012). 또한 원유가스의 회수증진기술(EOR/EGR: Enhanced Oil/Gas Recovery)로도 활용 가능하다는 점에서 과학기술 측면은 물론 경제·산업적으로도 가장 효과적인 기술로 평가되고 있다(IPCC, 2005; Viebahn *et al.*, 2007; Bachu, 2008; Michael *et al.*, 2010; GGGP, 2011; Lenzen, 2011; Civile *et al.*, 2013; Hill *et al.*, 2013).

우리나라의 경우에도 전 세계적 탄소배출 규제에

Table 1. Properties of operations injecting CO₂ into saline aquifers (modified from Michael *et al.*, 2010).

Project name	Aquifer unit	Lithology	Porosity (%)	Permeability (mD)	Depth (m)	Thickness (m)	Salinity (mg/l)	Seal lithology	Thickness (m)	Temperature (°C)	Pressure (kPa)
Sleipner	Utsira Formation	Sandstone	37	5,000	1,000	250	35,000	Shale	75	37	10,300
Snøhvit	Tubåsen Formation	Sandstone	13	450	2,550	60	-	Shale	30	-	28,500
In Salah	Krechba Formation	Sandstone	17	5	1,850	29	-	Mud	950	90	17,900

대한 대비책으로 저탄소 녹색성장 기본법을 시행하여 전략적으로 CO₂ 지중저장 기술개발에 투자하고 있다. 그동안 CO₂ 저장부지의 확보를 위해 주로 해상의 퇴적분지를 대상으로 탐색이 수행되었는데(예: 동해 가스전과 울릉분지 등; Jang *et al.*, 2012), 이러한 해상저장소는 비용부담이 크기 때문에 우선적으로 육상에서의 소규모 실증사업을 통해 관련 기술을 점검하고 사업의 실용성 여부를 검증해 볼 필요가 있다. 비록 육상분지는 해저분지에 비해 잠재저장능력은 낮으나, CO₂가 배출되는 주요 생산시설과의 거리가 짧고 운송과 각종 시설의 설치·운영에 필요한 비용이 적다는 장점이 있다. 그동안 일부 육상 퇴적분지를 대상으로 부지 탐색을 시도하였으나, 백악기 경상분지의 경우 지하 심부에 놓인 사암층의 공극률과 투수율이 매우 낮으며, 마이오세 포항분지에서는 일부 유망 지역이 확인되나 도심화로 인한 한계점이 보고된 바 있다(Song *et al.*, 2015). 따라서 이번 연구는 국내 육상 1만 톤급 CO₂ 지중저장 실증에 있어 필수조건인 유망 후보지 확보를 위해, 마이오세 장기분지를 대상으로 적절한 조건을 갖춘 유망 구조구역을 도출하고 잠재 저장층과 덮개층의 존재 가능성을 평가하고자 하였다. 이를 위해 분지의 구조적 특징, 충전물의 층서 및 퇴적학적 특징과 더불어 대심도 시추결과를 종합적으로 고려하여 소규모 지괴로 분할하고 지하심부 구조를 예측하였다. 이번 연구결과는 추후 잠재 CO₂ 지중저장소의 저장능력과 안정성 평가를 위한 기본 자료로 활용될 것으로 판단된다.

2. 지질학적 배경

신생대 올리고세 말부터 중기 마이오세 동안 동아시아 일원에는 일본열도가 유라시아대륙으로부터

분리되어 동해가 남북 내지 북북서-남남동 방향으로 활발하게 확장하는 사건이 발생하였으며(Lallemant and Jolivet, 1985; Jolivet *et al.*, 1991, 1994; Jolivet and Tamaki, 1992; Son, 1998; Son *et al.*, 2013)(그림 1a), 이로 인해 한반도 일원에 지속적인 우수향 전단력이 작동하여 동해안을 따라 다수의 퇴적분지가 형성되었다(Son and Kim, 1994; Son, 1998; Son *et al.*, 2000, 2002, 2005, 2013; Cheon *et al.*, 2012; Jung *et al.*, 2012; Yoon *et al.*, 2014). 이들 분지는 지리적 위치와 충전물의 특성에 근거하여 북으로부터 포항, 장기, 와읍, 어일, 하서, 정자, 울산분지 등으로 구분되는데, 오천단층계(Cheon *et al.*, 2012) 남쪽의 분지들은 주로 전기 마이오세의 화산암류와 육성 퇴적암류로 충전된 반면, 북쪽의 포항분지는 중기 마이오세 초의 해성 퇴적물로 충전된 특성을 보인다(그림 1b). 그중 전기 마이오세 분지충전물은 일차 또는 이차 기원의 데사이트질~현무암질 화산물질을 다량 포함하며 이들과 함께 측방과 수직으로 퇴적상의 변화가 심한 쇄설성 퇴적물이 교호하는 복잡한 양상을 보여주고 있어 이들의 암층서적 분대에 관한 의견이 다양하다(Tateiwa, 1924; Yun *et al.*, 1991; Yoon, 1992). 그러나 최근 한반도 남동부 일원의 분지들에 대한 세밀한 조사가 수행되어, 전기 마이오세 충전물은 조성 차이가 뚜렷하고 명확한 선후관계를 보이는 데사이트질과 현무암질 화산물질을 건층으로 활용하여 각각 하부의 범곡리층군과 상부의 장기층군으로 층서가 재정의 된 바 있다(Son, 1998; Son *et al.*, 2000, 2005, 2013; Kim *et al.*, 2005, 2011; Cheon *et al.*, 2012; Jung *et al.*, 2012; Shin *et al.*, 2013; Yoon *et al.*, 2014).

장기분지는 한반도 남동부에서 가장 큰 전기 마이오세 퇴적분지로, 행정구역상 포항시 남구의 장기면과 오천읍, 장기반도 일원에 걸쳐 위치한다(그림

1b). 분지의 명칭은 Lee *et al.* (1992)에 의해 처음 명명되었으나, 아직까지 분지의 경계와 정의가 명확히 밝혀지지 않은 상태이며 충전물의 층서 또한 단위지층의 정의와 선후관계에 있어 연구자에 따라 견해가 다양하다. Kim *et al.* (2011)은 이곳 충전물의 층서적

논란의 주 원인은 지층의 분대 기준이 명확하지 않은데 있음을 지적하고, 충전물 내에 포함된 테사이트질과 현무암질의 이원성 화산물질을 건층으로 활용하여 분지충전물의 암층서를 새로이 수립한 바 있다(그림 2). 즉, 장기면 영암리에서 성동리 일원에 걸

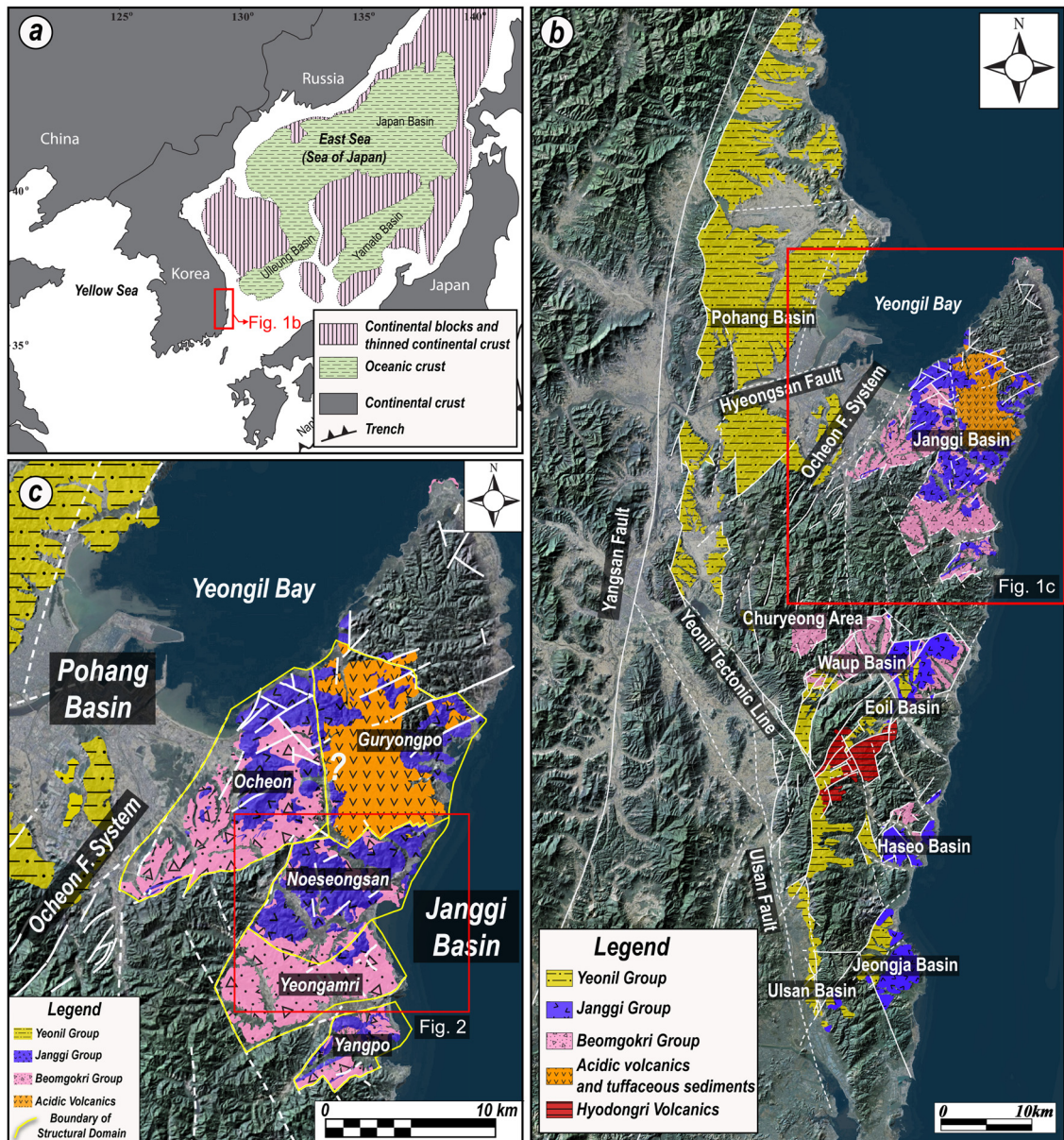


Fig. 1. Tectonic and geological maps around the study area. (a) Simplified tectonic map of the East Sea (after Jolivet *et al.*, 1991). (b) Landsat TM satellite image of the southeastern Korean Peninsula showing the distribution of the Miocene sedimentary basins and major faults (from Son *et al.*, 2013). (c) Simplified geological map of the Early Miocene Janggi Basin with five structural domains classified based on stratal attitudes and relative chronology of the basin fills.

쳐 분포하는 분지충전물은 하부로부터 범곡리층군의 장기역암과 성동리층 그리고 장기층군에 속하는 뇌성산현무암질암으로 세분하였다. 한편, 최하부의 장기역암이 대부분 조립질 쇄설성 퇴적물로 구성되고 최소 4매의 데사이트질 응회암과 입도가 낮은 쇄설성 퇴적물들로 교호되는 성동리층에 의해 두껍게 피복되고 있음은 분지 지하에 CO₂ 지중저장을 위한 층서트랩이 존재할 가능성을 암시한다.

한편, Bahk and Chough (1996)은 장기분지 남동부의 충전물에 대한 화산퇴적학적 연구를 통해 전기

마이오세 동안 지각의 지속적인 확장과 함께 활발한 화산활동에 따른 분출기와 휴지기가 교대되며 일련의 화산쇄설성과 쇄설성 퇴적물이 반복적으로 분지를 충전하였음을 보고하였다. 이후 Sohn *et al.* (2013)은 장기분지 남부 양포소분지의 화산퇴적학적 연구를 통해 당시 퇴적환경의 형성과 진화에 있어 빠른 분지침강과 급격한 화산물질의 공급이 중요하였음을 보고하였다. 충전물 중 현무암질 화산암류의 연대는 22.1~17.2 Ma (K/Ar: Kim *et al.*, 1986; Jin *et al.*, 1988; Lee *et al.*, 1992)로 보고된 바 있다.

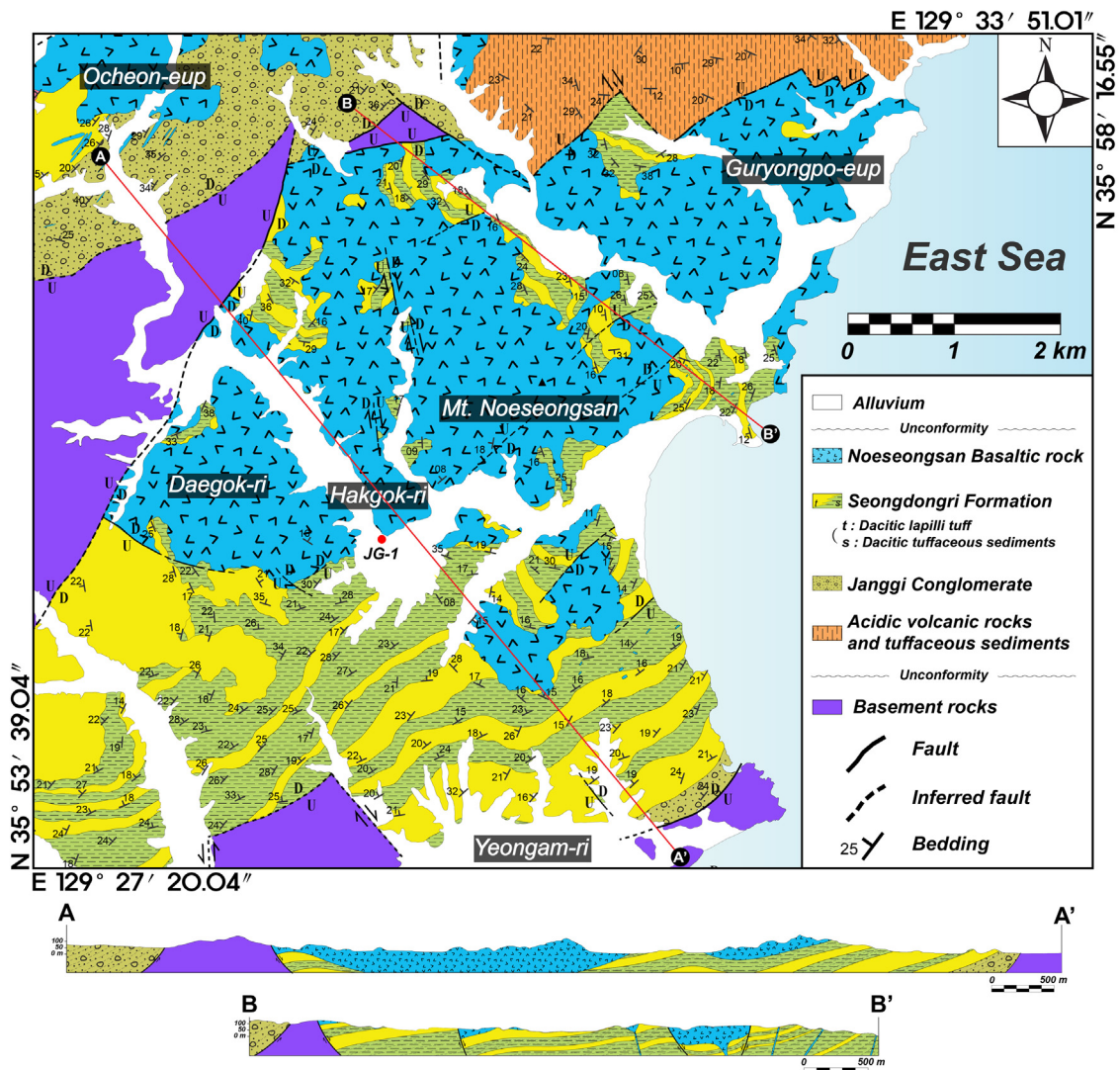


Fig. 2. Detailed geological map and representative cross sections of the study area with the locality of drilling hole (JG-1) (modified and improved from Kim *et al.*, 2011).

3. 분지의 구조구 분할

장기분지에 대한 기존 연구결과(Kim *et al.*, 2011; Cheon *et al.*, 2012; Jung *et al.*, 2012)와 이번 연구에서 얻어진 자료들을 종합하여 충전물의 상대연령과 층리면자세를 근거로 5개의 구조구역으로 분지를 구분하였다. 즉, 북으로부터 구룡포, 오천, 뇌성산, 영암리지괴 그리고 기반암에 의해 장기분지 남단에 격리되어 나타나는 양포소분지로 구분하였다(그림 1c). 먼저 구룡포지괴의 경우, 다른 지괴들에 비해 보다 고기의 산성질 응회암 및 응회질 퇴적암에 의해 충전된다. 이 충전물은 야외에서 다시 용암류, 응회암 및 이와 교호하는 응회질 퇴적암으로 구성됨이 인지되나, 각 암상의 분포와 선후관계는 현재로서는 명확하지 않다. 이 지괴는 대체로 북서로 경동된 다른 지괴들과는 달리 남쪽으로 경동되어 있다. 한편, 오천, 뇌성산, 영암리지괴와 양포소분지는 모두 구룡포지괴에 비해 보다 후기의 충전물로 채워졌으며, 서로 유사하게 최하부에 역질 내지 사질의 조립질 퇴적체가 분포하고 이들은 하위의 데사이트질 화산물질을 포함

한 지층들과 상위의 현무암질 화산물질을 포함한 지층들로 피복된다(Kim *et al.*, 2011; Cheon *et al.*, 2012; Jung *et al.*, 2012). 오천, 영암리지괴와 양포소분지의 남부는 모두 지층이 체계적으로 북서로 경사진 반면, 뇌성산지괴와 양포소분지의 북부는 현무암체를 중심으로 경사 방향이 수렴되는 경향을 보인다. 특히 양포소분지의 북부는 현무암질 다이아트림의 형성과 관련하여 아원형으로 함몰된 특징을 보인다(Son *et al.*, 2012; Sohn *et al.*, 2013).

각 지괴들은 현무암질 암석의 산상과 분포 특성에서도 뚜렷한 차이를 보이는데, 구룡포지괴와 양포소분지의 북부는 특징적으로 관입상의 현무암류가 우세하다. 특히 구룡포지괴는 동북동으로 배열된 현무암질 암맥군이 체계적으로 관찰된다. 뇌성산지괴는 분출상의 현무암류가 지괴를 광범위하게 피복한 것이 특징이며, 오천과 영암리지괴의 경우에는 맥상의 현무암이 매우 국지적으로 출현한다. 이상의 특징들은 장기분지 내부 지괴들의 진화사 즉, 지괴의 침강과 경동, 퇴적활동 등이 시공간적으로 서로 차이가 있었음을 의미한다.

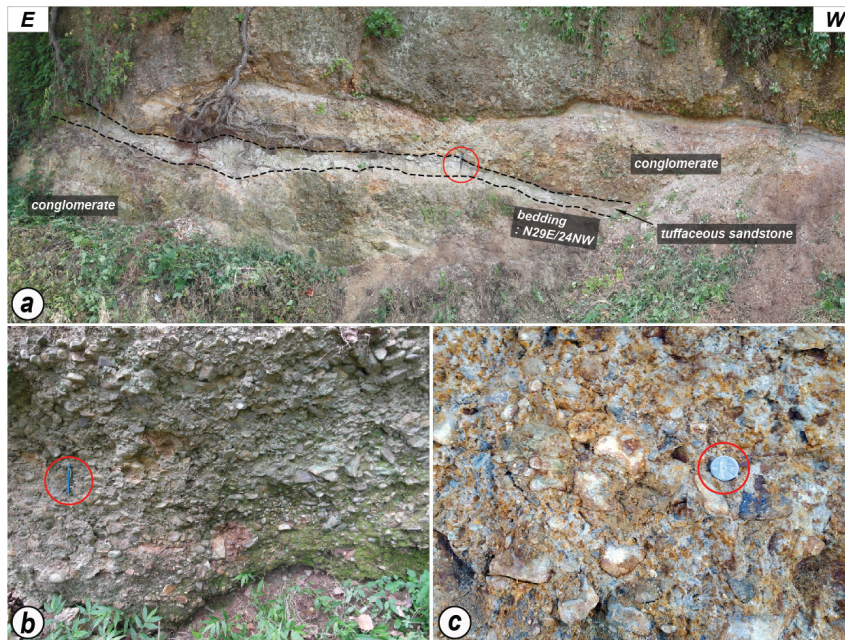


Fig. 3. Outcrop photographs of the Janggi Conglomerates. (a) Disorganized, massive, poorly-sorted, clast-supported, angular to subrounded pebble- to cobble-grade conglomerate beds intercalated with crudely stratified, moderately sorted, dacitic tuffaceous sandstone beds. (b, c) Poorly-sorted, angular to subangular, pebble- to cobble-sized clasts mostly consisting of the Paleogene rhyodacitic and andesitic volcanic rocks derived from the adjacent basement rocks. The pencil for scale is 15 cm long, the coin is 2 cm in diameter.

Table 2. Characteristics of the depositional units in the representative columnar sections of the basin fills in the figures 4 and 10.

Unit	Code	Lithofacies	Description
Dacitic tuffaceous sediments	M	Mudstone/siltstone	0.1 to 15 m thick; greyish (organic-poor) or dark grey (organic-rich) in color; generally massive; rich in plant debris; commonly intercalated with massive (volcaniclastic) sandstones or normally graded sandstones
	Sn Sn (v)	Normally graded (volcaniclastic) sandstone	0.1 to 0.3 m thick; very fine to very coarse sand or ash; normal grading or coarse-tail normal grading; planar laminations in upper part; very coarse to granule sized, angular to subrounded lithic clasts in lower part; sharp or erosional boundary
	Sm Sm (v)	Massive (volcaniclastic) sandstone	0.1 to 0.3 m thick; very fine to massive sand or ash; sometimes planar and/or wavy stratifications in the uppermost part; commonly interbedded with mudstones; sharp lower boundary
	GS	Stratified gravelly sandstone	0.5 to 2 m thick; pebble to cobble, subangular to subrounded clasts; clast- or matrix-supported; coarse to very coarse sandstone crude planar or low-angle cross stratification defined by alignment of elongated clasts
	GSx	Cross-stratified gravelly sandstone	0.2 to 1 m thick; pebble to small cobble, subangular to rounded clasts with very coarse sand; concave-upward geometry with planar to trough cross-stratifications
	Gm	Disorganized conglomerate	0.4 to 3 m thick; pebble to cobble (rarely boulder); clast- or matrix-supported; poorly-sorted silt to very coarse sandy matrix; disorganized clasts fabric or a(p)a(i) fabric in lowermost part
Dacitic lapilli tuff	DmLT	6 to 60 m thick; generally massive; angular to subrounded, medium ash to lapilli-sized lithic fragments with subrounded to rounded fine ash to lapilli-sized pumices supported by a fine to very fine ash matrix; coarse-tail normal grading of both lithic fragments and pumices; dominance in scattered charcoal and coal fragments; vertical to subvertical gas segregation pipes	
Basaltic tuff	BmLT	4 to 110 m thick, massive and poorly-sorted; clast- or matrix-supported; angular to subangular, coarse ash to bomb-sized basaltic lithic fragments (monomictic); irregular or angular margin of the lithic clasts; ash pellets; diffuse stratifications	

한편 CO₂ 지중저장 관점에서 지괴별 특징을 살펴 보면, 구룡포지괴는 층서와 지질구조 특성에 관한 정보가 부족하고 현재로서는 저장암으로써 가능한 지층이 야외에서 관찰되지 않으며, 오천지괴는 충전물의 화산퇴적학적 특징에 대한 정보가 부족하고 각종 주거와 산업 시설들이 밀집되어 있어 국민수용성 측면에서 난관이 예상된다. 또한 양포소분지는 기반암에 의해 둘러싸여 있고 다른 지괴에 비해 규모가 작아 CO₂ 지중저장에 필요한 적절한 심도를 확보하기 어려울 것으로 판단된다. 따라서 현재로서는 암상의 수직분포 특성이 CO₂ 지중저장에 적합한 층서트랩에 유리하고 분지심도도 비교적 깊을 것으로 예상되는 영암리와 뇌성산지괴 내에 유망 후보지가 존재할 가능성이 상대적으로 가장 높다.

4. 영암리와 뇌성산지괴의 충전물과 지질구조

영암리와 뇌성산지괴의 남동과 북서쪽 경계부는

기반암인 고제3기의 유문암질 내지 데사이트질 화산암류와 북동 내지 동북동 방향의 정단층으로 경계된다(그림 2). 충전물은 포함된 화산물질의 조성과 상대연령에 근거하여 전기의 데사이트질 화산물질을 포함하는 범곡리층군과 후기의 현무암질 화산물질을 포함하는 장기층군으로 구분된다(Son *et al.*, 2013). 범곡리층군은 하부로부터 장기역암과 성동리층으로 세분되며, 장기층군은 뇌성산현무암질암이 해당된다(Kim *et al.*, 2011). 각 지층은 모두 정합으로 순차 접촉한다.

4.1 충전물의 층서와 암상

4.1.1 장기역암(Janggi Conglomerate)

장기역암(Tateiwa, 1924)은 장기분지의 최하위 충전물로, 영암리지괴의 남동부 경계단층 인접부의 노두에서 관찰된다(그림 2, 3). 특징적으로 약 1~3 m 두께의 역암과 0.5 m 이하 두께의 데사이트질 응회질 역질사암 또는 사암이 호층을 이루며, 약 0.1~0.5 m

두께의 이암과 5 cm 이하 두께의 갈탄이 협재된다 (표 2, 그림 4). 역암은 대부분 괴상이나 일부는 역의 배열이 발달하기도 하며, 대부분 미사~조립사 크기의 기질 내에 분급과 원마도가 불량한 잔자갈~왕자갈 크기의 역들이 기질지지 또는 역지지된 특징을 보인다. 역의 종류는 기반암인 고제3기의 유문암질 내지 데사이트질 응회암이 지배적이다. 역질사암과 사암은 조립사와 세립의 데사이트질 조성을 갖는 응회질 물질로 구성된 기질 내에 분급과 원마도가 보통 내지 양호한 잔자갈 크기의 역들이 기질지지 또는 역지지되어 있다. 이들은 노두에서 쉽게 부스러질 정도로 상당히 미고결된 특징을 보인다. 이상과 같이 장기역암은 상대적으로 조립인 퇴적물이 우세하여 지층 전반의 투수성이 높을 것으로 추정된다.

4.1.2 성동리층(Seongdongri Formation)

성동리층(Kim et al., 2011)은 측방 연속성이 비교적 양호한 데사이트질 응회암을 건층으로 분대된 지층이다. 이 층은 최소 4매 이상의 데사이트질 응회암과 이와 교호하는 하성과 호성 기원의 응회질 퇴적암으로 구성된다(표 2; 그림 4, 5a, 5b). 데사이트질 응회암은 변질 상태에 따라 흰색, 노란색, 황갈색 등의 다양한 암색을 띠는 세립질 기질 내에 분급과 원마

도가 불량한 화산력 크기의 부석편, 암편, 장석편, 흑운모편을 다량 포함한다(그림 5c, 5d). 암편은 대체로 어두운 색을 띠는 기반암(유문암질 내지 데사이트질 응회암)과 안산암편, 그 외 일부 화강암편과 세립질 퇴적암편을 포함하며, 지층 전반에서 다량의 탄화목과 탄질물이 관찰된다. 이 응회암은 대부분 괴상이나 미약한 용결구조가 관찰되기도 하며, 국부적으로 층리가 관찰되나 측방 연속성이 명확하지 않고 형태가 불규칙한 경우가 많다.

응회질 퇴적암의 경우 수직·수평적 퇴적상의 변화가 심하여 입도가 다양하나, 장기역암에 비해 상대적으로 입도가 작고 분급과 원마도가 양호한 암상이 우세하다(그림 4, 5e, 5f). 대부분 층리가 잘 발달하며, 역암 내에 역의 배열이 발달하기도 한다. 퇴적암 내에도 세립질의 데사이트질 화산기원 물질이 다량 포함되며, 부석, 화산재 등을 다량 포함한 층들은 대부분 담색으로 변질된 특징을 보인다. 사암은 평균적으로 10~30 cm의 두께로 층리가 발달하며, 흔히 정점이층리와 함께 점차 상향세립화 되어 최상부에 박층의 갈탄이 협재된다. 실트암 내지 이암의 경우 응회질 물질을 다량 포함하여 밝은 색을 띠는 것과 그렇지 않은 것이 모두 관찰되며, 모두 측방 연속성이 양호하다. 이들 퇴적암은 공통적으로 다량의 식

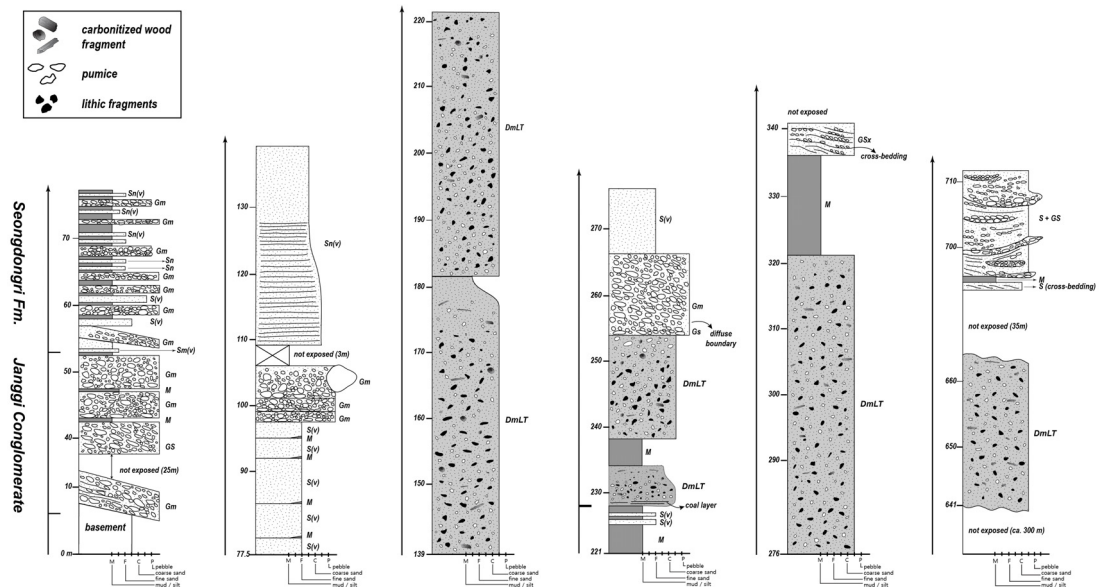


Fig. 4. Representative columnar sections of the Janggi Conglomerate and the Seongdongri Formation in the Yeongamri Block. See Table 1 for the detailed description of each unit.

물화석을 포함한다. 성동리층 내에는 다량의 화산물 질과 세립질 퇴적물이 포함되어 있어, 화산물질의 비율과 퇴적물의 입자크기를 기준으로 판단한다면 지층 전반의 투수성이 앞서 거론된 장기역암에 비해 낮을 것으로 추정된다.

4.1.3 뇌성산현무암질암(Noeseongsan Basaltic rock)

뇌성산현무암질암(Kim *et al.*, 2011)은 하위의 암 석을 피복한 용암류, 응회질 각력암, 암상, 암맥 등 다양한 산상의 현무암질 화산암류로 구성된다(그림 6). 주로 뇌성산지괴의 고지에 광범위하게 분포하는

분출산상의 현무암은 부조화적이고 불규칙한 자세 로 하위 지층을 피복한다. 용암류는 흔히 다공질조 직, 행인상조직, 주상절리, 흐름절리가 발달하며 측 방면속성이 불량하다. 응회질 각력암은 용암류와 측 방 또는 상하로 점이적이거나 불규칙한 경계로 접하 며, 기질지시성 응회암과 역지시성 집괴암이 모두 관찰된다. 역은 현무암이 지배적이며, 주로 화산력 내지 화산탄 크기이나 일부 최대 약 2 m의 화산암괴 도 관찰된다. 대부분 괴상이나 국부적으로 불규칙한 층리가 발달하기도 한다. 관입산상의 현무암은 100 m 이상의 폭을 보이는 것과 수 m 규모의 암맥까지

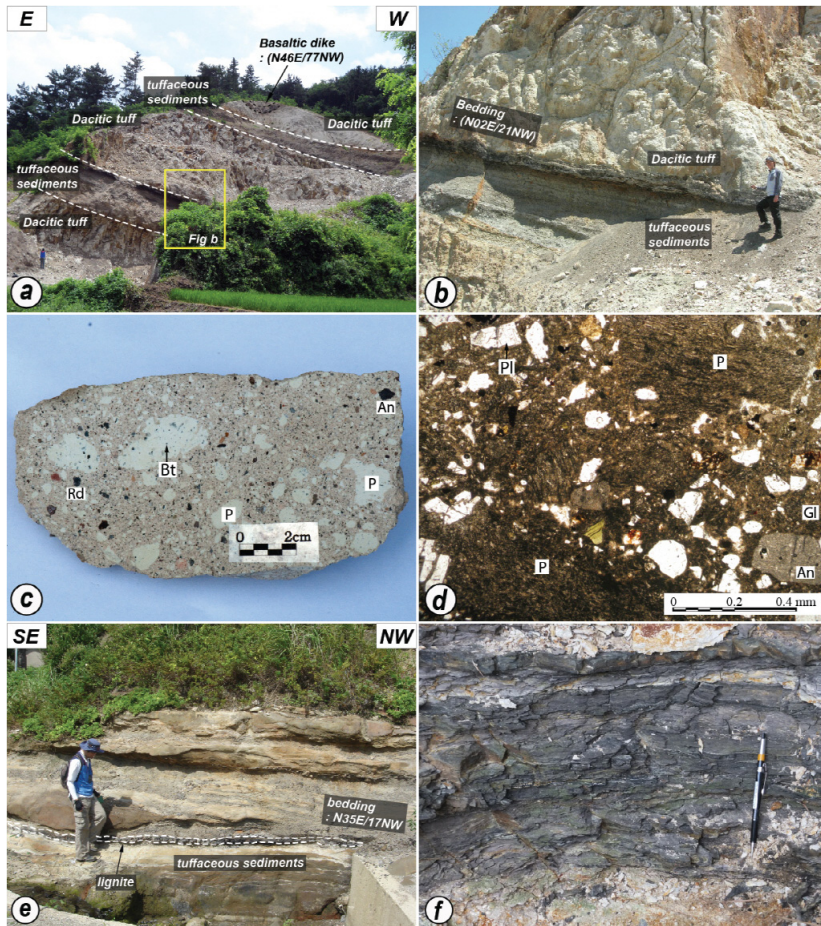


Fig. 5. Photographs showing the Seongdongri Formation. (a) Pumiceous dacitic lapilli tuffs alternated with dacitic tuffaceous sediments (modified from Fig. 5a of Kim *et al.*, 2011) and its closer view (b) showing conformable boundary between the tuff and tuffaceous sediments dipping northwestward. Photograph of slab (c) and photomicrograph (d) of the dacitic lapilli tuff in the Seongdongri Formation. Subangular to subrounded pumices (P), lithic fragments (An: andesite, Rd: rhyodacite), and crystal fragments (Bt: biotite, Pl: plagioclase) are supported by very fine to fine grained ash- and glass-rich (Gl) matrix. (e) Stratified dacitic volcaniclastic sandstone beds intercalated with a thin lignite bed. (f) Dark coloured, stratified, plant-debris rich lignite bed (ca. 40 cm thick).

다양한 규모로 산출되며, 주로 뇌성산 동부에 분포한다. 관입 경계부를 따라 주변암이 흔히 열변성을 겪었으며, 관입암체 내부에 불규칙한 방향성의 주상 절리가 발달된다. 뇌성산현무암질암은 대부분 지층이 현무암질 화산암류로 구성되어 전반적으로 투수성이 낮을 것으로 추정된다.

4.2 지층의 두께

야외조사에서 확인된 각 지층의 분포와 자세를 활용하여 각 지층의 두께를 도화적으로 계산하였다(표 3). 지층 분포지의 지형적 특징에 따라 식 (1)과 (2) (Rowland *et al.*, 2007)를 구분하여 적용하였다. 이때, t 는 계산된 도화적 지층 두께, h 는 지층의 하부와 상부 주향선 사이의 수평 거리, v 는 지층의 하부와 상부 주향선 사이의 수직 거리, δ 는 지층의 평균 경사이다.

$$t = h \sin \delta \quad (1)$$

$$t = h \sin \delta + v \cos \delta \quad (2)$$

그 결과, 영암리지괴를 기준으로 장기역암과 성동

리층의 도화적 두께는 각각 최소 112.3 m, 844.9 m이며, 뇌성산현무암질암의 도화적 두께는 뇌성산지괴를 기준으로 최소 389.0 m이다. 즉, 장기분지는 뇌성산 정상부(212 m 고지)를 기준으로 최소 1,000 m 이상 깊은 심도를 가지고 있어, CO₂ 지중저장을 위한 필요 심도를 충족시키기에 유리한 조건을 갖추고 있다.

4.3 구조적 특성

주요 단층과 지층의 자세 자료를 이용해 그림 7의 구조도를 작성하였다. 분지 내부에 발달하는 북동, 북서 방향 단층과 지층의 자세가 확연한 차이를 보이는 지점들을 연결한 선을 기준으로 영암리지괴와 뇌성산지괴를 구분하였다. 영암리지괴는 단층과 현무암체 주변 인접부 일부를 제외하면 지층들이 체계적으로 북서로 경사져 있다(그림 7, 8a). 이러한 체계적인 분포의 주요 원인 중 하나는 전형적인 반지구형 분지 형성으로(Wernicke and Burchfiel, 1982; Wise, 1992; Luccihitta and Suneson, 1993; Schlische, 1993), 영암리지괴 내 북서 방향의 지층경사는 북동 내지 동북동 방향의 정단층에 의해 분지가 북서-남동 방향으로 확장되고 북서를 향해 지괴가 경동되었

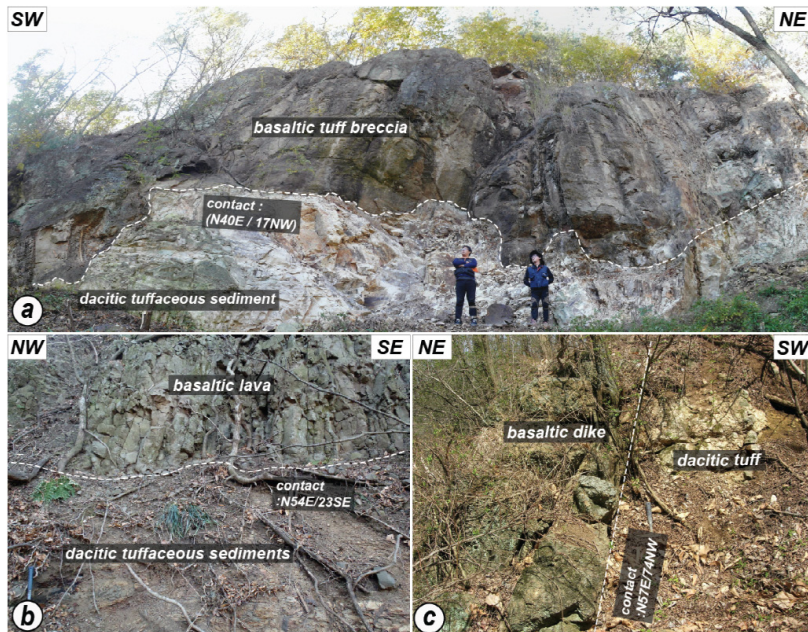


Fig. 6. Outcrop photographs showing major features of the Noeseongsan Basaltic rocks. (a, b) Conformable extrusive contact between the basaltic rocks and the underlying dacitic tuffaceous sediments. (c) Basaltic dike intruding into the dacitic tuff.

음을 간접적으로 지시한다. 한편 뇌성산지괴의 경우 서쪽으로 경사진 층리가 우세하나, 성동리층 층리의 주향이 전반적으로 인접한 분출산상의 현무암류와의 경계와 거의 평행하게 뇌성산 정상을 중심으로 회전되는 양상을 보인다(그림 7, 8b). 또한 현무암류와 성동리층의 경계 인접부와 현무암질 응회질 각력암 내의 불규칙한 층리 일부를 제외하면, 대부분의 층리는 뇌성산 고지를 향해 경사진 특징을 보인다.

CO₂ 지중저장의 관점에서 중요한 장기분지의 구조적 특징을 종합하면, 1) 영암리지괴는 비교적 체계적으로 북서향 경동된 반지구형 기하 특성을 보이며, 따라서 북서쪽으로 갈수록 보다 분지의 심도가 깊어질 것으로 해석된다. 2) 분지의 북서향 경동을 통해 분지 북서쪽의 북동 내지 동북동 경계단층이 남동으로 경사진 점완/서가형 정단층임을 추론할 수 있으며, 따라서 이 단층들 인접부는 중앙부에 비해 심도가 다시 얕아질 것으로 예상된다. 3) 분지의 북서향 경동 이후, 흔히 추가적인 함몰을 유발하는 것으로 알려진 현무암류가 뇌성산지괴에서 광범위하게 분출됨에 따라 영암리지괴보다 깊은 기반암 심도를 가질 가능성이 높다. 4) 뇌성산지괴 내의 성동리층 지층의 주향은 뇌성산 고지를 중심으로 회전되며 몇 개의 동심원 상의 주향 분포를 보이고 있어(그림 7), 이곳은 과거 현무암질 화산활동의 중심지로 해석되며 지하에는 이와 관련한 복잡한 구조가 형성되어 있을 것으로 판단된다. 5) 뇌성산 동부에는 최

소 100 m 폭의 대규모 현무암질 관입체와 다수의 암맥들이 분포하고 있어 마그마 관입으로 인해 지하구조가 복잡할 것으로 판단된다. 이상을 종합하면, 뇌성산지괴 내의 학곡리 또는 학계리 남서부 지역은 기반암 심도가 깊어 유망 저장층과 덮개층 조합이 지하 약 800 m 이상의 깊이에 존재할 가능성이 높고, 현무암류가 분포하고 복잡한 구조를 보이는 인근 지역에 비해 체계적인 지층 기하를 보이므로 육상 1만 톤급 CO₂ 지중저장소로서 유리한 지질조건을 갖추고 있을 것으로 추정된다.

4.4 시추탐사 결과

유망 구조구역의 지하 분지충전물 암상분포와 구조특성을 확인하기 위해, 지질학적 조건, 장비의 접근성, 주민 거주구역의 분포, 각종 인허가 문제 등의 현실적 조건을 종합적으로 고려하여 뇌성산지괴 내의 학곡리 남서부 학곡교 인근에 1개 지점의 시추위치(그림 2의 JG-1)를 선정하여 탐사를 실시하였으며, 그 결과 지표면으로부터 1204.0 m 깊이의 시추코어(drilling core)가 확보되었다(그림 9). 시추지점의 분지심도는 1003.5 m로, 기반암인 유문암질 내지 데사이트질 화산암류를 기저역암이 부정합으로 피복하고 있다(그림 9b, 9c).

기저의 퇴적층은 기반암 기원의 역을 다량 포함한 역암과 기질 내에 데사이트질 물질을 포함한 역질 사암 및 사암으로 주로 구성되어 지표의 장기역암과

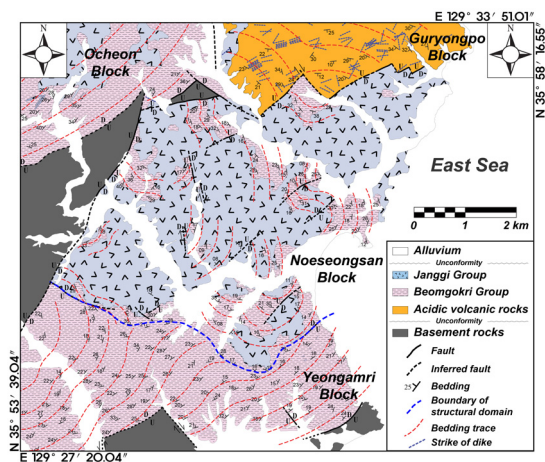


Fig. 7. Structural map of the study area showing bedding traces of the basin fills with various structural data (modified and improved from Kim *et al.*, 2011).

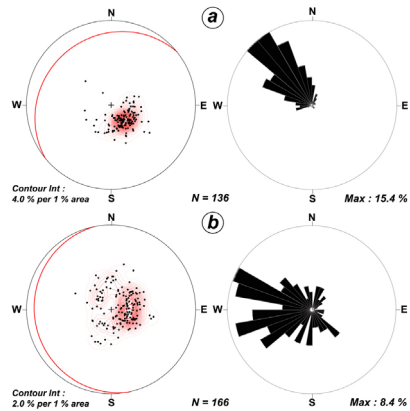


Fig. 8. Contoured π -diagrams (lower-hemisphere, equal-area projection) and rose diagrams showing the distribution of poles to beddings and their dip directions, respectively, in the Yeongamri Block (a) and the Noeongsan Block (b).

매우 유사하다(표 2; 그림 10). 이 역암층은 약 873.8 m 깊이에서 데사이트질 응회암에 의해 정합으로 피복됨으로써(그림 9d, 9e), 총 129.7 m의 겉보기 두께로 확인된다. 보다 상부인 깊이 873.8~120.1 m 구간에 걸쳐 데사이트질 응회암과 응회질 퇴적암의 호층으로 구성된 성동리층이 분포한다. 총 753.7 m의 구간 동안 최소 2.3 m에서 최대 108.4 m의 겉보기 두께를 보이는 총 9매의 데사이트질 응회암이 관찰되며(그림 9a), 이들의 암석기재학적 특징은 야외 관찰 결과와 동일하다. 데사이트질 응회질 퇴적암은 하부에 중조립질의 사질 입자로 기질이 채워진 조립질 퇴적물의 비율이 우세하나, 상부로 갈수록 이암과 실트암 등의 세립질 퇴적물의 비율이 증가하는 경향을 보인다(표 2; 그림 10). 이후 120.1 m 깊이에서 뇌

성산현무암질암이 성동리층을 정합적으로 피복하는 경계가 확인되며(그림 9a, 9f, 9g), 이 지층은 깊이 120.1~115.6 m의 구간 내에 협재된 일부 이암과 실트암을 제외하고는 모두 화산력 응회암으로 구성된다. 이 화산력 응회암은 대체로 치밀하고 괴상이나 일부 미약한 엽층이 관찰되기도 한다. 특징적으로 검은 세립질 기질 내에 각진 현무암편과 사상석 결정편을 다량 포함한다. 이상과 같이 이번 시추조사에서 얻어진 분지층전물의 수직적 분포와 각 단위층의 겉보기 두께는 야외조사를 통해 얻어진 결과와 거의 일치한다(그림 2, 9). 한편, 깊이 570.5~503.8 m 구간 내에는 겉보기 폭 3.3~42.15 m의 현무암질 암맥이 3매 관찰된다(그림 9a). 관입 경계면은 주변암의 층리와 부조화적이며 접촉부에는 급랭대와 열변성

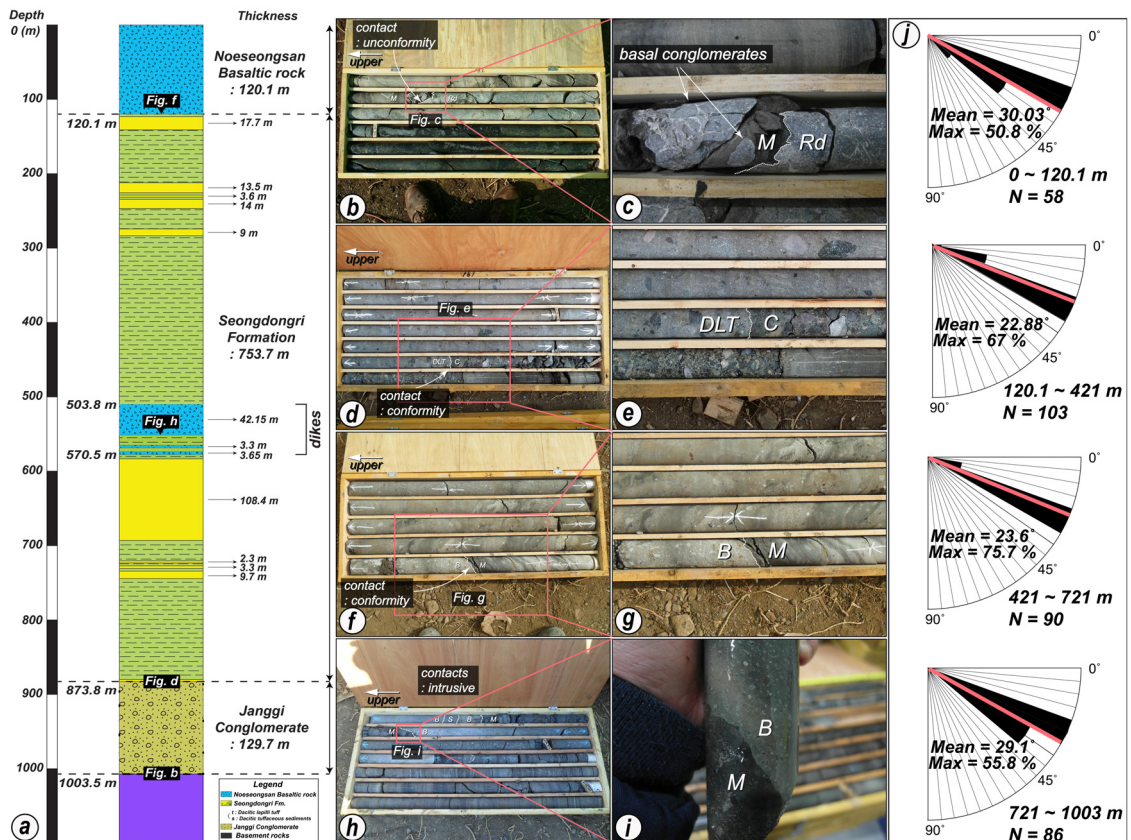


Fig. 9. (a) Simplified columnar section of the Janggi-1 (JG-1) borehole showing depth of the basin floor and vertical thicknesses of the basin fill units. Photographs of the core (b, d, f, h) and its closer views (c, e, g, i). (b, c) Unconformable contact between the basement (Rd: rhyodacitic volcanic rocks) and basal conglomerate of the Janggi Conglomerate. Conformable contacts between the Seongdongri Formation and the underlying Janggi Conglomerate (d, e) and the overlying Noeseongsan Basaltic rock (f, g). (h, i) Basaltic dike intruding the Seongdongri Formation. (j) Rose diagrams showing vertical variation of dip angles of the basin fills.

Table 3. Stratigraphic thicknesses of the basin fill units calculated from the descriptive geometries with vertical thicknesses measured from cores.

Formation	Janggi Conglomerate	Seongdongri Formation	Noeseongsan Basaltic rock
Applied equation	(1)	(1)	(2)
Horizontal width (h)	276 m	2734 m	523 m
Vertical distance (v)	-	-	132 m
Average dip angle (δ)	24°	18°	32°
Calculated stratigraphic thickness (t)	112.3 m	ca. 844.9 m	ca. 389.0 m
Apparent thickness from core	129.7 m	753.7 m	120.1 m

Table 4. Porosity and permeability data of selected rock samples from the Janggi Conglomerate of the JG-1 core.

Sample ID	Top (m)	Base (m)	Lithology Code	Porosity (%)	Permeability (mD)
1	-	715.30	Normally graded volcanoclastic sandstone	27.61	>1300
2	798.60	798.74	Normally graded volcanoclastic sandstone	12.58	0.0401
3	886.60	886.71	Normally graded sandstone	27.82	89.037
4	-	895.00	Massive conglomerate	13.79	3.1476
5	966.80	966.93	Massive conglomerate	14.38	0.0139
6	982.85	983.00	Normally graded sandstone	-	0.495

대가 암맥과 주변암에서 각각 관찰된다(그림 9h, 9i).

테사이트질 화산물질을 포함하는 장기역암과 성동리층을 약 300 m 구간으로 나누어 평균 지층 경사를 구해보면(그림 9j), 지층의 경사가 지하로 갈수록 점점 깊어지는 특징(평균 23° → 29°)이 관찰되고 있어 분지가 형성될 시 퇴적동시성 지괴경동이 발생하였다는 해석을 뒷받침한다. 한편, 뇌성산현무암질암의 층리 경사(평균 30°)는 하위 지층과는 부조화적으로 보다 크게 나타나는데, 이는 분출된 현무암류가 고지형을 따라 흐르면서 만들어진 불규칙한 초기 경사(initial dip)에 기인하는 것으로 판단된다.

4.5 저장층 예비 물성시험결과

잠재 저장층인 장기역암 내에 포함된 사암의 공극률과 투수율의 측정을 위해 장기 1호공 시추코어로부터 선별된 대표적인 암석 시료를 직경 1.5인치, 직경의 1.5배 이상 길이의 코어플러그(core plug)로 성형하였으며, 성형된 시료의 공극률과 투수율은 각각 동아대학교의 헬륨 공극률 측정기(helium porosimeter) 및 가스투수율 측정 장비를 이용하여 측정하였다(표 4). 헬륨 공극률 측정기 측정실험에 적

용된 압력범위는 100 psi이며, 가스투수율 측정장비에 적용된 가스유량의 범위는 100~1000 sccm이다. 봉압은 주입압력보다 400 psi 이상으로 적용하였다. 예비시험 결과, 뇌성산지괴의 지하 심부 약 700 m 이상 깊이에 존재하는 사암층의 공극률의 범위는 13.79 ~ 27.82%이고 투수율은 0.0139 ~ 89.037 mD로, 이는 현재 실증 사업이 진행 중인 대표적인 해외 CO₂ 저장층의 물성 범위에 포함된다(표 1). 따라서 장기역암 내에 포함된 역암, 역질사암, 조립질 사암체들은 추후 CO₂ 지중저장을 위한 저장암으로써 충분히 가능성이 있는 것으로 보인다.

5. 토 의

5.1 CO₂ 지중저장을 위한 유망 후보지 선정

CO₂ 지중저장 유망 구조구역을 도출하기 위해 영암리와 뇌성산지괴의 특징을 살펴보면, 먼저 두 지괴 내에 포함된 충전물의 암층서는 서로 유사하므로 층서적 조건은 동일하다 할 수 있다(그림 2, 9). 그러나 필요 심도의 확보 측면에서는 뇌성산지괴가 더 유리할 것으로 판단된다. 영암리지괴는 약 800 m 이

상의 분지심도를 가지는 곳이 북서부 일부 지역에 국한될 것으로 예상되나, 지괴 경동 이후 현무암질 화산활동에 의해 지괴 전반이 함몰된 것으로 해석되는 뇌성산지괴는 대부분의 지역이 800 m 이상의 깊은 심도를 가질 것으로 판단되므로 CO₂ 지중저장소로서 활용 가능한 지역의 범위가 넓다할 수 있다. 그러나 뇌성산 고지가 위치한 지괴의 중앙부는 현무암질 화산활동의 중심지로서 이와 관련한 마그마 관입 등에 의해 상당히 복잡한 지하구조가 형성되어 있을 것으로 판단되므로 CO₂ 지중저장소로서 부적절할 가능성이 높으며, 이를 피해 보다 외곽을 집중 탐색할 필요가 있다.

뇌성산지괴 남부에서 수행된 시추 결과는 가장 깊은 심도에서 테사이트질 응회암이 출현하는 873.8 m 지점의 하부 분지층전물이 역암, 역질사암, 사암 등의 조립질 쇄설성 퇴적물로 주로 구성됨을 보여준다(그림 9, 10; 표 2). 이들은 최소 9매 이상의 테사이

트질 응회암과 이와 교호하는 세립질 퇴적물을 다량 포함한 응회질 퇴적암 그리고 현무암질 화산암류에 의해 다시 피복된다. 즉, 분지 기저에는 공극률과 투수율이 비교적 양호한 잠재 저장층(장기역암)이 약 129.7 m의 겹보기 두께로 존재하고 이를 대부분 투수율이 낮은 것으로 판단되는 잠재 덮개층(성동리층과 뇌성산현무암질암)이 약 873.8 m의 겹보기 두께로 피복하고 있다. 이상과 같은 특징들을 종합하면, JG-1호공이 위치하는 뇌성산지괴의 남부 지역이 CO₂ 지중저장소의 필요 심도를 충족하는 1,000 m 내외의 깊은 심도를 가지며, 약 880 m 깊이에서 후기 현무암질 화산활동의 영향을 거의 받지 않은 저장층덮개층 조합이 존재할 것으로 판단된다. 따라서 장기분지는 CO₂ 지중저장 실증사업에 적절한 심도와 트랩이 형성되어 있는 육상 퇴적분지로서 평가되며, 특히 뇌성산지괴의 남부 지역(학계리 또는 학곡리)이 가장 적절한 후보지로 평가된다.

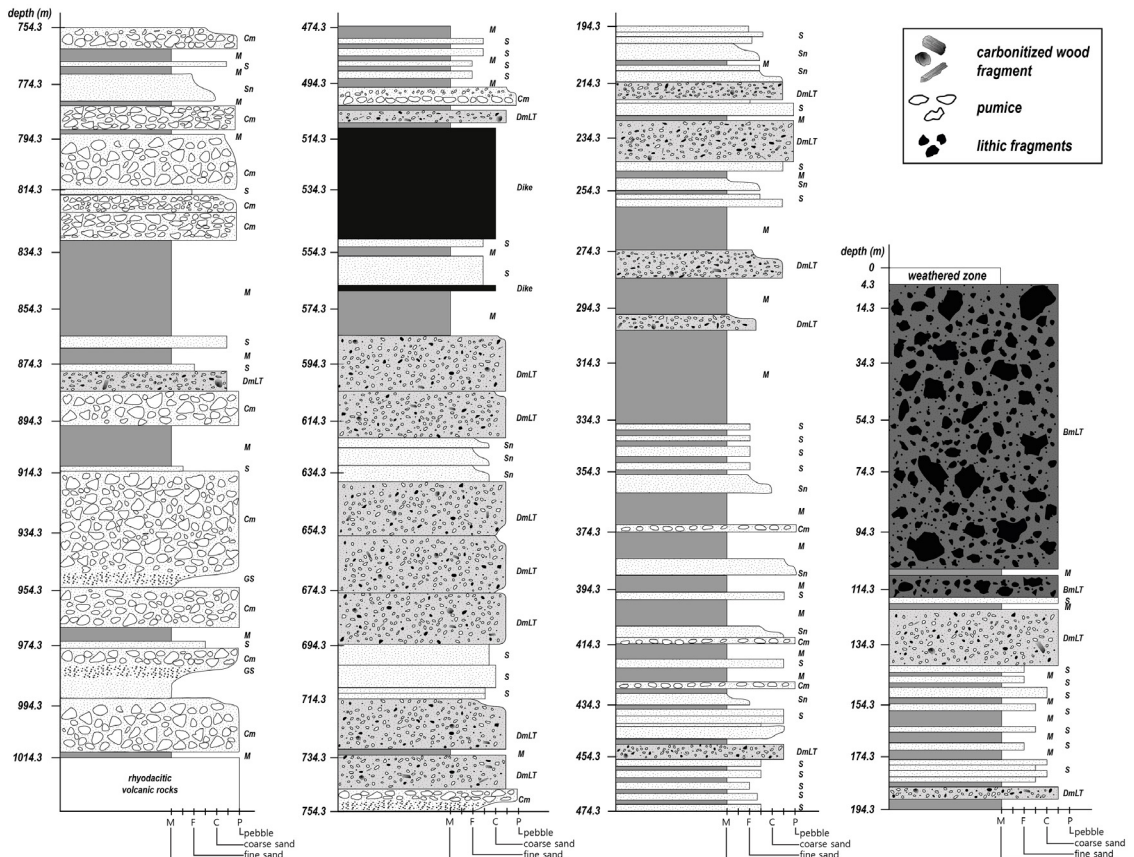


Fig. 10. Columnar logs from the Janggi-1 (JG-1) core measurement. See Table 1 for the detailed description of each unit.

5.2 잠재 저장층의 특성

장기역암은 분지 남동쪽 경계단층 인접부인 장기면 영암리 일원에서 소규모로 지표에 노출되나(그림 3, 4), 시추결과 뇌성산지괴의 지하심부 약 880 m 이상 깊이의 분지 기저에도 분포하고 있음이 확인되었다(그림 9, 10; 표 2). 이는 공극률과 투수율이 높은 조립질 암체(표 4)를 다수 포함한 지층이 영암리지괴에서 뇌성산지괴까지 분지 기저를 따라 하나의 층(formation)의 규모로 연장될 가능성이 있음을 의미하며, 두께와 연장성을 고려할 때 잠재 저장층이 되기 위한 충분한 규모를 가지고 있는 것으로 평가된다.

최근 CO₂ 저장분야에서는 저장층의 상세 특성화, 지층 내 유체의 잔류보존 능력, 덮개암의 밀봉능력 등이 주된 논의 대상이 되고 있다(Korbøl and Kaddour, 1995; Bachu *et al.*, 2007). 이를 파악하기 위해서는 주요 대상 지층의 물성과 기하에 관한 상세한 분석이 필요한데, 기본적으로 지층의 퇴적상, 퇴적환경, 퇴적기작 등에 관한 정보가 바탕이 되어야 한다. 장기역암은 역암층의 하부 경계를 따라 침식면이 흔히 관찰되고 대부분 유기물이 풍부한 이암 또는 탄층과 교호하는 특징을 보인다. 이는 역암들이 배수가 불량한 망상하천 혹은 하구에 인접한 호수 등에서 퇴적되었음을 시사하며, 장기역암의 퇴적 당시 활발한 퇴적물의 공급과 함께 지속적인 퇴적공간의 확보가 이루어졌음을 의미한다(e.g., Blair and Bilodeau, 1988; Stollhofen and Stanistreet, 1994; Sohn *et al.*, 2013). 따라서 분지의 형성 초기 지각 확장과 침강으로 기반암 기원 물질을 다량 함유한 조립질 쇄설성 퇴적물들이 분지 내부로 활발히 공급되었으며, 지속적인 분지 침강에 의해 이 퇴적물들이 분지 기저를 따라 광범위하게 이동되었을 가능성이 높다.

영암리지괴 장기역암의 퇴적학적 특징에 관한 Bahk and Chough (1996)의 연구에 따르면, 장기역암을 구성하는 역암층은 퇴적 과정과 기원에 따라 하도 역암과 중력류 기원 역암으로 구분되며, 모두 대체로 과상이고 분급이 불량하나 하도 역암은 역의 배열이 발달하고 측방으로 렌즈상의 기하를 이루는 반면, 중력류 기원 역암의 경우는 역의 배열이 미약하고 측방연장성이 더 좋은 특징을 보인다. 한편, Sohn *et al.* (2013)은 지리적으로 영암리지괴와 매우 인접한 양포소분지를 대상으로 고지형, 퇴적기작, 퇴적활동과 동반된 화산활동, 지구조운동 등을 종합적으로 고려하여 분

지의 퇴적환경 진화모형을 제시한 바 있다. 이에 따르면 양포소분지는 활발한 구조운동과 화산활동에 의해 분지의 내외부적 조건(침강률, 퇴적물 공급률, 퇴적률 등)이 시공간적으로 복잡하게 변화되었으며, 그에 따라 분지 형성 초기에는 시공간적으로 다양한 퇴적환경(얕은 호수 또는 늪지, 하성 평원, 망상하천계 등)이 형성되고 퇴적상의 측방 연속성과 기하가 지속적으로 변화된 것으로 보고하였다. 또한 후기에는 분지의 빠른 침강에 의해 다량의 화산물질 공급에도 불구하고 지표의 퇴적환경은 거의 일정하게 유지되었으며, 그 결과 분지층전물 내에 거의 동일한 특징을 가진 하성 역암들이 관찰되는 것으로 보고하였다.

이상을 종합하면 장기역암 내의 조립질 쇄설성 암체의 기하, 분포, 연장성 등은 실제로는 매우 복잡할 것으로 예상되며, 현재 확보된 자료만으로는 잠재 저장층에 대한 자세한 평가와 예측은 어려운 것으로 판단된다. 따라서 이들의 상세 특성화를 위해서는 장기역암의 자세한 퇴적학적 특성은 물론이고 구조분석, 각종 물리탐사, 시추탐사를 추가적으로 시도하여 유망 후보지의 심부구조와 잠재 저장층의 특성화에 필요한 기본 자료들을 보다 체계적으로 구축할 필요가 있다.

5.3 CO₂ 저장층으로서 화산성 저류암(volcanic reservoir)

현재 세계의 여러 퇴적분지에서 CO₂ 저장을 위한 실증사업이 진행 중이며, 저장소는 원유가스전, 대수층, 염수층, 석탄층, 현무암, 오일 또는 가스 셰일, 암염 공동(salt cavern), 폐광산 등으로 지질학적 조건이 다양하다. 그러나 대부분의 저장소는 쇄설성-화학적 퇴적암 또는 탄층이 주된 저장층으로 활용되고 있다(IPCC, 2005; Viebahn *et al.*, 2007; Bachu, 2008; Michael *et al.*, 2010; Lenzen, 2011; Dutta and Zoback, 2012; Heinemann *et al.*, 2012; Civile *et al.*, 2013; Lu *et al.*, 2013).

상부의 성동리층과 뇌성산현무암질암 뿐만 아니라 하부의 장기역암 쇄설성 퇴적물의 기질 내에도 다량의 화산물질이 포함된 장기분지의 경우, 저장층의 유망성을 평가하기 위한 보다 선진적인 접근이 요구된다. 1960년대 이후 석유지질학 분야에서는 화산성 저류암(volcanic reservoir)에 대한 관심이 증대되고 있다(e.g., Sruoga *et al.*, 2004; Luo *et al.*, 2005; Sruoga and Rubinstein, 2007; Feng, 2008; Lenhardt and Götz,

2011; Zou *et al.*, 2013). 화산성 저류암은 화산암이 주된 원유가스 저장암이 되는 경우로, 쇄설성 퇴적암에 비해 암상이 복잡하고 지층의 기하와 연속성을 예측하기 어려우며 기공 발달과 변질상태에 따라 공극률과 투수율이 크게 달라지므로 저류암이 되기 힘든 것으로 인식되어 왔다. 그러나 지난 한 세기 동안 이들 내에 대규모 원유가스전이 발견된 사례가 있어 최근 이들의 가능성에 주목하여 세계 각국에서 활발한 탐사와 평가가 진행되고 있다(예: 쿠바의 North Cuba 분지, 브라질의 Amazonas 분지, 중국의 Songliao, Junggar, Santanghu 분지 등)(Zou *et al.*, 2013).

저류암으로 활용된 화산암은 기원에 따라서 다양한 조성, 산상, 조직을 보이는데, 이들의 유망성을 좌우하는 공극률과 투수율은 일차와 이차적 공극형성 과정과 단열계의 발달 양상에 따라 달라진다(Sruoga and Rubinstein, 2007). 화산암의 대표적인 일차적 공극형성 과정으로는 결정의 초생적 변질, 가스 방출, 자가파쇄작용(auto-fragmentation), 결정의 부스러짐 등이 있다. 일반적으로 지층 내에 가스탈기관(gas escape pipe)을 다량 포함한 화쇄류암이 상대적으로 높은 공극률과 투수율을 보인다. 화산암의 공극에 영향을 미치는 대표적인 이차적 과정은 변질작용으로 이는 공극률과 투수율을 감소시킨다. 그러나 뒤따르는 용해 및 수압파쇄와 같은 암체 내에 공간이 형성되는 작용들이 추가될 경우 공극률과 투수율은 증가된다. 또한, 암상의 조직도 중요한 요소가 되는데, 일반적으로 용결도가 높고 과상이며 치밀한 결정질 암석은 공극률과 투수율이 현저히 낮다(Sruoga *et al.*, 2004).

장기역암과 같이 이차기원의 화산물질이 포함된 경우(그림 3, 4; 표 2)에는 다짐작용 이후 퇴적물 입자간의 잔류 공극(residual pore)과 기질 내의 결정과 화산물질의 이차적 변질작용에 의한 용해 공극(dissolved pore), 공동 등에 의해 공극률과 투수율이 달라질 수 있다(Sruoga *et al.*, 2004; Sruoga and Rubinstein, 2007). 또한 이들이 절리나 단층과 같은 단열계의 형성 혹은 용해 공극의 증가 등에 의해 연결될 경우에는 지층 전반의 투수율이 크게 증가하여 저장층으로서의 유망성이 높아진다(Zou *et al.*, 2013). 그러므로 장기분지와 같이 다량의 화산물질을 포함한 퇴적분지의 경우에도 공극을 충전한 물질의 특성과 공극의 연결성에 따라 높은 투수율을 보일 가능성이 있다. 특히 장기분지는 전기 마이오세 동안의 활

발한 구조운동으로 확장되었고 분지 형성 이후의 다중 지각변형(Moon *et al.*, 2000; Son *et al.*, 2007)으로 인해 다수의 단열들이 분포하고 있어, 이러한 단열망에 의해 잠재 저장층 전반의 투수율이 증가되었을 가능성이 있다. 한편, 잠재 덮개층인 성동리층은 수매의 화쇄류암과 기질 내에 화산물질을 다량 포함한 응회질 퇴적암으로 구성되는데(표 2; 그림 4, 5), 이러한 화산암 또는 기질 내의 화산물질의 경우 다양한 조건에 따라 물성이 달라질 수 있다. 성동리층 내에 포함된 데사이트질 응회암은 대부분 화산쇄설성 밀도류 기원의 화쇄류암으로 판단되는데, 용결구조가 거의 없고 부분적으로 가스탈기관이 관찰되며, 박편관찰시 결정과 기질 내의 유리질 입자들이 파쇄된 경우가 많다. 그러나 대부분 과상이고 불석으로 변질되어 있으며 다수의 세립질 응회질 퇴적암들이 교호하고 있어 지층의 전반적인 투수도는 낮을 것으로 추정되므로(Sruoga *et al.*, 2004), 암상보다는 지층 전반의 단열계 분포와 발달 특성이 잠재 덮개층의 유망성을 좌우하는데 있어 보다 중요한 요인이 될 것으로 판단된다.

이상을 종합하면 장기분지와 같이 다량의 일차이차기원의 화산물질과 쇄설성 퇴적물로 충전된 퇴적분지의 경우에는 석유/가스전 개발 원리를 역이용한 저장층덮개층 특성화를 통해 CO₂ 지중저장소로의 적합성 평가가 필요한 것으로 판단된다. 이를 위해서는 공극률과 투수율을 좌우하는 각 지층의 암상, 공극, 단열계에 대한 보다 자세한 분석이 필수적이다. 또한, 상대적으로 예산이 적게 소요되고 접근이 용이한 육상의 퇴적분지라는 장점을 살려 아직까지 활발히 시도되지 않고 있는 화산성 저류암을 활용한 CO₂ 지중저장소(volcanic reservoir CO₂ storage) 측면의 체계적인 D/B를 구축하게 된다면, 추후 관련 분야에서 하나의 선진적인 연구사례가 될 것으로 판단된다.

6. 요약 및 결론

국내 육상 1만 톤급 이산화탄소 지중저장소를 확보하기 위해, 장기분지에 대한 상세 야외조사를 바탕으로 지질도와 단면도가 작성되었으며 구조요소를 종합하여 분지의 기하와 구조적 특징을 파악하였다. 또한 시추탐사를 병행하여 충전물의 주상도를 확보하고 지하 지층의 분포와 퇴적학적 특징을 분석하였다. 연구결과는 다음과 같이 요약된다.

- 1) 장기분지를 지층의 상대적 퇴적 시기와 자세를 근거로 구룡포, 오천, 뇌성산, 영암리 지괴와 양포소분지로 구분하였다. 지괴별 충전물의 층서, 암상, 구조적 특징 등을 종합한 결과, 분지 확장 초기의 북서향 지괴 경동과 후기 현무암질 화산 활동에 의한 함몰을 함께 겪은 뇌성산지괴가 분지의 심도 측면에서 CO₂ 지중저장소로 유리하며, 이중 후기 화산활동으로 인한 교란을 적게 받은 것으로 판단되는 지괴의 남부가 지하구조 해석에서 상대적으로 유리할 것으로 판단된다.
- 2) 뇌성산과 영암리지괴에 분포하는 분지충전물은 하부로부터 장기역암, 성동리층, 뇌성산현무암질암으로 구분되며, 이들은 서로 정합관계로 순차 피복한다. 장기역암은 주로 기반암 기원의 역을 다량 함유한 역암과 이와 교호하는 데사이트질 응회질 (역질)사암으로 구성되어 지층의 전반적인 공극률과 투수율이 비교적 높은 것으로 판단된다. 성동리층은 다수의 데사이트질 응회암과 이와 교호하는 응회질 퇴적암으로 구성된다. 응회암은 대부분 괴상이고 불석으로 변질되어 있으며, 응회질 퇴적암의 경우 세립질이고 분급과 원마도가 양호한 암상이 우세한 특징을 보여주고 있어 전체적인 투수성이 낮을 것으로 판단된다. 뇌성산현무암질암은 주로 하위 지층을 관입하거나 분출 피복한 용암류, 응회질 각력암, 맥암류 등으로 구성되어 투수성이 낮을 것으로 판단된다.
- 3) 뇌성산지괴의 시추탐사 결과, 분지 기저(1003.5 m)에는 잠재 저장층(장기역암)이 약 129.7 m의 겹보기 두께로 존재하고 이를 잠재 덮개층(성동리층과 뇌성산현무암질암)이 약 873.8 m의 겹보기 두께로 피복하고 있어, 지하에 CO₂ 지중저장을 위한 적절한 저장층 덮개층의 조합(층서트랩)이 존재하는 것으로 추론된다. 따라서 장기분지는 육상 CO₂ 지중저장 실증사업이 가능한 유망 육상 퇴적분지로 평가된다.
- 4) 장기분지는 다량의 일차이차기원의 화산물질로 충전된 퇴적분지로서 최근 세계적인 관심 대상인 화산성 저류암이 존재할 가능성이 있다. 따라서 향후 이러한 측면에서의 세밀한 저장층 덮개층 특성화 연구를 통해 보다 선도적으로 유망 CO₂ 지중저장소를 평가하는 노력이 요구된다.

사 사

본 연구는 2014년도 정부(미래부)의 재원으로 (재)한국이산화탄소 포집 및 처리 연구개발센터의 지원(NRF-2014M1A8A1049339)을 받아 수행된 연구이다. 심사과정에서 매우 세심하고 건설적인 의견을 주신 편집위원 김영석 교수님, 안동대학교 조형래 교수님 그리고 익명의 심사위원께 깊이 감사드린다.

REFERENCES

- Bachu, S., 2008, CO₂ storage in geological media: role, means, status and barriers to deployment. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34, 254-273.
- Bachu, S., Bonijoly, D., Bradshaw, J., Burruss, R., Holloway, S., Christensen, N.P. and Mathiassen, O.M., 2007, CO₂ storage capacity estimation: Methodology and gaps. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 1, 430-443.
- Bahk, J.J. and Chough, S.K., 1996, An interplay of syn- and intereruption depositional processes: the lower part of the Jangki Group (Miocene), SE Korea. *Sedimentology*, 43, 421-438.
- Blair, T.C. and Bilodeau, W.L., 1988, Development of tectonic cyclothems in rift, pull-apart, and foreland basins: Sedimentary response to episodic tectonism. *Geology*, 16, 517-520.
- Cheon, Y., Son, M., Song, C.W., Kim, J.-S. and Sohn, Y.K., 2012, Geometry and kinematics of the Ocheon Fault System along the boundary between the Miocene Pohang and Janggi basins, SE Korea, and its tectonic implications. *Geoscience Journal*, 16, 253-273.
- Civile, D., Zecchin, M., Forlin, E., Donda, F., Volpi, V., Merson, B. and Persoglia, S., 2013, CO₂ geological storage in the Italian carbonate successions. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 19, 101-116.
- Dutta, P. and Zoback, D.M., 2012, CO₂ sequestration into Wyodak coal seam of Powder River Basin - Preliminary reservoir characterization and simulation. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 9, 103-116.
- Feng, Z., 2008, Volcanic rocks as prolific gas reservoir: A case study from the Qingshen gas field in the Songliao Basin, NE China. *Marine and Petroleum Geology*, 25, 416-432.
- GGGP, 2011, KEITI's Special report for low carbon green growth. Korea Environmental Industry & Technology Institute, Special Issue Vol. 3, 230 p.
- Heinemann, N., Wilinson, M., Pickup, G.E., Haszeldine, R. and Cutler, N.A., 2012, CO₂ storage in the offshore

- UK Bunter Sandstone Formation. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 6, 210-219.
- Hester, R.E. and Harrison, R.M., 2010, Carbon Capture: Sequestration and Storage. Royal Society of Chemistry, Cambridge, 308 p.
- Hill, B., Hovorka, S. and Melzer, S., 2013, Geological carbon storage through enhanced oil recovery. *Energy Procedia*, 37, 6808-6830.
- IEA, 2008a, Energy Technology Perspectives 2008: Scenarios & Strategies to 2050. OECD/IEA.
- IEA, 2008b, CO₂ Capture and Storage: A Key Carbon abatement option. OECD/IEA.
- IPCC, 2005, Carbon Dioxide Capture and Storage. In: Metz, B., Davidson, O., de Coninck, L., Loos, M. and Meyer, L. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, 442 p.
- Jang, E., Yun, S.-T., Choi, B.-Y., Chung, D. and Kang, H., 2012, Status and implications of regulatory frameworks for environmental management of geologic CO₂ storage in USA and EU. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 17, 9-22 (in Korean with English abstract).
- Jin, M.S., Kim, S.J. and Shin, S.C., 1988, K/Ar and fission-track datings for volcanic rocks in the Pohang-Kampo area. Report KD-87-27, Korea Institute of Energy and Resources, Daejeon, 51-88 (in Korean with English abstract).
- Jolivet, L., Huchon, P. and Brun, J.P., 1991, Arc deformation and marginal basin opening: Japan Sea as a case study. *Journal of Geophysical Research*, 96, 4367-4384.
- Jolivet, L. and Tamaki, K., 1992, Neogene kinematics in the Japan Sea region and volcanic activity of the Northeast Japan Arc. *Proceedings, the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 127/128, 1311-1331.
- Jolivet, L., Tamaki, K. and Fournier, M., 1994, Japan Sea, opening history and mechanism: A synthesis. *Journal of Geophysical Research*, 99, 22237-22259.
- Jung, S., Kim, M.C., Cho, H., Son, M. and Sohn, Y.K., 2012, Basin fills and geological structures of the Miocene Yangpo subbasin in the Janggi-myeon, Pohang, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 48, 49-68 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.S., Son, M., Kim, J.-S. and Kim, J., 2005, ⁴⁰Ar/³⁹Ar ages of the Tertiary dike swarm and volcanic rocks, SE Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 14, 93-107 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.H., Won, J.K., Matsuda, J., Nagao, K. and Lee, M.W., 1986, Paleomagnetism and K-Ar age of volcanic rocks from Guryongpo area. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 19, 231-239.
- Kim, M.-C., Kim, J.-S., Jung, S., Son, M. and Sohn, Y.K., 2011, Classification and stratigraphy of the Miocene basin fills in the northern area of the Janggi-myeon, Pohang, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 585-612 (in Korean with English abstract).
- Korbøl, R. and Kaddour, A., 1995, Sleipner-vest CO₂ disposal-injection of removed CO₂ into the Utsira Formation. *Energy Conversion and Management*, 36, 509-512.
- Lallemand, S. and Jolivet, L., 1985/86, Japan Sea: a pull-apart basin? *Earth and Planetary Science Letters*, 76, 375-389.
- Lee, H.K., Moon, H.-S., Min, K.D., Kim, I.-S., Yun, H. and Itaya, T., 1992, Paleomagnetism, stratigraphy and geologic structure of the Tertiary Pohang and Changgi basins: K-Ar ages for the volcanic rocks. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 25, 337-349 (in Korean with English abstract).
- Lenhardt, N. and Götz, A.E., 2011, Volcanic settings and their reservoir potential: An outcrop analog study on the Miocene Tepoztlán Formation, Central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 204, 66-75.
- Lenzen, M., 2011, Global warming effect of leakage from CO₂ storage. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 41, 2169-2185.
- Lu, J., Kordi, M., Hovorka, S.D., Meckel, T.A. and Christopher, C.A., 2013, Reservoir characterization and complications for trapping mechanisms at Cranfield CO₂ injection site. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 18, 361-374.
- Lucchitta, I. and Suneson, N.H., 1993, Dips and extension. *Geological Society of America Bulletin*, 105, 1346-1356.
- Luo, J., Morad, S., Liang, Z. and Zhu, Y., 2005, Controls on the quality of Archean metamorphic and Jurassic volcanic reservoir rocks from the Xinglongtai buried hill, western depression of Liaohe basin, China. *Advancing the World of Petroleum Geosciences Bulletin*, 89, 1319-1346.
- Michael, K., Golab, A., Shulakova, V., Ennis-King, J., Allinson, G., Sharma, S. and Aiken, T., 2010, Geological storage of CO₂ in saline aquifers - a review of the experience from existing storage operations. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4, 659-667.
- Moon, T., Son, M., Chang, T.-W. and Kim, I.-S., 2000, Paleostress reconstruction in the Tertiary basin areas in southeastern Korea. *Journal of Korean Earth Science Society*, 21, 230-249 (in Korean with English abstract).
- OECDiLibrary, 2014, <http://www.oecd.org/statistics> (August 23, 2014).
- Park Y.-C., Huh, D.-G. and Yoo, D.-G., 2009, A review of business model for CO₂ geological storage project in Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45, 579-587 (in Korean with English abstract).
- Rawland, S.M., Duebendorfer, E.M. and Schiefelbein, I.M., 2007, Structural analysis and synthesis: A laboratory course in structural geology, 3rd edition. Blackwell Publishing, Oxford, 301 p.
- Schlische, R.W., 1993, Anatomy and evolution of the

- Traiasic-Jurassic continental rift system, eastern North America. *Tectonics*, 12, 1026-1042.
- Shin, S.-C., 2013, Revised Fission-track Ages and Chronostratigraphies of the Miocene Basin-fill Volcanics and Basements, SE Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 22, 83-115 (in Korean with English abstract).
- Sohn, Y.K., Ki, J.S., Jung, S., Kim, M.-C., Cho, H. and Son, M., 2013, Synvolcanic and syntectonic sedimentation of the mixed volcanoclastic-epiclastic succession in the Miocene Janggi Basin, SE Korea. *Sedimentary Geology*, 288, 40-59.
- Son, M., 1998, Formation and Evolution of the Tertiary Miocene Basins in Southeastern Korea: Structural and Paleomagnetic Approaches. Ph D, Pusan National University (in Korean with English abstract).
- Son, M., Chong, H.-Y. and Kim, I.-S., 2002, Geology and geological structures in the vicinities of the southern part of the Yonil Tectonic Line, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 38, 175-197 (in Korean with English abstract).
- Son, M. and Kim, I.-S., 1994, Geological structures and evolution of the Tertiary Chongja Basin, southeastern margin of the Korean Peninsula. *Economic and Environmental Geology*, 27, 65-80 (in Korean with English abstract).
- Son, M., Kim, I.-S. and Sohn, Y.K., 2005, Evolution of the Miocene Waup basin, SE Korea, in response to dextral shear along the southwestern margin of the East Sea (Sea of Japan). *Journal of Asian Earth Sciences*, 25, 529-544 (in Korean with English abstract).
- Son, M., Kim, J.-S., Chong, H.-Y., Lee, Y.H. and Kim, I.-S., 2007, Characteristics of the Cenozoic crustal deformation in SE Korea and their tectonic implications. *The Korean Society of Petroleum Geology*, 13, 1-16 (in Korean with English abstract).
- Son, M., Kim J.S., Jung, S., Ki, J.S., Kim, M.-C. and Sohn, Y.K., 2012, Tectonically controlled vent migration during maar-diatreme formation: An example from a Miocene half-graben basin in SE Korea. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 223-224, 29-46.
- Son, M., Seo, H.J. and Kim, I.-S., 2000, Geological structures and evolution of the Miocene Eoil basin, southeastern Korea. *Geosciences Journal*, 4, 73-88 (in Korean with English abstract).
- Son, M., Song, W.S., Kim, M.-C., Cheon, Y., Jung, S., Cho, H., Kim, H.-G., Kim, J.S. and Sohn, Y.K., 2013, Miocene Crustal Deformation, Basin Development, and Tectonic Implication in the southeastern Korean Peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 93-118 (in Korean with English abstract).
- Song, C.W., Son, M., Sohn, Y.K., Han, R., Shinn, Y.J. and Kim, J.-C., 2015, A study on potential geologic facility sites for carbon dioxide storage in the Miocene Pohang Basin, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51, 53-66 (in Korean with English abstract).
- Sruoga, P. and Rubinstein, N., 2007, Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuque'n basins, Argentina. *Advancing the World of Petroleum Geosciences Bulletin*, 91, 115-129.
- Sruoga, P., Rubinstein, N. and Hinterwimmer, G., 2004, Porosity and permeability in volcanic rocks: a case study on the Serie Tobifera, south Patagonia, Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 132, 31-43.
- Stollhofen, H. and Stanistreet, I.G., 1994, Interaction between bimodal volcanism, fluvial sedimentation and basin development in the Permo-Carboniferous Saar-Nahe Basin (south-west Germany). *Basin Research*, 6, 245-267.
- Tateiwa, I., 1924, 1:50,000 Geological atlas of Chosen, No. 2, Ennichi, Kuryuho and Choyo sheets. *Geological Survey of Chosen* (in Japanese).
- Viebahn, P., Nitsch, J., Fishedick, M., Esken, A., Schüuwer, D., Supersberger, N., Zuber-bühler, U. and Edenhofer, O., 2007, Comparison of carbon capture and storage with-renewable energy technologies regarding structural, economic, and ecological aspects in Germany. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 1, 121-133.
- Wernicke, B. and Burchfiel, B.C., 1982, Modes of extensional tectonics. *Journal of Structural Geology*, 4, 105-115.
- Wise, D.U., 1992, Dip domain method applied to the Mesozoic Connecticut valley Rift Basins. *Tectonics*, 11, 1357-1368.
- Yoon, S., 1992, Geology of the Tertiary Yangnam and Pohang basins, Korea. *Bulletin of the Mizunami Fossils Museum*, No. 19, 13-31.
- Yoon, S.W., Kim, M.-C., Song, C.W. and Son, M., 2014, Basin-fill lithostratigraphy of the Early Miocene Haseo Basin in SE Korea. *Journal of the geological Society of Korea*, 50, 193-214 (in Korean with English abstract).
- Yun, H., Min, K.D., Moon, H., Lee, H.K. and Yi, S.S., 1991, Biostratigraphic, chemostratigraphic, paleomagnetotratigraphic, and tephrochronological study for the correlation of Tertiary formations in southern part of Korea: Regional tectonics and its stratigraphical implication in the Pohang Basin, Korea. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 1, 1-12.
- Zou, C., Zhang, G., Zhu, R., Yuan, X., Zhao, X., Hou, L., Wen, B. and Wu, X., 2013, Volcanic reservoirs in petroleum exploration. Elsevier, Waltham, San Diego, 204 p.

Received : December 12, 2014

Revised : April 13, 2015

Accepted : May 8, 2015