

장기분지 형성초기의 구조운동에 의한 장기역암의 퇴적환경 변화

구희찬¹ · 황인걸^{2,*}

¹과학기술연합대학원대학교 석유자원공학과

²한국지질자원연구원 석유해저연구본부

요 약

전기 마이오세 장기분지에서 시추된 6개의 코어를 통해 장기분지 최하부 층인 장기역암의 퇴적 환경을 분석하고, 각 코어 간 대비를 통해 분지형성 초기의 진화과정을 해석하였다. 퇴적상분석을 통해 장기역암을 4개의 퇴적상조합으로 구분하였다. 퇴적상조합 1은 하부 침식경계를 보이고 전체적으로 상향세립화 경향을 보이는 역암 및 역질 사암으로 구성된 것으로 보아, 역질 망상하천에서 퇴적된 것으로 보인다. 퇴적상조합 2는 탄질 세일이 분포하는 것을 통해 범람원 퇴적물로 해석하였다. 퇴적상조합 3은 두꺼운 괴상 혹은 상향조립화 경향을 보이는 이질 사암 및 사암으로 구성되어, 하구사주 퇴적물 또는 전진구축하는 삼각주 퇴적물로 해석하였고, 퇴적상조합 4는 두꺼운 이암과 교호하는 엽층리 이암 및 점이층리 사암을 바탕으로 호수 퇴적물로 해석하였다. 퇴적환경의 변화와 하천퇴적물의 중첩 형태를 통해 장기역암을 총 4개의 퇴적단위로 구분하였으며, 이는 퇴적 수용공간의 시공간적 변화에 의한 것으로 해석된다. 퇴적단위 J-1은 분지 서쪽인 장기 4, 6호공에서 퇴적상조합 1이 우세하게 분포하고 동쪽인 장기 3호공은 퇴적상조합 2 또는 퇴적상조합 4가 우세하며, 장기 1, 5호공은 퇴적단위 J-1이 나타나지 않는다. 이는 분지형성 초기의 침강으로 장기 3, 4, 6호공 인근에 퇴적수용공간이 형성되면서, 장기 4, 6호공에서 역질 하천이 형성되었고 장기 3호공에서는 습지환경이 조성되었음을 지시한다. 퇴적단위 J-1이 나타나지 않는 장기 1, 5호공 지역은 퇴적수용공간이 충분치 않았던 것으로 보이고, 이는 상대적으로 고지대였음을 지시한다. 퇴적단위 J-2는 장기 5호공을 제외한 모든 시추공에서 퇴적상조합 1이 중첩되어 두껍게 퇴적된 것으로 보아, 퇴적물의 공급량이 퇴적수용공간의 증가율보다 많았음을 의미하며, 이는 분지의 침강률이 초기보다 낮았음을 지시한다. 퇴적단위 J-3의 하부는 퇴적상조합 2 또는 3이 우세하고, 장기 3호공의 일부에서는 퇴적상조합 4가 분포한다. 또한, 상부로 갈수록 입도가 증가하고 점차 퇴적상조합 1이 우세해지는 상향조립화 경향을 보이는데, 이는 분지가 급격히 침강한 이후 하천퇴적물이 분지 내부로 전진구축 한 것으로 해석된다. 퇴적단위 J-4는 화산재 퇴적층이 분포하고, 장기 1, 4호공은 하성 퇴적체인 상조합 1이 우세하게 분포하며 장기 3, 5, 6호공 지역은 호성퇴적체인 퇴적상조합 4가 우세하다. 이는 화산활동 이후 단층운동으로 인해 분지의 침강률이 급격히 증가하여 장기 3, 5, 6호공 지역에 호성환경이 발달하였음을 지시한다.

주요어: 장기분지, 장기역암, 퇴적상, 퇴적수용공간, 구조운동

Hui-Chan Gu and In Gul Hwang, 2017, Depositional history of the Janggi Conglomerate controlled by tectonic subsidence, during the early stage of Janggi Basin evolution. Journal of the Geological Society of Korea. v. 53, no. 2, p. 221-240

ABSTRACT: Using six drilling cores, depositional history in Janggi Conglomerate in the Early Miocene Janggi Basin was reconstructed. Lithofacies of the Janggi Conglomerate can be divided into 4 facies associations (FA-1 to FA-4). FA-1 consists of conglomerates with erosional lower boundary, interpreted as gravely braided stream deposits. FA-2 contains coaly shale, suggesting deposition in floodplain environment. FA-3 consists of massive muddy sandstones in the lower part and coarse sandstones to conglomerates in upper part, inferred to have been deposited in mouth-bar or prograding delta. FA-4 is dominated by massive mudstones with laminated mudstone and normally graded sandstones, interpreted as lacustrine deposits. Based on vertical and lateral variations in facies associations, the Janggi Conglomerate can be divided into 4 depositional units (Unit J-1 to J-4) related with tempo-spatial variations in accommodation space. In the western part (JG-4, -6 wells) of the basin, the Unit J-1 is dominated by FA-1, whereas the eastern part (JG-3 well) is composed mostly of FA-2 and FA-4. The spatial distributions of the lithofacies in Unit J-1 is inferred to result from tectonic subsidence in the eastern part of the

* Corresponding author: +82-42-868-3326, E-mail: ighwang@kigam.re.kr

Janggi Basin. In JG-1 and -5 wells, Unit J-1 is absent, indicating physiographic highland during the early stage of basin evolution. The Unit J-2 is composed of up to 35 m thick FA-1, suggesting a decrease in accommodation space either by a decrease in subsidence rates or an increase in rates of sediment supply. The lower part of Unit J-3 is represented by FA-2, -3 and -4, whereas the upper part is dominated by FA-1, showing a coarsening-upward trend. The vertical distribution of facies associations in Unit J-3 suggest continuous filling of the basin after rapid subsidence with gradual decrease in rate of subsidence or increase in sediment supply. The lower part of Unit J-4 is represented by FA-1 and -2. In the upper part of Unit J-4, volcanic ash layers are common. Here, the western part (JG-1, -4 wells) is composed of thickly stacked units of conglomerate (FA-1), whereas the eastern part (JG-3, -5, -6 wells) is dominated by thick lacustrine mudstone (FA-4). Abrupt changes in the depositional environments between JG-4 and -6 wells are interpreted to result from syndepositional tectonic subsidence, probably related to the volcanic activity as reflected by ash layers.

Key words: Janggi Basin, Janggi Conglomerate, sedimentary facies, accommodation space, tectonic subsidence

(Hui-Chan Gu, Department of Petroleum Resources Technology, University of Science and Technology, Daejeon 34113, Republic of Korea; In Gul Hwang, Petroleum and Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea)

1. 서론

육성 퇴적환경은 구조운동에 따른 분지 침강과 퇴적물 근원지의 용기 그리고 기후 변화에 따른 퇴적물 공급량과 퇴적수용공간(accommodation space)의 변화에 따라 달라진다(Wescott, 1993; Shanley and McCabe, 1994; Ethridge *et al.*, 1998). 그 중 분지의 급격한 침강은 퇴적물이 정지될 수 있는 퇴적수용공간을 증가시키고, 침강률이 낮아지거나 멈추게 되면 퇴적수용공간이 감소하게 된다(Blair and Bilodeau, 1988). 따라서 육성 환경에서는 구조운동에 의해 퇴적수용공간의 변화가 발생하고, 이에 따라 하천의 경사, 유량, 퇴적물 공급량 및 퇴적물의 입도 변화가 나타나며, 이로 인해 하도의 형태, 유로변경, 퇴적물의 누적 형태, 범람된 퇴적물의 두께 등이 변화한다(Tornqvist, 1993; Miall, 2000). 분지 내부의 호수 인근에서는 퇴적수용공간의 변화로 인해 퇴적물의 전진 또는 후퇴가 일어나며, 이로 인해 퇴적상의 상향조립화 경향(coarsening-upward trend) 또는 상향세립화 경향(finining-upward trend)이 나타난다(Posamentier and Vail, 1988; Steel, 1988). 즉, 구조운동에 의한 침강은 분지 전반에 걸친 퇴적계의 변화를 유발하는 주요한 요인으로서, 이러한 변화를 통해 층서를 구분하는 구조층서(tectono-stratigraphy)는 연대층서, 생층서, 암층서 등의 대비가 불가능한 퇴적층에 적용할 수 있는 유용한 층서대비 방법이다(Sissingh, 2001; Deng *et al.*, 2008).

장기분지의 장기층군은 동해의 확장과 관련해 전

기 마이오세 동안 쌓인 육성퇴적암으로 구성된다. 과거 노두를 대상으로 퇴적학적 연구가 수행되었으나, 대부분의 연구는 성동리층 혹은 뇌성산현무암질암의 퇴적체를 대상으로 하였다(Bahk and Chough, 1996; Ki, 2009; Sohn *et al.*, 2013). 반면, 장기역암의 노두는 장기면 영암리 일대에서 매우 소규모로 분포하며 제한된 측방연장성으로 인해 수직적, 수평적 퇴적상 변화를 밝히는데 어려움이 많았다. 그러나 최근 이산화탄소 지중저장 실증을 목적으로 장기분지에서 총 6개의 시추코어가 회수되었으며, 이 시추코어에서 최대 200 m 이상의 두꺼운 장기역암층이 확인되었다. 또한 이 시추코어는 장기역암 퇴적상의 수직 변화를 직접 관찰할 수 있고, 시추코어 간 대비가 가능하다면 분지 충전물의 수평 변화까지 유추해 볼 수 있어 분지의 구조운동과 관련된 퇴적환경 변화를 파악하는데 매우 유용하다. 본 연구에서는 장기역암의 시추코어 대비를 통해 퇴적상 및 퇴적상조합의 수직적, 수평적 변화를 파악하였고, 퇴적수용공간의 형성과 퇴적상조합의 변화를 통해 장기분지의 구조운동과 이에 따른 퇴적체의 변화를 고찰하였다.

2. 지질개요

올리고세 말부터 마이오세 동안 동해가 확장함에 따라, 한반도 동남부 일대에 북북서-남남동 방향의 우수향 주향이동단층운동이 일어났다(Jolivet *et al.*, 1989, 1991; Kim, 1992; Fabbri *et al.*, 1996; Son *et al.*, 2007, 2013). 그 결과 다수의 마이오세 퇴적분지

들(포항, 장기, 와읍, 어일, 하서, 정자 분지)이 형성되었다(Kim, 1992; Yoon, 1997; Son, 1998; Son *et al.*, 2007, 2013; Cheon *et al.*, 2012; Jung *et al.*, 2012; Yoon *et al.*, 2014) (그림 1). 오천단층 북측에 위치한 포항분지는 주로 중기 마이오세의 해성퇴적층으로 구성된 반면, 오천단층 남측의 분지들은 초기 마이오세의 화산암류와 육성퇴적물로 이루어져 있다(Chough *et al.*, 1990; Hwang and Chough, 2000; Sohn *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2011, 2015; Cheon *et al.*, 2012; Jung *et al.*, 2012; Son *et al.*, 2013; Yoon *et al.*, 2014).

장기분지는 포항시 오천읍, 장기면 일대에 위치하며, 한반도 남동부의 전기 마이오세분지 중 가장 큰 분지로, 분지의 정확한 정의와 경계는 아직 명확히 밝혀지지 않았다(Kim *et al.*, 2015). 그러나 화산암 분포, 퇴적암 특징, 지괴 침강 등의 차이를 바탕으로 장기분지는 구룡포, 오천, 뇌성산, 영암리 지괴와 양포 소분지로 구분할 수 있다(Kim *et al.*, 2011, 2015; Cheon *et al.*, 2012; Jung *et al.*, 2012). 장기분지의 기반암은 백악기부터 고 신생기의 유문암질 혹은 데사이트질 화산암 및 관입암으로 구성되어 있다(Kim *et al.*, 2011; Jung *et al.*, 2012). 분지충진물은 퇴적암을 구성하는 입자의 구성에 따라, 하부에서부터 장기역

암, 성동리층, 뇌성산현무암질암으로 구분된다(Kim *et al.*, 2015). 장기분지 최하부 지층인 장기역암은 주로 기반암 기원의 역으로 구성된 역암과 사암으로 구성되며, 이 퇴적암 사이에 데사이트질 응회질 사암이 협재되어 있다(Kim *et al.*, 2011, 2015). 성동리층은 주로 데사이트질 응회암 또는 응회질 사암으로 구성되며, 최상부 지층인 뇌성산현무암질암은 관입상 또는 분출상의 용암류와 현무암질 응회암 및 응회질 퇴적물로 이루어져 있다(Kim *et al.*, 2011, 2015). 기존의 퇴적학적 연구에 의하면, 장기분지는 화산활동에 따른 퇴적물 공급량의 차이와 분지 침강률 변동에 따라, 하성 및 호성 환경의 쇄설성 퇴적물과 화산 쇄설물 또는 재동된 응회질 퇴적물이 서로 교대하며 충진되었다(Bahk and Chough, 1996). 또한 Ki (2009)와 Sohn *et al.* (2013)은 양포소분지 일대의 고수류 연구를 통해 망상하천 퇴적체를 형성한 비화산성 쇄설물은 주로 남쪽, 화산쇄설물은 동쪽에서 공급된 것으로 해석하였다. Gim (2016)은 뇌성산지괴의 시추코어 연구를 통해 성동리층 하부 100 m 가량의 데사이트질 화산쇄설암을 4개의 퇴적단위로 구분하였고, 화산분출기간 동안 퇴적환경이 육성환경에서 점차 호성환경으로 변화하였음을 확인하였다. K-Ar 및 Ar-Ar 연대측정 연구에 따르면, 분지충

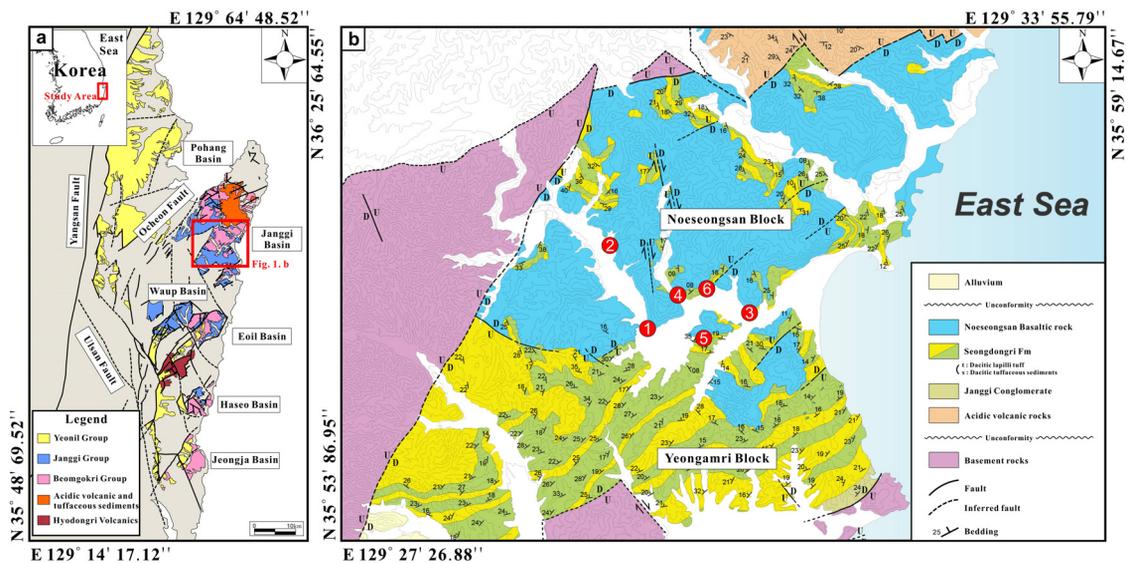


Fig. 1. (a) Regional geologic map of the Miocene basins in southeast Korea. NW-SE trending dextral strike-slip fault systems resulted in the extension of Miocene basins (modified from Son *et al.*, 2013). (b) Detailed geological map of the Janggi Basin with locations of well site (modified from Kim *et al.*, 2015).

Table 1. Location and depth of Janggi wells, with thickness of Janggi Conglomerate.

	JG-1	JG-2	JG-3	JG-4	JG-5	JG-6
Latitude	35°55'28.09"	35°56'9.65"	35°55'34.59"	35°55'42.34"	35°55'21.89"	35°55'40.04"
Longitude	129°29'23.38"	129°28'58.54"	129°30'29.37"	129°29'39.43"	129°29'59.93"	129°29'50.42"
Total Depth (m)	1214.0	708.0	1002.5	1100.3	902.0	1061
Altitude (m)	18.0	53.5	43.6	20.0	40.0	-
Basement Depth (m)	1004.3	> 700.0	819.2	> 1100.0	725.7	1034.3
Thickness of Janggi Conglomerate (m)	130		175	176	73	199

전물의 퇴적 시기는 23 Ma부터 18 Ma까지이며(Lee *et al.*, 1992; Kim *et al.*, 2005), 화분포자와 나무 화석의 연구결과는 이 시기 동안 한반도가 대체로 온난하고 습윤한 아열대 내지 온대 기후였음을 보여준다(Chung and Choi, 1993; Kim *et al.*, 2008; Paik *et al.*, 2011).

3. 연구대상

본 연구에 사용된 시추코어는 포항시 남구 장기면 학계리(장기 1, 3, 4, 5, 6호공)와 신계리(장기 2호공)에서 회수되었으며, 이 지점은 장기분지의 뇌성산 지괴(Kim *et al.*, 2015)에 해당한다(그림 1). 시추공별 위경도, 총 심도, 고도, 기반암 심도 그리고 각 시추공별 장기역암 두께는 표 1에 정리되어 있다. 장기 시추코어의 주상도 작성 결과, 기존의 야외지질조사와 같이 장기역암, 성동리층 그리고 최상부의 뇌성산 현무암질암으로 구분할 수 있다(그림 2). 본 연구 대상인 장기역암은 기반암을 피복한 퇴적층부터 테사이트질 응회암이 최초로 나타나기 전까지의 쇠설성 퇴적층을 지칭한다. 이번 연구는 단열이 조밀하게 발달하고 교란이 심한 장기 2호공을 제외한 5개의 코어에 분포하는 장기역암을 대상으로 하였다.

4. 퇴적상조합 분석

시추코어는 육상에서 확인하기 어려운 퇴적물의 수직변화를 관찰하기 용이하며, 특히 차별침식이 있는 지역에서는 노두에서 확인되는 암상과는 매우 다른 특징을 보이기도 하여 분지의 퇴적사를 밝히는데 매우 중요한 자료로 활용된다(Lee and Hwang, 2012). 그러나 시추코어는 관찰 가능한 폭이 최대 10 cm에

불과하여 잔자갈(pebble) 이상의 역으로 구성된 역암의 퇴적구조 관찰은 제한적이지만, 일부 왕모래(granule) 크기의 역으로 구성된 역암이나, 역질 사암인 경우에는 시추코어에서도 층리가 관찰된다. 또한, 육상의 소규모 노두에서 확인하기 어려운 대규모의 상향조립화, 세립화 경향 등을 관찰하기에 유용하다. 사암 역시 층리의 관찰이 가능하고, 층리의 경사가 변하는 것을 통해 사층리를 구분하는 것 또한 가능하다. 이암은 대부분의 퇴적구조가 관찰가능하다. 비록 시추코어에서는 노두에서 관찰되는 퇴적상을 모두 확인하기는 힘들다, 본 연구에서는 코어에서 확인되는 특징을 최대한 관찰하여 장기역암을 총 9개의 퇴적상을 구분하였고, 각각의 특징과 해석을 표 2에 정리하였다. 또한 퇴적상들의 수직적 변화를 통해 총 4개의 퇴적상조합으로 분류하였다. 퇴적상조합 1은 역질퇴적물로 구성되고 하부침식경계 및 상향세립화 경향을 보인다. 퇴적상조합 2, 3, 4는 주로 이질 퇴적물로 구성된 유사점이 있으나, 퇴적상조합 2는 탄질세일이 교호하는 점, 퇴적상조합 3은 괴상이 이질사암이 두께계 분포하고 있는 점 그리고 퇴적상조합 4는 탄질세일이 발달하지 않고 엽리상 이암이 분포하는 점을 바탕으로 구분하였다.

4.1 퇴적상조합 1 (FA-1)

기재: 퇴적상조합 1은 장기 1, 4, 6호공에서 우세하게 나타난다. 주로 괴상의 역암(Gm)과 희미한 층리 역암(Gs)으로 구성되어있으며, 점이층리 사암(Sn), 층리 사암(Ss), 괴상 사암(Sm), 괴상 이암(Mm)이 협재되어있고, 전반적으로 상향세립화 경향을 보인다(그림 3). 괴상 역암(Gm)은 수십 cm에서 수 m의 두께를 보이며, 내부 침식면과 하부 침식경계가 특징이다. 역은 주로 기반암인 유문암질 내지 테사이트

질 화산암류로 구성되어 있으며, 때때로 사암 또는 이암으로 구성된 뜯어올림역편(rip-up clast)도 발견된다. 크기는 왕모래(granule)부터 잔자갈(pebble)이 대부분이지만, 왕자갈(cobble) 크기의 역도 관찰된다. 역들은 아각형(sub-angular)에서 아원형(sub-rounded)의 원마도를 보이고, 분급이 불량하며 대체로 입자지지(clast-supported)되어 있다. 역암의 기질은 세립 내지 조립질 사암으로 구성되어 있다. 희미한 층리 역암(Gs)은 왕모래 또는 잔자갈 크기의 역이 평행층리 혹은 사층리를 보이며 수 cm에서 최대 1 m 내의 두께를 가진다. 또한 괴상 역암(Gm) 혹은 사암(Sm, Sn, Ss)과 교호하기도 하며 희미한 층리는 입도의 변화 및 역의 장축 배열을 통해 인지할 수 있다. 사암(Sm, Sn, Ss)은 주로 역암과 교호하거나 그 상부에 위치하며, 그 경계는 점이적이거나 뚜렷하

다. 대체로 수십 cm 이내의 두께를 보이지만, 일부는 수 m에 달하는 것도 발견된다. 입도는 세립부터 조립까지 다양하고, 분급은 대체로 불량하거나 보통이다. 괴상 이암(Mm)은 점토와 실트로 구성되어 있고 회색 내지 암회색을 띠며, 역암이나 사암의 상부를 덮고 있다.

해석: 퇴적상조합 1은 하부 침식경계와 내부 침식면을 보이고 상부로 갈수록 입자 크기가 감소하는 상향세립화 경향을 바탕으로 역질 하도 퇴적물로 해석된다(Miall, 1977; Nichols, 2009; Sohn *et al.*, 2013). 퇴적상조합 1을 주로 구성하는 두꺼운 괴상 역암(Gm)과 이와 교호하는 희미한 층리 역암(Gs)은 하도에서 강한 유수에 의해 형성된 역질 판상체(gravel sheet) 또는 역질 사주(gravel bar) 퇴적물 혹은 층적선상지

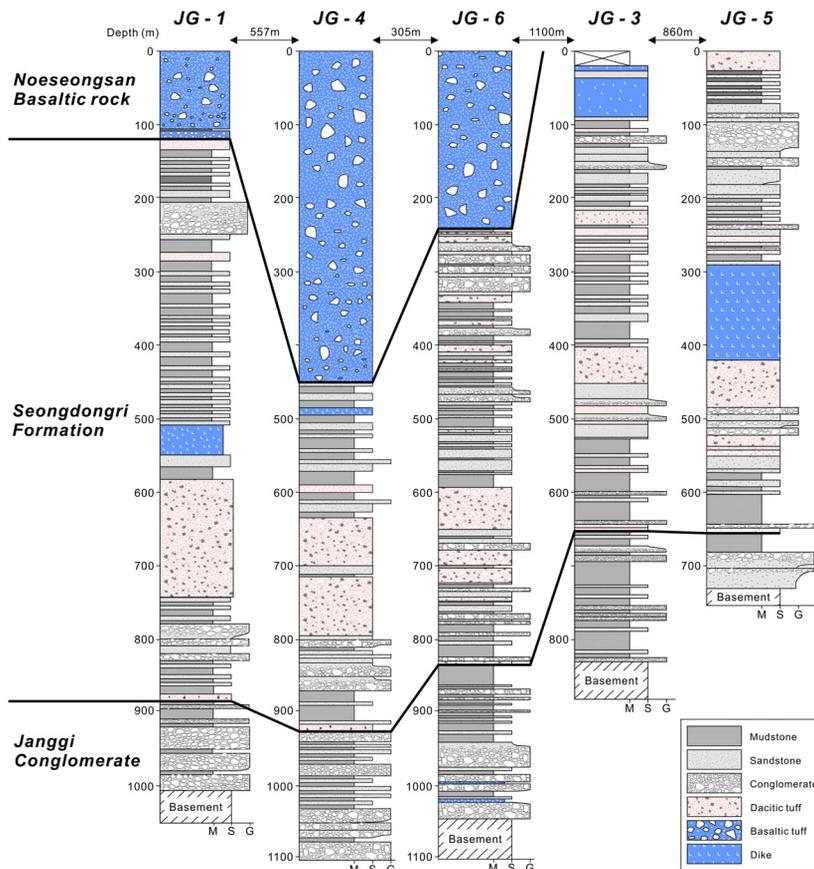
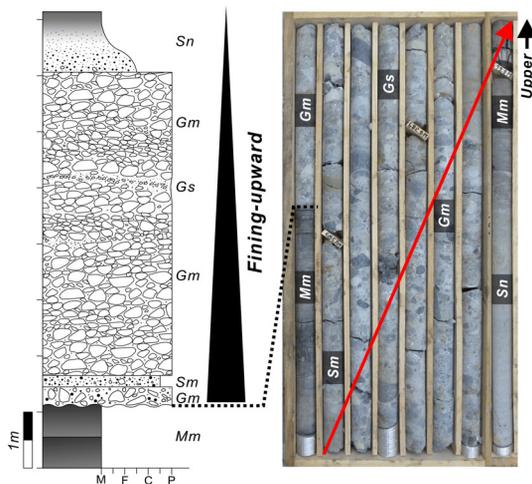


Fig. 2. Simplified columnar section of Janggi Basin cores. The basin fill deposits can be divided into Janggi Conglomerate, Seongdongri Formation and Noeseongsan Basaltic Rocks in ascending order. For locations of wells, see Fig. 1.

Table 2. Description and interpretation of lithofacies in Janggi Conglomerate.

Lithofacies	Code	Descriptions	Interpretations
Massive Conglomerate	Gm	Granule to cobble sized, subangular to subrounded clasts; erosional lower boundary; clast-supported fabric; 0.2 to 10 m thick	Gravel bars (Miall, 1996; Hadlari <i>et al.</i> , 2006)
Crudely Stratified Conglomerate	Gs	Granule to pebble sized, subangular to subrounded clast; alternations of few cm thick coarse-rich and coarse-poor layers; sharp, erosional lower boundary; commonly underlain by Gm and interbedded with Sn, Ss or Sm	Gravel sheets (Miall, 1996; Hadlari <i>et al.</i> , 2006)
Massive Sandstone	Sm	Fine to coarse sand; poorly to well sorted; sharp or gradual boundary from Gm or Gs; normal grading in the uppermost part	Rapid deposition by sediment-laden stream flow (Todd, 1989)
Muddy Sandstone	Smf	Very fine to medium sand with mud matrix; scattered granule to small pebble sized clasts; massive; poorly sorted; sharp or gradual lower boundary; abundant organic matter; commonly intercalated with Mm or Mo	Rapid deposition at river mouth (Sohn <i>et al.</i> , 2013)
Normally Graded Sandstone	Sn	Very coarse to fine sand; normal grading; sharp or erosional lower boundary; planar or cross lamination in the upper part in FA-1, -2; ripple cross-laminations in the lower part in FA-4; commonly underlain by Gm (in FA-1) or intercalated with Ml, Mm or Mo (in FA-4)	Deposition from waning turbulent stream flows (FA-1, -2) (Jo <i>et al.</i> , 1997; Choi, 1986) or turbidity currents (FA-4) (Talling <i>et al.</i> , 2012)
Stratified Sandstone	Ss	Granule to medium sand; alternations of pebbly and sandy layers or changes in sorting value; rare cross stratifications; commonly underlain by Gm (in FA-1); sharp or erosional boundary	Upper flow regime plane bed or dune (Jo <i>et al.</i> , 1997)
Massive Mudstone	Mm	Massive; poorly sorted silt and clay; medium grey (N5) to black (N1) mudstone	Rapid settling of suspended sediments (Gruszka, 2007)
Laminated Mudstone	Ml	Alternations of mm to cm thick, medium grey (N5) to dark grey (N3) clay and silt layers; sharp or gradual lower boundary; commonly intercalated with Mm and Sn	Periodic settling of silt and clay (Anderson and Dean, 1988)
Coaly Shale	Mo	Few mm to cm thick coal layer; commonly scattered plant debris; dark grey (N3) to black (N1) mudstone	Swamp deposits (Turkmen <i>et al.</i> , 2007)

**Fig. 3.** Columnar section and photograph of the Facies Association 1 (FA-1). Note a fining-upward trend from conglomerate, sandstone to mudstone.

에서 퇴적된 쇄설류 혹은 고밀도류 퇴적물로 해석될 수 있다. 그러나 역암의 기질이 사암으로만 구성되어 있고, 이질성분이 전혀 관찰되지 않는 것으로 보아 망상하천에서 퇴적된 것으로 해석된다(Miall, 1985; Whiting *et al.*, 1988; Jo *et al.*, 1997; Hadlari *et al.*, 2006; Lee and Hwang, 2012). 또한 하부 역암과 점이적인 경계를 보이는 사암들(Sm, Sn, Ss)은 홍수기 이후 유속이 감소함에 따라 역질 사주의 상부 혹은 하도의 측면에서 사질 퇴적물이 퇴적된 것으로 해석하였다(Miall, 1985; Jo *et al.*, 1997; Son *et al.*, 2013). 역암이나 사암을 덮고 있는 괴상의 이암(Mm)은 뜬점으로 공급되던 실트 및 점토 퇴적물이 범람원 환경에서 침전된 것으로 추정된다(Todd, 1989; Potter *et al.*, 2005).

4.2 퇴적상조합 2 (FA-2)

기재: 퇴적상조합 2는 주로 괴상 이암(Mm), 탄질

세일(Mo), 괴상 사암(Sm), 점이층리 사암(Sn), 층리 사암(Ss)으로 구성되어있다(그림 4). 수십 cm부터 최대 4 m 내외의 두께로 나타나며, 퇴적상조합 1 혹은 3과 교호한다. 괴상 이암은 검은색에서 암회색을 보이고 탄질물이 곳곳에 분포한다. 또한 탄질 세일(Mo)에는 탄층이 수 cm에서 수십 cm의 두께로 발달하고 있다. 곳에 따라 이암(Mm, Mo)과 교호하는 사암(Sm, Sn, Ss)이 나타나는데, 입도는 세립에서 조립까지 다양하고 두께는 수 cm에서 수십 cm이다. 주로 괴상이지만 곳에 따라 사층리나 엽층리가 발견되며, 하부경계는 침식면이고 상부는 이암으로 덮힌다.

해석: 흑색 내지 암회색을 보이는 괴상의 이암에 탄질 세일(Mo)과 탄층이 협재해 있는 것을 바탕으로, 망상하천으로 해석되는 퇴적상조합 1과 교호하는 경우는 습윤한 범람원 환경으로 해석된다. 호수 주변부 환경으로 해석되는 퇴적상조합 3과 교호하는 경우는 배수가 불량한 저습지에서 퇴적된 것으로 해석될 수도 있다(Viseras and Fernández, 1992; Miall, 1996; Roberts, 2007; Nichols, 2009). 이암과 교호하는 얇은 사암(Sm, Sn, Ss)은 하천퇴적체와 교호하는 것으로 보아, 간헐적으로 발생하는 홍수에 의한 침

상퇴적체(crevasse splay)로 해석된다. 그중 조립질 괴상 사암이 하부 침식경계를 보이며 나타나는 것은 하도 인근에서 상대적으로 강한 유속에서 형성된 것으로 보이고, 세립질의 사암이 사층리 또는 엽층리를 보이는 것은 하도에서 멀리 떨어진 곳에서 홍수류의 유속이 점차 감소하며 퇴적된 것으로 해석하였다(Choi, 1986; Miall, 1996; Bristow *et al.*, 1999; Roberts, 2007).

4.3 퇴적상조합 3 (FA-3)

기재: 퇴적상조합 3은 괴상 이질 사암(Smf)이 수십 cm에서 수 m 내외로 두껍게 퇴적되어 있는 것이 특징이다(그림 5). 이 사암은 뚜렷한 하부경계를 보이고 식물 뿌리나 낙엽 파편이 혼재해 있다. 또한 퇴적상조합 2와 유사한 특징을 보이는 괴상 이암(Mm)과 탄질 세일(Mo)이 교호하고 있다. 일부 퇴적상조합 3은 상부로 갈수록 점차 역암(Gm, Gs)이나 조립질 사암(Sm, Sn, Ss) 교호층이 발달하고 최상부에는 퇴적상조합 1이 우세해지며, 수 m 두께의 상향 조립

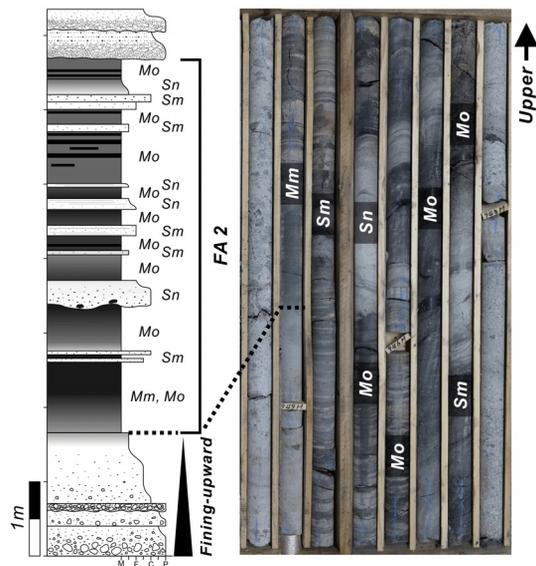


Fig. 4. Columnar section and photograph of Facies Association 2 (FA-2). This association is characterized by coaly shale (Mo) indicating deposition on floodplain or swamp environments.

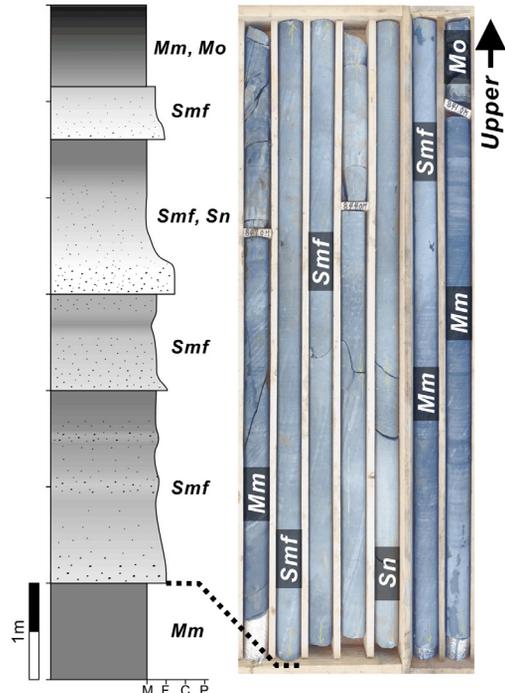


Fig. 5. Columnar section and photograph of Facies Association 3 (FA-3). Note thick massive muddy sandstone with intercalating mudstone, suggesting deposition in mouth-bar environment.

화 경향을 보이기도 한다(그림 6).

해석: 하부 지층과 뚜렷한 경계를 보이는 괴상 이질 사암(Smf)이 두겹게 퇴적된 것은, 강의 하류 또는 호수 주변부에서 유속이 급격히 감소함에 따라 유수의 운반능력이 급격히 상실되어 뜬짐으로 공급되던 세립의 모래와 실트, 점토, 유기물 등이 빠른 속도로 침전되어 형성된 하구사주 퇴적물로 해석된다(Choi, 1986; Sohn *et al.*, 2013). 또한, 괴상 이질 사암과 교호하는 이암(Mm, Mo)에 탄층이 분포하는 것으로 보아 강의 하류 내지 습지환경이었음을 지시한다(Sohn and Son, 2004). 즉, 하구사주 퇴적물에 습지 퇴적물이 교호하는 것을 통해, 퇴적상조합 3은 호수 주변부에서 퇴적된 것으로 해석하였다. 일부 퇴적상조합 3이 상부로 갈수록 역암(Gm, Gs) 및 조립질 사암(Sm, Sn, Ss)이 우세해지며 상향조립화 경향을 보이는 것은, 지속적으로 공급되는 퇴적물에 의해 삼각주가 호수로 전진구축하며 형성된 것으로 해석하였다(Kenyon and Turcotte, 1985; Lee and Hwang, 2012; Sohn *et al.*, 2013).

4.4 퇴적상조합 4 (FA-4)

기재: 퇴적상조합 4는 괴상 이암(Mm)과 엽층리

이암(MI), 점이층리 사암(Sn)으로 구성되어있으며, 수 m에서 수십 m의 두께로 나타난다(그림 7). 괴상 이암(Mm)은 퇴적상조합 4의 대부분을 차지하고 있으며, 회색(N5)에서 암회색(N3)을 띠고 생교란의 흔적이 발견된다. 엽층리 이암(MI)은 실트가 우세한 밝은 부분과 점토가 우세한 어두운 부분이 반복적으로 나타난다. 수 cm 두께의 세립질 점이층리 사암(Sn)이 교호하는 것이 관찰되는데, 이 사암은 하부가 침식면이며 상부로 가면서 입자크기가 줄어들면서 연흔 사층리, 평행 엽층리가 발달하며, 최상부에는 이암이 피복하고 있다.

해석: 퇴적상조합 4의 엽층리를 보이는 이암(MI)은 점토와 실트암이 엽층리를 이루고 있는 점으로 보아, 육상에서 공급되는 부유퇴적물의 공급량 변화에 따른 퇴적물의 입도 변화에 의한 것으로 보인다(Anderson and Dean, 1988; Gruszka, 2007). 이는 홍수기에 다량의 실트암이 침전되고, 갈수기에 점토암이 퇴적되는 호성 엽층리(varve)와 유사한 것으로 추정된다(Benvenuti, 2003). 두꺼운 괴상 이암은 생교란에 의해 퇴적구조가 사라진 것으로 보인다. 하부 침식 경계를 보이는 점이층리 사암(Sn)에서 나타나는 연흔 사층리와 평행 엽층리, 이암 피복은 부마

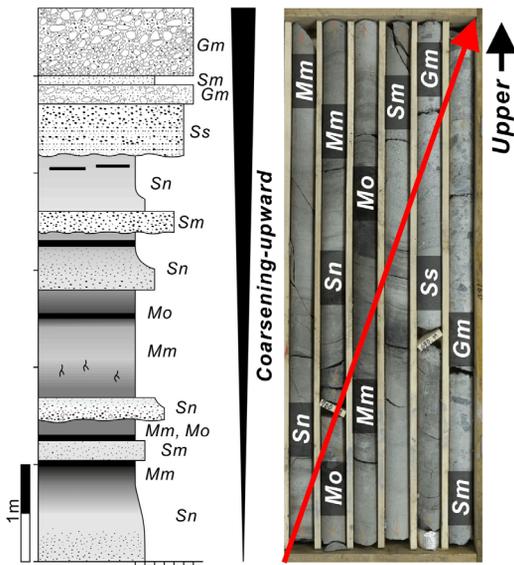


Fig. 6. Columnar section and photograph of Facies Association 3 (FA-3) showing a coarsening-upward trend, suggesting progradation of a delta lobe.

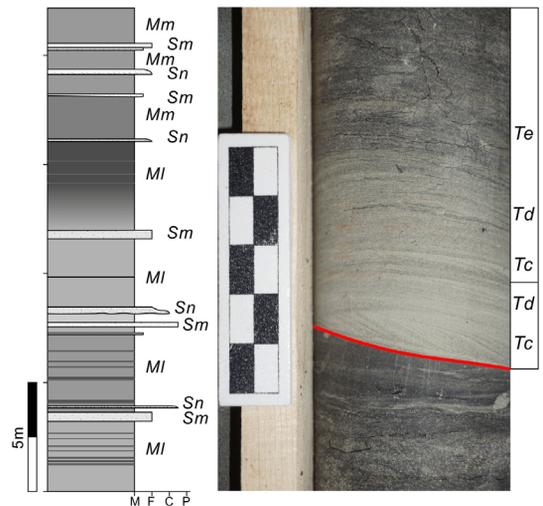


Fig. 7. Columnar section of the Facies Association 4 (FA 4) and photograph of normally graded sandstone showing a Bouma sequence (Tc: ripple cross-laminated fine sandstone. Td: parallel-laminated very fine sandstone to siltstone. Te: massive mudstone).

시퀀스(Bouma sequence)의 Tc, Td, Te 구간에 해당하는 것으로, 이는 호수 환경에서 간헐적으로 공급된 저탁류 또는 홍수류에 의한 저층류에 의해 퇴적되었음을 지시한다(Bouma, 1962; Nichols, 2009; Talling *et al.*, 2012).

5. 시추코어 대비 및 퇴적단위 분류

육상의 노두와는 달리 지하 퇴적층에서는 코어, 시추암편(cuttings), 물리검층, 탄성파 탐사 자료를 통해 확인되는 퇴적층의 두께, 입도, 퇴적환경의 수직 변화를 바탕으로 분지 충전에 영향을 주는 구조운동, 퇴적물 공급량 변화 등을 파악할 수 있다. 특히, 시추코어 연구는 기반암부터 지표 퇴적물까지의 퇴적상과 퇴적환경의 수직 변화를 육안으로 관찰 할 수 있어 분지 발달사를 밝히는데 매우 유용하다. 그러나 관찰 가능한 폭이 약 10 cm (공경 HQ: 96 mm, NQ: 76 mm)에 불과하여 소규모 퇴적구조 이외에는 관찰이

제한적이므로 퇴적상과 퇴적환경의 수평적 변화를 밝혀내는 것은 힘들다. 인근의 다른 시추코어와 대비를 통해 수평 변화를 추정할 수는 있으나, 이 역시 퇴적물 내에 건층(key bed)이 존재하여 시추공 간 대비의 기준이 되지 않으면 힘들다. 장기역암은 소규모로 화산물질이 함유된 최상부 구간을 제외하면, 건층이 발견되지 않고 대부분 하천퇴적물로 구성되어 있어 잦은 하도 폭의 변화와 침식, 유로변경 및 강의 유기 등으로 인해, 수백 m 간격으로 회수된 장기 시추코어에서 유사한 암상이나 퇴적상만으로 대비하는 것은 어렵다. 그러나 최근 육성 환경에서는 퇴적 수용공간의 형성과 이에 따른 퇴적기준면의 변동을 연구하는 순차층서 개념이 도입되어 지층의 대비에 활용되고 있다(Currie, 1997; Sissingh, 2001; Feng *et al.*, 2010). 즉, 육성 퇴적층의 순차층서 개념에 의하면, 퇴적수용공간의 형성이 적은 시기에는 역질 또는 조립질 사암이 우세한 하천퇴적물이 여러 차례 중첩되어 퇴적체간 수평적 및 수직적 연속성이 양호하고 퇴

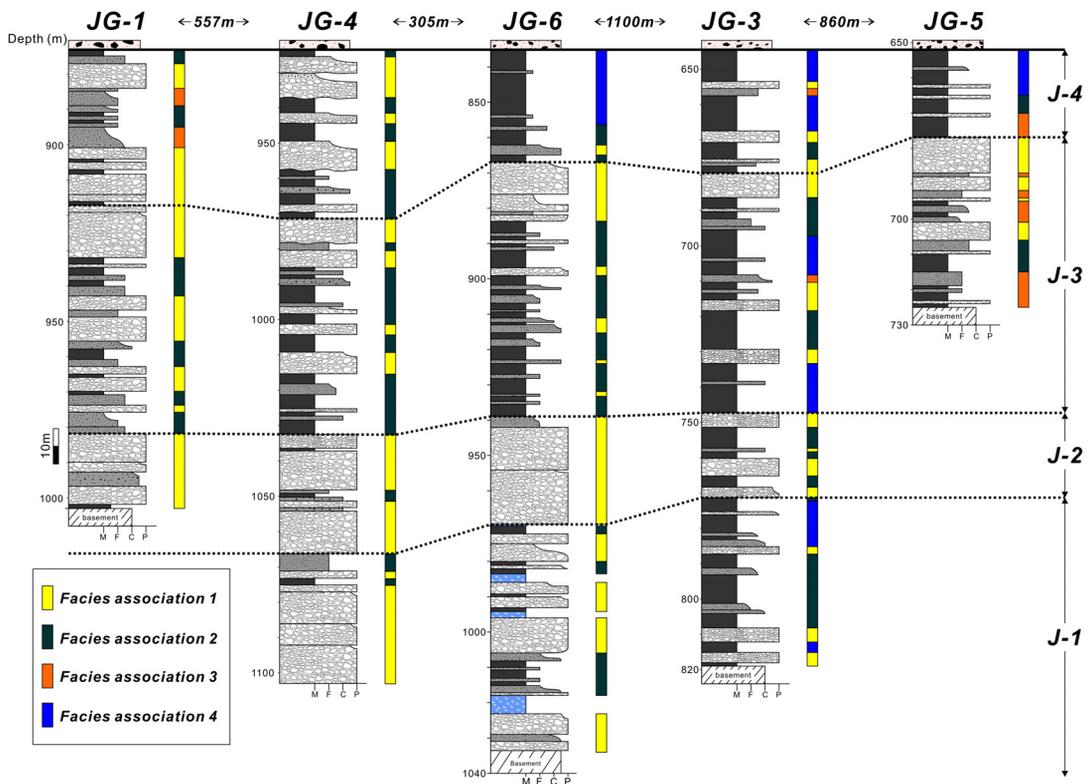


Fig. 8. Schematic columnar sections of Janggi Conglomerate. Based on tectono-stratigraphic correlations, the Janggi Conglomerate can be divided into 4 depositional units.

적계가 분지 쪽으로 전진한다(Wright and Marriott, 1993). 반면, 퇴적수용공간이 증가하면 하천퇴적물의 수평 연속성이 불량하며, 입도가 감소하고 퇴적계의 후퇴가 이루어진다. 퇴적수용공간의 형성이 더욱 증가하면 개별적으로 고립된 하천퇴적물이 형성되고, 퇴적계가 후퇴함에 따라 세립질 또는 호성 퇴적물의 분포가 증가한다(Currie, 1997; Farrell, 2001; Hickson *et al.*, 2005; Huerta *et al.*, 2011).

장기역암은 분지형성초기에 퇴적되었기 때문에 지형의 기복이나 아분지 및 지괴 별로 여러 퇴적계가 형성될 수 있다. 그러나 장기분지의 시추공에서

장기역암은 퇴적물의 수직변화 경향이 모든 시추공에서 대비가 가능하며, 이는 장기역암이 퇴적될 당시 전반적으로 동일한 분지 내에서 퇴적계가 형성된 것임을 지시한다. 따라서 동일한 퇴적계 내에서 분지 구조운동에 따라 퇴적수용공간이 변화하고, 이에 따라 퇴적상과 퇴적환경의 수직, 수평적 변화가 발생한 것으로 보인다. 그리하여 모든 시추공에서 대비되는 구간별 퇴적수용공간의 증가 또는 감소와 이에 따른 퇴적상 및 퇴적상조합의 수직분포 변화를 통해 4개의 퇴적단위로 구분하였다.(그림 8). 그리고 각 퇴적단위 내부에서 지역에 따른 퇴적상 및 퇴적환경, 퇴적층 두께 등의 변화는 지역적인 지형 기복이나 분지 내부의 소규모 단층 운동에 의한 것으로 해석되며, 이에 대한 상세한 기재 및 해석을 각 퇴적단위 별로 고찰하여 장기분지 형성 초기의 분지 진화과정을 세밀히 복원하였다.

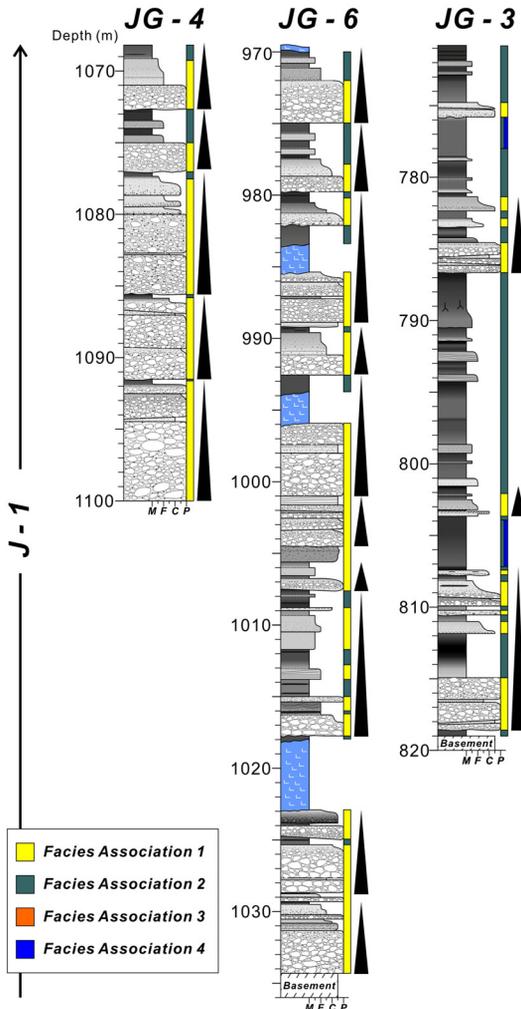


Fig. 9. Columnar sections of depositional unit J-1. The western part (JG-4) is dominated by FA-1, whereas the eastern part (JG-3) is represented by FA-2. For location of wells, see Fig. 1.

5.1 퇴적단위 J-1

기재: 장기역암의 최하부 구간인 퇴적단위 J-1은 기반암 상부의 퇴적물로서, 장기 4호공과 6호공에서는 상향세립화 경향을 보이는 역암으로 구성된 퇴적상조합 1이 우세하고 장기 3호공에서는 주로 이질 퇴적물인 퇴적상조합 2가 분포하고 있으며, 장기 1호공과 5호공에서는 나타나지 않는다(그림 9). 분지 서쪽에 위치한 장기 4호공의 하부는 퇴적상조합 1의 역질 퇴적물이 수차례 중첩되어 두껍게 분포하고 이질 퇴적물인 퇴적상조합 2가 협재하지만, 상부로 갈수록 퇴적상조합 2가 두꺼워진다. 장기 6호공의 전반적인 퇴적상조합 분포 경향은 장기 4호공과 유사하나, 상대적으로 역의 크기가 작고 퇴적상조합 2가 두껍게 분포한다. 동쪽에 위치한 장기 3호공은 주로 이질 퇴적물인 퇴적상조합 2가 우세하고 일부 구간에 수 m 두께의 퇴적상조합 1의 역질 퇴적물이 발달해 있으며, 상부에는 퇴적상조합 4가 협재하고 있다.

해석: 퇴적단위 J-1은 하부구간에 두꺼운 역질 하천퇴적물(퇴적상조합 1)이 분포하고 상부로 갈수록 습지 퇴적물(퇴적상조합 2)이 우세해지는 것으로 보아, 이 시기에는 퇴적수용공간이 점차 증가하였던 것으로 보인다. 기반암 상부의 두꺼운 역질 퇴적체는, 역의 조성이 대부분 기반암 기원이며 원마도가 양호한 것으로 보아, 분지형성 초기에 역질 하천 퇴적물

이 유입된 것임을 지시한다. 또한 분지 서쪽인 장기 4호공에서 동쪽인 장기 3호공으로 갈수록 퇴적상조합 1은 감소하고 퇴적상조합 2와 4의 이질퇴적물이 우세해지는 것은, 분지 동쪽에 상대적으로 저지대인 습지 또는 호수 환경이 형성되었던 것으로 보인다. 퇴적물이 나타나지 않은 장기 1, 5호공은 퇴적단위 J-1의 퇴적시기에 고지대였던 것으로 보인다. 즉, 장기분지 확장 초기인 퇴적단위 J-1 시기에는 빠른 분지 침강으로 퇴적수용공간이 형성되었고 서쪽의 역질 하천 퇴적물이 동쪽의 호수로 유입되는 퇴적계가 형성되었으며, 분지 일부는 고지대로 남아있었던 것으로 해석된다(그림 10).

5.2 퇴적단위 J-2

기재: 퇴적단위 J-2는 괴상 또는 상향세립화 경향을 보이는 퇴적상조합 1의 역질 퇴적체가 내부 침식면을 보이며 모든 시추공에서 두껍게 분포하고, 퇴적상조합 2가 드물게 교호한다(그림 11). 장기 1, 4, 6호공은 퇴적상조합 1의 역질 퇴적체가 우세하게 분포하며, 일부 구간에서 퇴적상조합 2가 협재한다. 장기 3호공은 다른 시추공에 비해 역질 퇴적물의 두께가 얇으며, 상대적으로 퇴적상조합 2가 두껍게 발달해 있으나 상부로 갈수록 역질 퇴적체인 퇴적상조합

1이 우세해지는 상향 조립화 경향을 보인다.

해석: 모든 시추공에서 퇴적단위 J-2는 퇴적상조합 1의 역질 퇴적물이 두껍게 누적된 것으로 보아, 분지 전반에 걸쳐 퇴적수용공간이 감소함에 따라 하천퇴적물이 여러 차례 누적 및 침식되었고, 이 과정에서 범람원 퇴적체는 잘 보존되지 못했던 것으로 해석된다. 또한, 분지 서쪽의 장기 1, 4, 6호공에서 동쪽의 장기 3호공으로 갈수록 퇴적상조합 1은 얇아지고 퇴적상조합 2가 두꺼워지는 것을 통해, 장기 1, 4, 6호공 인근이 퇴적물 공급지에 인접한 것으로 추정된다. 즉, 퇴적단위 J-2가 퇴적되는 시기에는 침강운동으로 인해 고지대였던 장기 1호공 지역에도 퇴적이 시작되었으나, 퇴적물 공급량에 비해 분지 침강률이 낮아 퇴적수용공간의 형성이 느렸고, 분지 동쪽의 3호공 지역은 습지 또는 호수 환경에서 점차 하천 환경으로 바뀌는 전진퇴적이 발생한 것으로 해석된다(그림 12).

5.3 퇴적단위 J-3

기재: 퇴적단위 J-3의 하부에는 퇴적상조합 2, 3, 4의 이질퇴적물이 우세하나, 상부로 갈수록 퇴적상조합 1의 사질 또는 역질 하천퇴적물이 두껍게 발달하

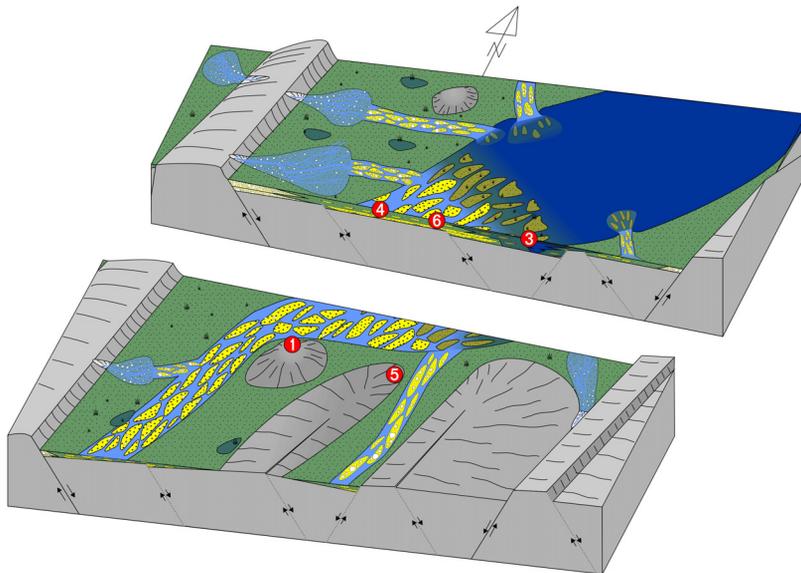


Fig. 10. Schematic depositional model of Unit J-1. During the early stage of basin evolution, the southwestern part of the basin (JG-4 and -6 wells) was deposited in braided stream environment, whereas the eastern part (JG-3 well) is represented by a lacustrine environment.

면서 전반적으로 상향조립화 경향을 보인다(그림 13). 장기 1호공의 하부는 퇴적상 조합 2와 3의 이암 또는 세립질 사암에 얇은 역질 퇴적체가 교호하고 있다. 상부로 갈수록 역질 퇴적체의 두께와 빈도가 증가하며 최상부에서는 약 13 m 두께의 중첩된 역암 또는 역질사암체가 나타난다(그림 13). 장기 4호공과 6호

공 역시 장기 1호공과 유사한 퇴적상의 변화를 보이지만, 상대적으로 퇴적상 조합 1의 두께가 얇고 퇴적상 조합 2가 더 두껍다. 장기 5호공은 퇴적단위 J-3부터 퇴적이 시작되며, 하부에는 퇴적상 조합 3의 퇴적체가 우세하고 상부로 갈수록 퇴적상 조합 1의 퇴적체가 주로 분포하지만, 전반적인 역의 크기는 장기

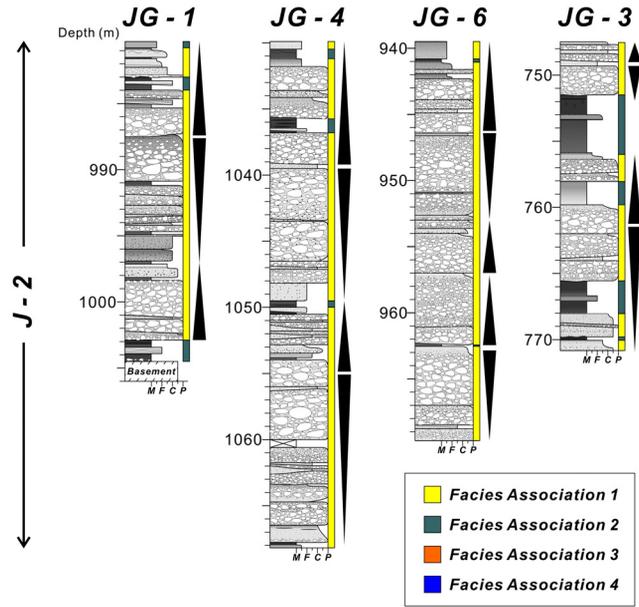


Fig. 11. Columnar sections of depositional unit J-2. This unit is represented by thick and stacked conglomerate (FA-1) with internal erosional surface. For location of wells, see Fig. 1.

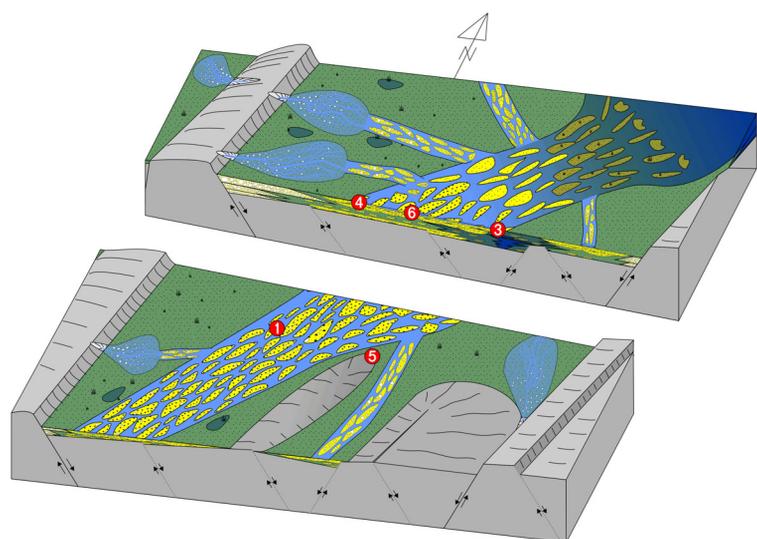


Fig. 12. Schematic depositional model during the second stage of Janggi Conglomerate deposition (Unit J-2). Most of the wells are dominated by thick, stacked units of conglomerate, deposited in braided stream environment.

1, 4, 6호공보다 세립이다. 장기 3호공의 하부는 퇴적상조합 4가 우세하며, 부분적으로 퇴적상조합 1의 역질 사암체가 얇게 발달해 있다. 상부로 갈수록 퇴적상조합 2와 3의 이질퇴적체가 증가하며, 최상부에는 약 6 m의 퇴적상조합 1의 역질 퇴적체가 분포한다(그림 13).

해석: 퇴적단위 J-3의 하부에 퇴적상조합 2, 3의 습지 혹은 호수 주변부 퇴적물과 일부 퇴적상조합 4의 호수 퇴적물이 발달해 있는 것으로 보아, 퇴적단위 J-3의 퇴적 초기에는 퇴적수용공간이 빠르게 형성된 것으로 보인다. 그러나 퇴적단위 J-3의 후기는, 모든 시추공에서 전반적으로 상향조립화 경향을 보

이며 하성 퇴적환경이 우세해지는 것으로 보아, 점차 퇴적수용공간의 형성이 줄어들었던 것으로 해석된다. 장기 1호공에서 장기 4, 6호공으로 갈수록 퇴적상조합 1의 두께가 얇아지는 것은, 장기 1호공 인근이 퇴적물 공급지에 더 가까웠던 것을 지시하고, 장기 5호공의 전반적인 역의 크기가 장기 1, 4, 6호공보다 세립인 것을 통해, 상대적으로 장기 5호공 지역이 하류에 위치했던 것으로 추정된다. 장기 3호공 인근은 퇴적단위 J-3의 초기에 호수 환경이 조성되었고, 후기에도 하천 퇴적물이 얇게 분포한 것으로 보아, 다른 시추공보다 분지 내부에 가깝게 위치했던 것으로 보인다. 즉, 퇴적단위 J-3의 퇴적시기에는 다시 분지 침강운동이 가속화됨에 따라 장기 5호공 지

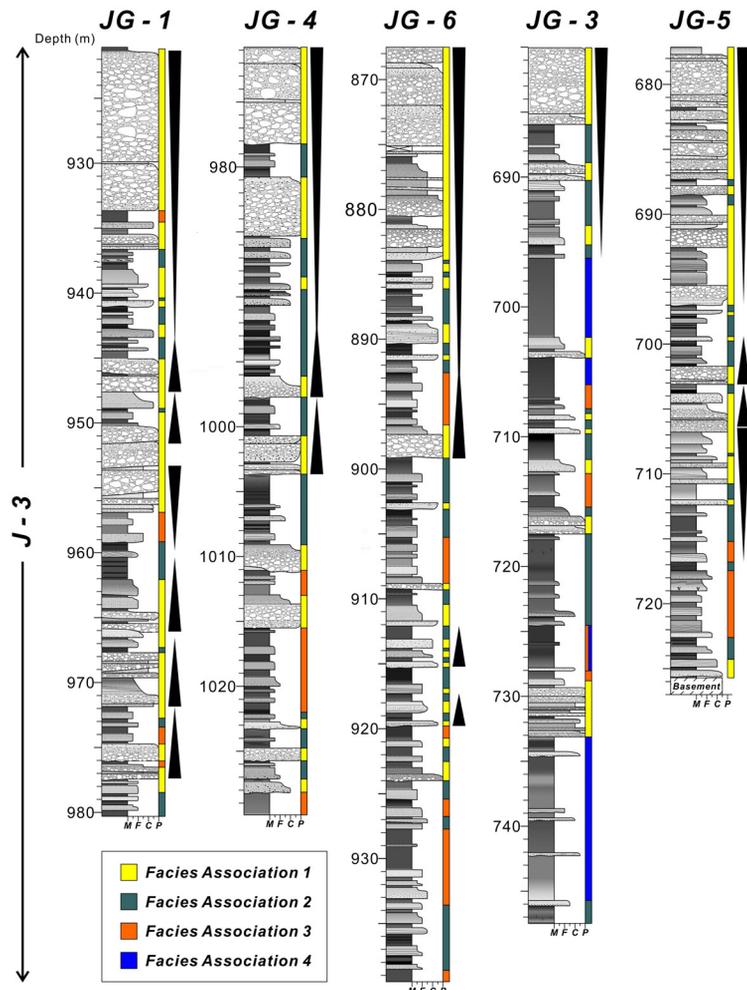


Fig. 13. Columnar sections of depositional unit J-3. The lower part of this unit is represented by FA-2 and -4, whereas the upper part is dominated by FA-1, showing a coarsening-upward trend. For location of wells, see Fig. 1.

역에도 퇴적이 시작되었고, 분지 남서쪽의 역질 하천환경이 동쪽의 호수로 유입되는 퇴적계가 조성되었다(그림 14). 그러나 점차 퇴적물의 입도가 증가하고, 상부에는 역질 하천퇴적물이 두껍게 분포하며 수십 m 규모의 상향조립화 경향(coarsening-upward trend)을 보이는 것으로 보아, 점차적으로 분지 침강 속도가 느려짐에 따라 분지가 충전되면서 퇴적계가 분지 내부를 향해 전진 구축한 것으로 보인다(Kenyon and Turcotte, 1985; Nichols, 2009) (그림 15).

5.4 퇴적단위 J-4

기재: 퇴적단위 J-4는 장기역암의 최상부 구간으로 상부경계는 성동리층 최하부의 데사이트질 응회암층으로 구분된다(그림 16). 이 퇴적단위 내에 분포하는 화산재 또는 변질된 화산물질 밀집층은 모든 시추공에서 나타나 정밀한 대비가 가능하므로, 이 층을 기준으로 퇴적단위 J-4를 상하부로 구분하였다. 퇴적단위 J-4의 하부는 장기 1호공에서 퇴적상조합 1이 상향세립화 경향을 보이며 수차례 반복되어 나타나고, 점차 퇴적상조합 2 또는 3의 이질 퇴적물이 우세해진다(그림 16). 장기 4, 5, 6호공 역시 장기 1호공과 유사한 퇴적상조합 분포를 보이지만, 상대적으로 퇴적상조합 2, 3의 비율이 높고, 장기 4호공에서 장기 5, 6호공으로 갈수록 퇴적상조합 1의 두께가 얇아진다. 장기 3호공은 퇴적상조합 2, 3이 우세하다가

점차 퇴적상조합 4로 바뀐다. 퇴적단위 J-4의 상부 구간은 장기 1, 4호공에서 퇴적상조합 1의 퇴적체가 상향세립화 경향을 보이고 수차례 중첩되어 두껍게 퇴적되어 나타난다(그림 16). 그러나 장기 3, 5, 6호공은 퇴적상조합 3과 4가 우세하게 분포한다. 특히, 장기 6호공은 장기 4호공과 시추공간 거리가 약 300 m에 불과하지만, 퇴적상조합 1의 퇴적체가 전혀 발견되지 않고 퇴적상조합 4가 10 m 이상 두껍게 발달해 있다.

해석: 퇴적단위 J-4에서 소규모로 화산물질 밀집층이 분포하고 최상부에 데사이트질 응회암층이 분포하는 것으로 보아, 하부의 퇴적단위들과 달리 이 시기부터 분지 내부 혹은 인근에서 화산활동이 있었던 것으로 추정된다. 퇴적단위 J-4의 하부는 장기 1, 4, 5, 6호공에서 퇴적상조합 1이 우세하다가 점차 퇴적상조합 2, 3으로 바뀌는 것으로 보아, 하천환경이 점차 습지 또는 호수 인근 환경으로 변한 것으로 해석된다. 장기 3호공은 퇴적상조합 2, 3이 우세하다가 점차 퇴적상조합 4로 바뀌는 것을 통해, 퇴적환경이 호수 주변부에서 호수로 바뀐 것으로 추정된다. 이를 통해, 이 시기에는 모든 시추공 지역에서 퇴적수용공간의 형성이 증가한 것으로 보인다. 퇴적단위 J-4의 상부는 장기 1, 4호공에서 퇴적상조합 1이 중첩되어 두껍게 나타나는 것으로 보아, 퇴적수용공간

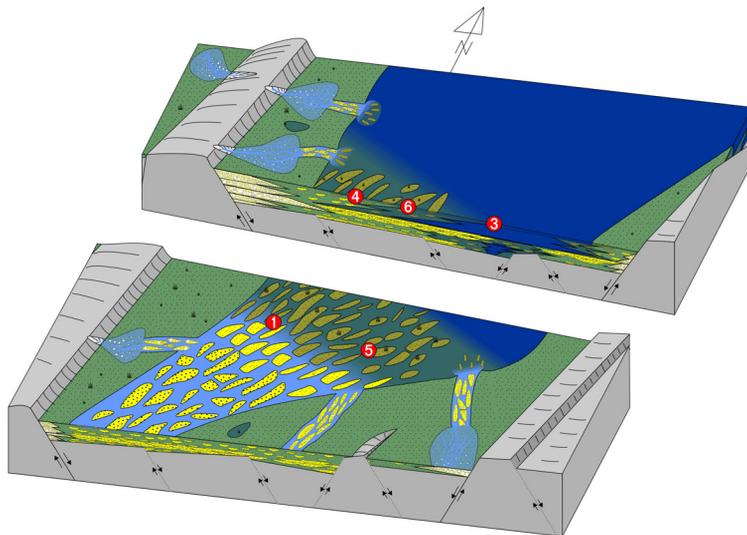


Fig. 14. Schematic depositional model of the early stage of Unit J-3. Rapid subsidence of the basin resulted in the formation of lake (JG-3 well) and lake margin (JG-4, -5 and -6 wells) environments.

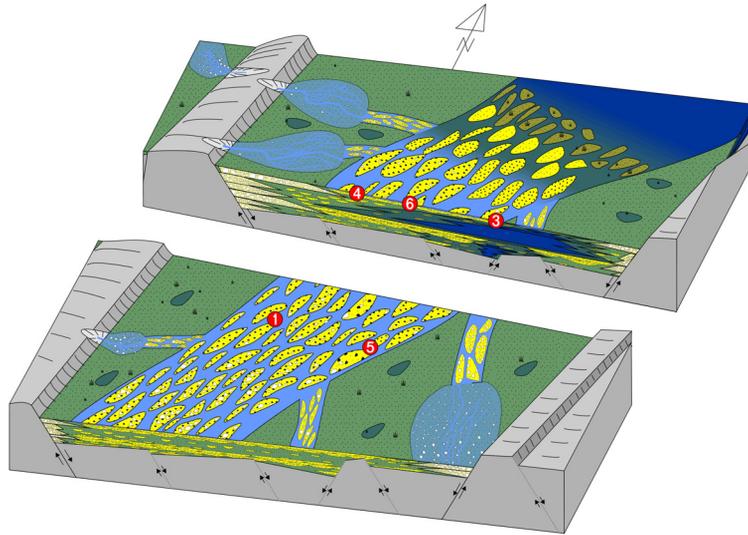


Fig. 15. Schematic depositional model of late stage of depositional unit J-3. Gradual decrease in accommodation space resulted in progradation of braided streams into lake environment.

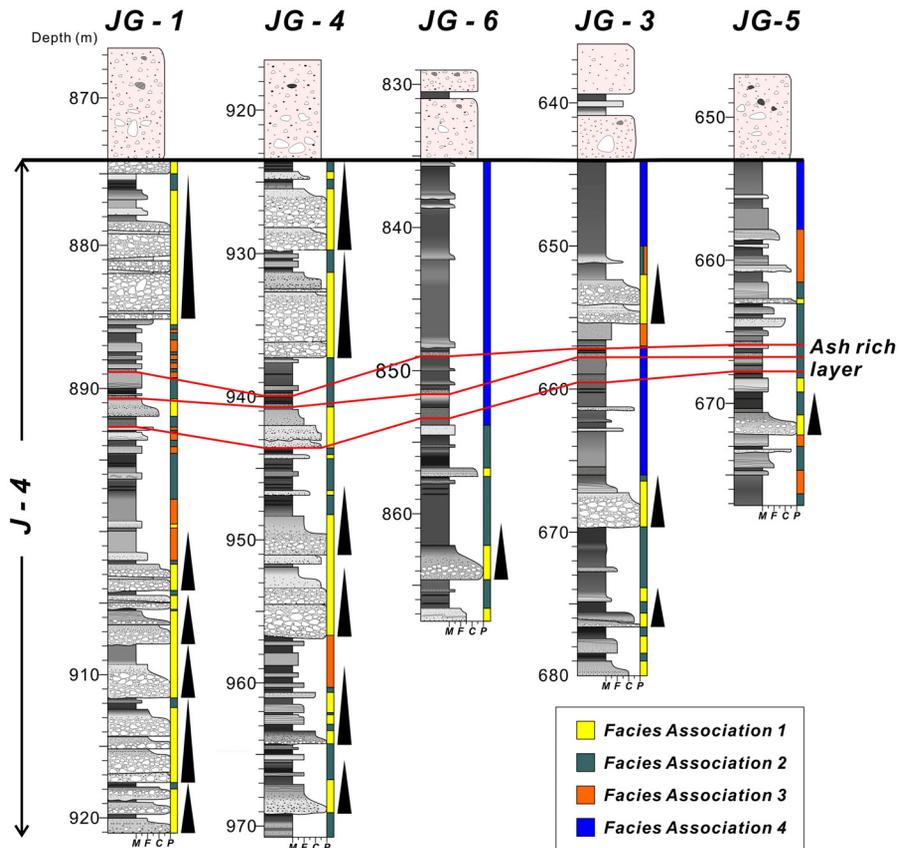


Fig. 16. Columnar sections of depositional unit J-4. Wide spread ash rich layers act as a key bed for detailed correlation. Note abrupt change in facies associations between JG-4 and JG-6 wells.

의 형성이 적은 상태에서 역질 하천 퇴적환경이 발달한 것으로 보인다. 그러나 장기 3, 5, 6호공은 퇴적상조합 3, 4가 우세한 것으로 보아, 퇴적수용공간의 빠른 형성으로 호수 또는 호수 인근 환경이 형성된 것으로 추정된다(그림 17). 특히 장기 6호공은 하천 퇴적환경이 우세한 장기 4호공의 인근에 위치하지만, 하천의 영향을 받지 않으며 호수 퇴적환경이 오랜 시간 동안 유지되었던 것으로 보인다. 이를 통해 장기 4호공과 6호공 사이에서 퇴적물의 공급을 차단하고, 퇴적환경의 급격한 차이를 만든 단층운동이 있었던 것으로 추정된다. 또한 이러한 구조운동이 화산재 밀집층과 성동리층 최하부의 데사이트질 응회암 사이에 일어난 것으로 보아, 데사이트질 화산활동과 관련된 것으로 보인다. 즉, 퇴적단위 J-4 시기에는 점차 분지 침강이 가속화됨에 따라 하천퇴적환경이 습지 또는 호수 인근환경으로 변하게 되었다(그림 17). 중반부에 이르러서는 소규모 화산활동으로 화산재 밀집층이 발달하고 퇴적단위 J-4의 상부경계에는 데사이트질 응회암이 분포하는데, 그 사이의 퇴적층에서는 하성퇴적환경을 보이는 서쪽의 장기 1, 4호공과 호성퇴적환경을 보이는 동쪽인 장기 3, 5, 6호공 사이에 급격한 퇴적상의 변화가 나타난다. 이는 데사이트질 화산활동에 의해 분지의 침강이 급격하게 일어났고, 이에 따라 장기 4호공과 6호공 사이

에 정단층이 형성되었거나, 재활성화 되었기 때문으로 추정된다(그림 17).

6. 토 의

6.1 분지 형성 초기의 구조운동

연구 지역인 장기분지의 뇌성산 지괴는 서쪽 혹은 북서쪽에 위치한 정단층으로 인해 장기분지 북서쪽의 오천 지괴와 구분된다. 기존의 야외지질조사와 시추코어 분석 결과, 이 정단층은 뇌성산 지괴의 경계단층으로 추정되며 장기분지의 분지 충전물은 이 단층을 향해 북서쪽으로 경동되어있고, 단층운동에 따라 단층면과 인접한 상반 부분이 많은 침강을 받아 가장 깊은 곳이 된 것으로 해석된다(Kim *et al.*, 2015). 이는 확장형 분지(extensional basin)의 구조적-퇴적학적 진화 모델과 유사하다(Gawthorpe and Leeder, 2000). 그러나 장기역암은 상대적으로 경계단층에 인접한 장기 1, 4호공보다 멀리 떨어져있는 장기 3호공에 호수 또는 호수 주변 퇴적환경이 우세하게 조성된 것으로 보아 장기 3호공 인근이 분지 내에서 깊은 곳이었던 것으로 추정되고, 이는 Gawthorpe and Leeder (2000)의 확장형 분지 진화 모델 초기에 분지 내부단층의 활동으로 인해 부분적으로 나타나는 호수와 유사하다. 또한, 경계단층의 운동으로 인

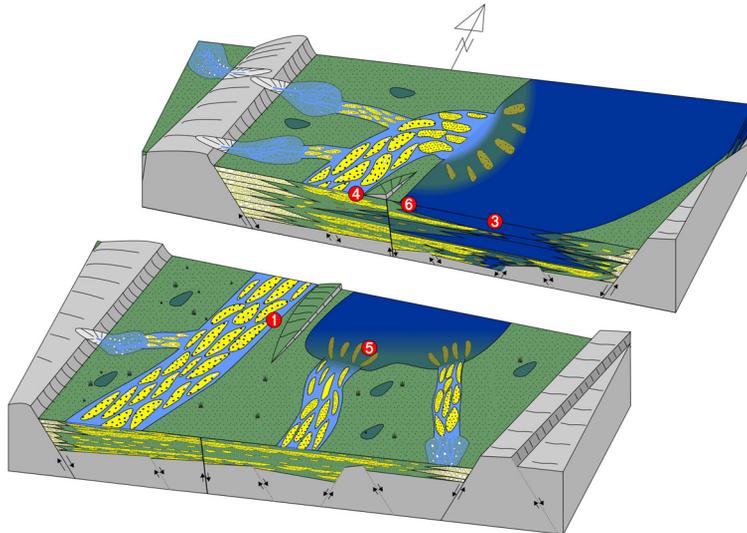


Fig. 17. Schematic depositional model during the late stage of the deposition of Janggi Conglomerate (Unit J-4). Between JG-4 and JG-6 wells, abrupt change in depositional environment occurred, probably related to the activation of a normal fault, due to volcanic activity.

한 분지 내부 퇴적환경이 단층면 인근에서 나타나지 않는 것으로 보아, 장기역암이 퇴적된 장기분지 형성 초기에는 분지 경계단층보다 분지 내부에 여러 정단층이 활발히 움직였던 것으로 추정된다. 이러한 분지 구조운동의 특징은 장기역암이 퇴적되던 분지 형성 초기에는 분지 북서쪽의 정단층 보다는 뇌성산 지괴의 북동, 남서에 위치하는 북서-남동 방향의 주향이동단층이 분지의 주 경계단층 역할을 하였을 가능성을 제시한다. 즉, 분지 형성초기에는 북서-남동 방향의 주향이동단층에 의해 분지 내부에 북동-남서 방향의 정단층이 형성되었고, 분지 내부로부터 침강이 시작되어 점차 분지의 외곽으로 침강지가 이동한 것으로 추정된다.

6.2 구조운동과 퇴적물 공급량 변화

퇴적분지에서 퇴적상 및 퇴적환경의 변화는 퇴적 수용공간의 변화와 퇴적물 공급의 변동 그리고 기후 변화에 의해 조절된다(Wescott, 1993; Shanley and McCabe, 1994; Ethridge *et al.*, 1998). 그중 퇴적수용공간은 해수면의 변동과 분지 구조운동에 의해 증가 혹은 감소한다(Blair and Bilodeau, 1988). 육상 퇴적분지인 장기분지는, 해수면의 변동에 영향을 받지 않으므로 퇴적수용공간의 형성에 영향을 미치는 주 요소는 분지 구조운동으로 추정된다(Cleveland *et al.*, 2007). 기존의 고생물학적 연구를 통해 분지충전물의 퇴적시기 동안에는 기후가 일정하게 유지되었던 것으로 보고되었으므로, 기후변화에 따른 퇴적물 공급량의 변화 혹은 해수면의 변동은 분지 충전물 변화에 큰 영향을 주지 않았을 것으로 생각된다(Chung and Choi, 1993; Kim *et al.*, 2008; Paik *et al.*, 2011). 또한 뇌성산 지괴의 북서쪽에 위치하는 분지경계단층의 운동이 미약했던 것으로 보아, 단층운동으로 인한 퇴적물 공급지의 침식 정도 차이에 따른 퇴적물 공급량의 변화도 미미했던 것으로 추정된다(Gawthorpe *et al.*, 1994; Jackson and Leeder, 1994; Eliet and Gawthorpe, 1995). 즉, 장기역암 퇴적시기에는 기후에 의한 퇴적물 공급량의 변화 없이, 분지 내부의 침강률 변동에 따른 퇴적수용공간의 변화로 퇴적환경의 수직적, 수평적 변화가 발생한 것으로 보인다.

6.3 데사이트질 화산활동과 분지 구조운동

장기역암의 퇴적환경은 퇴적단위 J-1부터 J-3의

퇴적시기에는 모든 시추공에서 하천, 호수 주변부 그리고 호수로 이어지는 점진적인 퇴적환경 및 퇴적수용공간의 변화를 보인다. 그러나 퇴적단위 J-4의 중간부에 분포한 화산재 밀집층과 성동리층 최하부의 데사이트질 응회암이 퇴적될 시기 사이에 분지 서쪽에 위치한 장기 1, 4호공과 동쪽에 위치한 장기 3, 5, 6호공 사이에서 퇴적환경이 급격히 변화한다. 특히, 장기 4호공과 6호공은 시추공간 거리가 300 m임에도 불구하고, 장기 4호공에서는 역질하천 퇴적물이 우세하고 장기 6호공은 호성환경 퇴적물로 구성된 것으로 보아, 장기 4호공과 6호공 사이에 정단층이 형성되었거나 재활된 것으로 추정된다. Sloan and Williams (1991)는 화산활동과 연관된 구조운동 연구에서, 화산 분출 이후 마그마 챔버의 붕괴에 따라 정단층이 형성 및 재활되면서 분지 침강이 발생하고, 이로 인해 해침이 일어나는 것을 연구하였다. 장기역암의 퇴적단위 J-4에서 관찰되는 변화 역시, 이러한 연구결과와 유사하지만, 약 20 m의 소규모 구간에서만 관찰되므로, 데사이트질 화산퇴적층이 두껍게 발달한 성동리층의 화산퇴적학적, 구조적 연구가 추가로 필요하다.

7. 결론

장기분지 뇌성산 지괴에서 시추된 6개의 장기역암 시추코어는 9개의 퇴적상으로 구성되어 있으며, 이를 역질 망상하천, 저습지, 하구 사주 및 호수 환경을 지시하는 4개의 퇴적상 조합으로 구분하였고, 퇴적상조합의 수직적 변화를 기준으로 장기역암을 4개의 퇴적단위로 구분하였다. 퇴적단위 J-1은 분지확장 초기의 퇴적물로, 분지침강 운동에 의해 서쪽의 하천 퇴적물이 동쪽의 호수로 공급되었다. 퇴적단위 J-2의 퇴적시기에는 분지침강이 느려짐에 따라, 역질 하천 퇴적물이 점차 분지 내부로 전진하며 퇴적되었고, 이로 인해 모든 시추공에서 역질 하천 퇴적물이 수차례 중첩되어 두껍게 쌓였다. 퇴적단위 J-3의 퇴적 초기에는 분지 침강률이 증가하여 호수 혹은 호수 주변부 퇴적환경이 형성되었으나, 후기로 갈수록 분지 침강이 느려짐에 따라 하천 퇴적물이 호수로 전진 퇴적하였다. 퇴적단위 J-4의 퇴적 초기에는 분지의 침강률이 증가하여 서쪽은 하천 퇴적환경, 동쪽은 호수 혹은 호수 주변부 퇴적환경이 형성되었다. 후기

에는 장기 4호공과 6호공 사이에 급격한 퇴적환경의 변화가 발생하여 각각 하천과 호수 퇴적환경이 형성되었다. 이러한 변화가 소규모의 화산재 밀집층과 성동리층 최하부의 데사이트질 응회암 사이에서 나타나는 것으로 보아, 화산활동과 연관된 구조운동에 의한 것으로 추정된다. 또한 육상의 영암리 지괴에서 나타나는 화산쇄설물을 다량으로 포함하는 장기역암 표식지는 시추코어 연구에 따르면, 장기역암의 퇴적단위 J-4에 대비되는 것으로 추정된다.

사 사

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 (재)한국이산화탄소포집 및 처리연구개발센터(Korea CCS 2020 사업)의 지원을 받아 수행된 연구임(KCRC-2014M1A8A1049279). 이 논문의 심사를 맡아 건설적인 조언을 주신 최문영 박사님, 권창우 박사님께 감사드리고, 코어기재를 수행하면서 건설적인 조언과 토의를 도와준 경상대학교 김정환 군과 부산대학교 김민철 군, 한국지질자원연구원의 김용식 박사께 감사를 드린다.

REFERENCES

- Anderson, R.Y. and Dean, W.E., 1988, Lacustrine varve formation through time. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 62(1), 215-235.
- 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.
- Benvenuti, M., 2003, Facies analysis and tectonic significance of lacustrine fan-deltaic successions in the Pliocene-Pleistocene Mugello Basin, Central Italy. *Sedimentary Geology*, 157(3), 197-234.
- 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(6), 517-520.
- Bouma, A.H., 1962, *Sedimentology of Some Flysch Deposits, A Graphic Approach to Facies Interpretation*. Elsevier, Amsterdam.
- Bristow, C.S., Skelly, R.L. and Ethridge, F.G., 1999, Crevasse splays from the rapidly aggrading, sand-bed, braided Niobrara River, Nebraska: Effect of base-level rise. *Sedimentology*, 46(6), 1029-1048.
- 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.
- Choi, H.I., 1986, Fluvial plain/lacustrine facies transition in the Cretaceous Sindong Group, south coast of Korea. *Sedimentary Geology*, 48(3), 295-320.
- Chough, S.K., Hwang, I.G. and Choe, M.Y., 1990, The Miocene Doumsan Fan-delta, South Korea: A composite fan-delta system in back-arc margin. *Journal of Sedimentary Petrology*, 67, 130-141.
- Chung, C.H. and Choi, D.K., 1993, Paleoclimatic Implications of Palynoflora from the Yeonil Group (Miocene), Pohang Area, Korea. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, v. 9, no. 2, 143-154.
- Cleveland, D.M., Atchley, S.C. and Nordt, L.C., 2007, Continental sequence stratigraphy of the Upper Triassic (Norian-Rhaetian) Chinle strata, northern New Mexico, USA: Allocyclic and autocyclic origins of paleosol-bearing alluvial successions. *Journal of Sedimentary Research*, 77(11), 909-924.
- Currie, B.S., 1997, Sequence stratigraphy of nonmarine Jurassic-Cretaceous rocks, central Cordilleran foreland-basin system. *Geological Society of America Bulletin*, 109(9), 1206-1222.
- Deng, H.W., Wang, R., Xiao, Y., Guo, J. and Xie, X., 2008, Tectono-sequence stratigraphic analysis in continental faulted basins. *Earth Science Frontiers*, 15(2), 1-7.
- Eliet, P.P. and Gawthorpe, R.L., 1995, Drainage development and sediment supply within rifts, examples from the Sperchios basin, central Greece. *Journal of the Geological Society*, 152(5), 883-893.
- Ethridge, F.G., Wood, L.J. and Schumm, S.A., 1998, Cyclic variables controlling fluvial sequence development: Problems and perspectives. *SEPM (Society for Sedimentary Geology), Special Publication*, no. 59, 18-29.
- Fabbri, O., Charbet, J. and Fournier, M., 1996, Alternate senses of displacement along the Tsushima fault system during the Neogene based on fracture analyses near the western margin of the Japan Sea. *Tectonophysics*, 257, 275-295.
- Farrell, K.M., 2001, Geomorphology, facies architecture, and high-resolution, non-marine sequence stratigraphy in avulsion deposits, Cumberland Marshes, Saskatchewan. *Sedimentary Geology*, 139(2), 93-150.
- Feng, Z.Q., Jia, C.Z., Xie, X.-N., Zhang, S., Feng, Z.-H. and Cross, T.A., 2010, Tectonostratigraphic units and stratigraphic sequences of the nonmarine Songliao basin, northeast China. *Basin Research*, 22(1), 79-95.
- Gawthorpe, R.L., Fraser, A.J. and Collier, R.E.L., 1994, Sequence stratigraphy in active extensional basins: Im-

- plications for the interpretation of ancient basin-fills. *Marine and Petroleum Geology*, 11(6), 642-658.
- Gawthorpe, R.L. and Leeder, M.R., 2000, Tectono-sedimentary evolution of active extensional basins. *Basin Research*, 12(3-4), 195-218.
- Gim, J.H., 2016, Subaerial vs. subaqueous volcanoclastic sedimentation of the subsurface dacitic volcanoclastic deposits in the Miocene Janggi Basin, SE Korea. Master's thesis, Gyeongsang National University, 88 p (in Korean with English abstract).
- Gruszka, B., 2007, The Pleistocene glaciolacustrine sediments in the Belchatow mine (central Poland): Endogenic and exogenic controls. *Sedimentary Geology*, 193, 149-166.
- Hadlari, T., Rainbird, R.H. and Donaldson, J.A., 2006, Alluvial, eolian and lacustrine sedimentology of a Paleoproterozoic half-graben, Baker Lake Basin, Nunavut, Canada. *Sedimentary Geology*, 190(1), 47-70.
- Hickson, T.A., Sheets, B.A., Paola, C. and Kelberer, M., 2005, Experimental test of tectonic controls on three-dimensional alluvial facies architecture. *Journal of Sedimentary Research*, 75(4), 710-722.
- Huerta, P., Armenteros, I. and Silva, P.G., 2011, Large-scale architecture in non-marine basins: The response to the interplay between accommodation space and sediment supply. *Sedimentology*, 58(7), 1716-1736.
- Hwang, I.G. and Chough, S.K., 2000, The Maesan fan delta, Miocene Pohang Basin, SE Korea: Architecture and depositional processes of a high-gradient fan-delta-fed slope system. *Sedimentology*, 47(5), 995-1010.
- Jackson, J. and Leeder, M., 1994, Drainage systems and the development of normal faults: An example from Pleasant Valley, Nevada. *Journal of Structural Geology*, 16(8), 1041-1059.
- Jo, H.R., Rhee, C.W. and Chough, S.K., 1997, Distinctive characteristics of a streamflow-dominated alluvial fan deposit: Sanghori area, Kyongsang Basin (Early Cretaceous), southeastern Korea. *Sedimentary Geology*, 110(1), 51-79.
- Jolivet, L., Huchon, P. and Rangin, C., 1989, Tectonic setting of Western Pacific marginal basins. *Tectonophysics*, 160, 23-47.
- Jolivet, L., Huchon, P., Brun, J.P., Chamot-Rooke, N., LePichon, X. and Thomas, J.C., 1991, Arc deformation and marginal basin opening Japan Sea, as a case study. *Journal of Geophysical Research*, 96, 4367-4384.
- 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).
- Kenyon, P.M. and Turcotte, D.L., 1985, Morphology of a delta prograding by bulk sediment transport. *Geological Society of America Bulletin*, v. 96, 1457-1465.
- Ki, J.S., 2009, Volcanism and sedimentation in the south-eastern part of the Miocene Janggi Basin, SE Korea. Master's thesis, Gyeongsang National University, 71 p.
- Kim, I.-S., 1992, Origin and Tectonic Evolution of the East Sea (Sea of Japan) and the Yangsan Fault System: A New Synthetic Interpretation. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 28, no. 1, 84-109 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.S., Son, M. and Kim, J.-S., 2005, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 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., Jeong, E.-K., Sun, B.-Y. and Lee, J., 2008, New Record of Fossil Woods from the Janggi Group in Pohang, Korea. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, v. 24, no. 2, 135-147 (in Korean with English abstract).
- Kim, M.-C., Kim, J.-S., Jung, S., Son, M. and Sohn, Y.K., 2011, Bimodal Volcanism and Classification of the Miocene Basin Fill in the Northern Area of the Janggi-myeon, Pohang, Southeast Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 47, no. 6, 585-612 (in Korean with English abstract).
- Kim, M.-C., Gihm, Y.S., Son, E.-Y., Son, M., Hwang, I.G., Shinn, Y.J. and Choi, H., 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, 253-271 (in Korean with English abstract).
- 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. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 25, no. 3, 337-349 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.-Y. and Hwang, I.G., 2012, Vertical variation of sedimentary facies and depositional environment in the core section of the lower part of the Sindong Group, northwestern part of the Gyeongsang Basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 48, no. 5, 365-381 (in Korean with English abstract).
- Miall, A.D., 1977, A review of the braided-river depositional environment. *Earth-Science Review*, 13, 1-62.
- Miall, A.D., 1985, Architectural-Element Analysis: A New Method of Facies Analysis Applied to Fluvial Deposits. *Earth-Science Review*, 22, 261-308.
- Miall, A.D., 1996, *The Geology of Fluvial Deposits*. Springer-Verlag, New York, 582 p.
- Miall, A.D., 2000, *Principles of sedimentary basin analysis*. Springer-Verlag, New York, 616 p.
- Nichols, G., 2009, *Sedimentology and stratigraphy*. John Wiley & Sons, 419 p.

- Paik, I.S., Lee, H.I., Kang, H.C., Kim, K., Jeong, E.-K., Kim, J. and Kim, H.J., 2011, Fossil woods from the early Miocene Singjeongri Formation, Ocheon, Pohang City: Occurrence, preservation, and taphonomy. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 47, no. 6, 613-633 (in Korean with English abstract).
- Posamentier, H.W. and Vail, P.R., 1988, Eustatic controls on clastic deposition II-sequence and systems tract models, in C.K. Wilgus, B.S. Hastings, C.G. St. C. Kendall, H.W. Posamentier, C.A. Ross, and J.C. Van Wagoner, eds., *Sea level change-an integrated approach: SEPM Special Publication*. 42, 125-154.
- Potter, P.E., Maynard, J.B. and Depetris, P.J., 2005, *Mud and mudstones: Introduction and overview*. Springer Science & Business Media.
- Roberts, E.M., 2007, Facies architecture and depositional environments of the Upper Cretaceous Kaiparowits Formation, southern Utah. *Sedimentary Geology*, 197, 207-233.
- Shanley, K.W. and McCabe, P.J., 1994, Perspectives on the sequence stratigraphy of continental strata. *AAPG bulletin*, 78(4), 544-568.
- Sissingh, W., 2001, Tectonostratigraphy of the West Alpine Foreland: Correlation of Tertiary sedimentary sequences, changes in eustatic sea-level and stress regimes. *Tectonophysics*, 333(3), 361-400.
- Sloan, R.J. and Williams, B.P.J., 2009, Volcano-tectonic control of offshore to tidal-flat regressive cycles from the Dunquin Group (Silurian) of southwest Ireland. *Sedimentation, Tectonics, and Eustasy (Special Publication 12 of the IAS)*, 105.
- 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.
- Sohn, Y.K., Rhee, C.W. and Shon, H., 2001, Revised stratigraphy and reinterpretation of the Miocene Pohang basinfill, SE Korea: Sequence development in response to tectonism and eustasy in a back-arc basin margin. *Sedimentary Geology*, 143, 265-285.
- Sohn, Y.K. and Son, M., 2004, Synrift stratigraphic geometry in a transfer zone coarse-grained delta complex, Miocene Pohang Basin, SE Korea. *Sedimentology*, 51, 1387-1408.
- Son, M., 1998, *Formation and Evolution of the Tertiary Miocene Basins in Southeastern Korea: Structural and Paleomagnetic Approaches*. Ph.D. thesis, Pusan National University (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., 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).
- Steel, R.J., 1988, Coarsening-upward and skewed fan bodies: Symptoms of strike-slip and transfer fault movement in sedimentary basins, Fan Deltas. *Sedimentology and Tectonic Settings*. 75-83.
- Talling, P.J., Masson, D.G., Sumner, E.J. and Malgesini, G., 2012, Subaqueous sediment density flows: Depositional processes and deposit types. *Sedimentology*, 59(7), 1937-2003.
- Todd, S.P., 1989, Stream-driven, high-density gravelly traction carpets: Possible deposits in the Trabeg Conglomerate Formation, SW Ireland and some theoretical considerations of their origin. *Sedimentology*, 36(4), 513-530.
- Tornqvist, T.E., 1993, Holocene alternation of meandering and anastomosing fluvial systems in the Rhine-Meuse delta (central Netherlands) controlled by sea-level rise and subsoil erodibility. *Journal of Sedimentary Research*, 63(4).
- Türkmen, İ., Aksoy, E. and Taşgin, C.K., 2007, Alluvial and lacustrine facies in an extensional basin: The Miocene of Malatya basin, eastern Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30, 181-198.
- Viseras, C. and Fernández, J., 1994, Channel migration patterns and related sequences in some alluvial fan systems. *Sedimentary Geology*, 88, 291-214.
- Wescott, W.A., 1993, Geomorphic thresholds and complex response of fluvial systems-some implications for sequence stratigraphy. *AAPG Bulletin*, 77(7), 1208-1218.
- Whiting, P.J., Dietrich, W.E., Leopold, L.B., Drake, T.G. and Shreve, R.L., 1988, Bedload sheets in heterogeneous sediment. *Geology*, 16(2), 105-108.
- Wright, V.O. and Marriott, S.B., 1993, The sequence stratigraphy of fluvial depositional systems: The role of floodplain sediment storage. *Sedimentary Geology*, 86, 203-210.
- Yoon, S., 1997, Miocene-Pleistocene volcanism and tectonics in southern Korea and their relationship to the opening of the Japan Sea. *Tectonophysics*, 281(1), 53-70.
- 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).

Received : January 6, 2017

Revised : March 3, 2017

Accepted : March 16, 2017