

장기분지 지하 데사이트질 화산쇄설암의 퇴적환경과 퇴적과정

김정환¹ · 정종욱² · 김용식³ · 구희찬⁴ · 손영관^{1,*}¹경상대학교 지질학과²경상대학교 공동실험실습관³한국지질자원연구원 국토지질연구본부⁴과학기술연합대학원대학교 석유자원공학

요 약

동해 확장과 관련하여 한반도 남동부에 형성된 전기 마이오세 장기분지는 에오세 왕산층을 기반암으로 하며 그 상부에 장기역암, 성동리층 그리고 뇌성산현무암질암으로 구성된다. 이산화탄소의 육상 저장부지를 찾기 위한 시추 결과, 성동리층 하부에 두께 100 m 이상의 데사이트질 화산쇄설암이 있는 것을 확인하였고, 이를 대상으로 총 15개의 퇴적상과 4개의 퇴적단위로 분류하였다. 최하부 퇴적단위 1은 각형의 암편과 아원형의 부석이 화산회 기질에 지지되어 있다. 두께가 최대 39.3 m인 이 퇴적단위는 전반적으로 과상이며 분급이 불량하다. 탄화된 식물 파편, 탈유체구조 및 일부 공에서 나타나는 연한 붉은색의 기질 등은 퇴적단위 1이 육상에서 화산회가 풍부한 화쇄류에 의해 쌓인 화쇄류암임을 지시한다. 퇴적단위 2는 역암, 사암 및 이암으로 구성된 쇄설성 퇴적암으로 하부의 침식경계, 역지 지 조직 및 상향세립화 경향 등을 근거로 하천퇴적물로 해석된다. 퇴적단위 3은 세립의 유리질 화산회가 결여된 특징을 보이며, 탄화목과 부가화산력 및 내부균열을 가진 결정 등을 근거로 육상에서 화산활동으로 형성된 화산쇄설성 밀도류가 수중으로 들어가 쌓인 것으로 해석된다. 이 경우, 밀도가 낮은 세립의 화산회는 물의 표면을 따라 이동하는 저농도의 밀도류를 형성하는 반면, 조립의 입자들로 구성된 밀도류(비점착성 쇄설류)는 물속에서 유변환을 일으키며 저탁류를 형성한 것으로 해석된다. 최상부 퇴적단위 4의 경우, 역시 유리질 화산회가 결여되어 있으며 결정과 부석의 함량이 높다. 대체로 과상이며 상부는 주로 엽층리 이암에 의해 덮여있어 수중에서 퇴적된 화산쇄설암으로 해석된다. 장기분지의 데사이트질 화산쇄설암의 퇴적작용과 퇴적환경 변화의 이해를 통해 화쇄류의 수중 진입에 따른 화산쇄설암의 암상 변화를 이해함은 물론 장기분지 충전물의 형성과정과 분지진화과정의 이해를 통해 최적의 이산화탄소의 저장층을 선정하는데 기여할 수 있을 것으로 생각한다.

주요어: 장기분지, 화산쇄설암, 화산쇄설성 밀도류, 퇴적환경, 유변환

Jeong-Hwan Gim, Jong-Ok Jeong, Yong Sik Gihm, Hui-Chan Gu and Young Kwan Sohn, 2016, Depositional environments and processes of the subsurface dacitic volcanoclastic deposits in the Miocene Janggi Basin, SE Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 52, no. 6, p. 775-798

ABSTRACT: The Early Miocene Janggi Basin in SE Korea, formed in association with backarc opening of the East Sea, is filled with the Janggi Conglomerate, the Seongdongri Formation and the Noeseongsan Basalt above the basement rocks of the Eocene Wangsan Formation. A succession of >100-m-thick dacitic volcanoclastic deposits, which is a potential cap rock for underground CO₂ storage in the basin, occurs in the lower part of the Seongdongri Formation at six borehole locations. The deposit can be divided into 15 facies and 4 depositional units. Unit 1 at the base is composed of angular lithic and subrounded pumice lapilli in an ash matrix. It is generally massive, very thick-bedded (up to 39.3 m), poorly sorted, and partly pinkish and contains carbonized wood fragments and fluid-escape pipes, suggesting emplacement by ash-rich pyroclastic flows in a subaerial setting. The overlying unit 2 is composed of epiclastic conglomerate, sandstone and mudstone, showing features of fluvial deposits, such as scoured bases, clast-supported texture, and fining-upward trends. Unit 3 is composed of fine ash-depleted lapilli tuff, containing abundant fractured crystals of plagioclase and quartz as well as accretionary lapilli and carbonized wood fragments. These features are interpreted to be due to quenching of crystals and winnowing of fines, which occurred during the entrance of a subaerially derived pyroclastic density current (PDC)

* Corresponding author: +82-55-772-1476, E-mail: yksohn@gnu.ac.kr

into a lake. The PDC is inferred to have been divided into a dilute and fine-grained PDC (ash cloud surge), which passed over water, and a dense, coarse-grained and cohesionless debris flow, which moved underwater via flow transformation. Unit 4 at the top also consists of fines-depleted, crystal-rich lapilli tuff, overlain by laminated mudstone, suggesting deposition of a PDC in a subaqueous setting. Understanding the depositional processes and changing depositional environments of the dacitic volcanoclastic deposits in the Janggi Basin can help understand the changes of lithofacies, which result from the entrance of PDCs into subaqueous environments, and the processes of basin-fill accumulation and basin evolution, thereby contributing to the selection of the most appropriate reservoir rocks for underground CO₂ storage in the basin.

Key words: Janggi Basin, volcanoclastic deposit, pyroclastic density current, sedimentary environment, flow transformation

(Jeong-Hwan Gim and Young Kwan Sohn, Dept. of Geology, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Republic of Korea; Jong-Ok Jeong, Center for Research Facilities, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Republic of Korea; Yong Sik Gihm, Geological Research Division, Korea Institute of Geosciences and Mineral resources, Daejeon 34132, Republic of Korea; Hui-Chan Gu, Dept. of Petroleum Resources Technology, University of Science and Technology, Daejeon 34132, Republic of Korea)

1. 서 론

폭발적인 화산활동으로 형성된 화산쇄설성 밀도류(pyroclastic density current)는 치명적인 화산재해를 일으키는 주요 원인일 뿐만 아니라 짧은 시간에 많은 양의 화산쇄설물을 주변지역에 공급하여 화산체 주변의 퇴적계에도 큰 변화를 일으킨다. 이러한 이유로 화산쇄설성 밀도류 및 그 산물인 화산쇄설암은 지난 수십 년간 많은 연구자의 관심을 받아왔다(Sparks, 1976; Fisher, 1979; Wright and Walker, 1981; Walker, 1985; Branney and Kokelaar, 2002; Jutzeler *et al.*, 2014b). 특히 화산쇄설암은 퇴적 당시의 고환경과 퇴적과정에 관하여 일반 퇴적암 연구를 통해 얻을 수 없는 정보를 제공하는 경우도 있어 화산쇄설성 밀도류 및 이에 수반된 퇴적작용(예: 라하)과 화산쇄설암의 독특한 특성을 이해하고자 하는 노력이 오래전부터 이루어지고 있다(Cas and Wright, 1987; Cole and Decelles, 1991; Branney and Kokelaar, 2002; Jeong *et al.*, 2008; Sohn *et al.*, 2013). 하지만 이러한 노력에도 불구하고 화산쇄설성 밀도류의 특성에 관해 여전히 상반된 의견이 존재하며[예: 고농도 정류모델(Spark, 1976; Wright and Walker, 1981) vs 저농도 난류모델(Fisher, 1966a; Branney and Kokelaar, 1997)], 호수나 바다에 쌓인 화산쇄설암에 관한 연구는 직접 관찰의 어려움과 위험성 등으로 그 수가 더욱 적다(Fisher, 1984; Cas and Wright, 1991; White, 2000; Freundt, 2003; Allen *et al.*, 2012; Jutzeler, 2014a). 덧붙여, 육상에서 형성된 화산쇄설

성 밀도류가 수중으로 들어가 쌓인 경우 밀도류의 이동기작에 관한 연구는 여전히 풀지 못한 과제로 남아있다.

한반도 남동부에 있는 장기분지는 후기 올리고세부터 중기 마이오세 기간에 동해확장과 관련하여 형성된 육성 퇴적분지로서, 쇄설성 퇴적암과 데사이트질 및 현무암질의 이원성 화산활동으로 형성된 화산쇄설암을 포함한다. 2005년 교토의정서 체결 이후 이산화탄소 감축을 목적으로 국내에서 이산화탄소의 육상 저장부지를 찾기 위한 시추가 장기분지 내에서 이루어졌다. 시추결과 장기분지 퇴적층은 에오세 왕산층을 기반암으로 하여 그 상부에 장기역암, 성동리층 그리고 뇌성산현무암질암으로 이루어져 있으며, 이 중 성동리층 하부에 약 100 m 이상의 두께를 가지는 데사이트질 화산쇄설암이 존재함을 확인하였다. 본 연구는 이 화산쇄설암을 대상으로 주상도 작성, 퇴적상 분석, 퇴적단위 분대 등을 통해 분지 전반을 덮고 있는 데사이트질 화산쇄설암의 퇴적 환경과 퇴적과정을 밝히고자 한다. 연구결과 성동리층 하부 데사이트질 화산쇄설암은 퇴적단위에 따라 육상과 수중이라는 각기 다른 환경에서 쌓인 것으로 해석되며, 그에 따른 뚜렷한 암상차이를 보여주고 있다. 그뿐만 아니라 육상분출한 화산쇄설성 밀도류가 수중으로 유입되어 밀도류의 이동기작 변화에 관해 흔치 않은 정보를 제공한다. 이러한 연구결과들은 좁은 지역에서 여러 시추공의 화산쇄설암 대비를 통한 수직, 수평적 퇴적상 변화를 파악하는데 도움을 줄 뿐만 아니라, 퇴적환경에 따른 화산쇄설암의

특징 파악 및 수중환경에서 밀도류의 이동에 관한 이해도를 높이는데 기여할 것으로 예상된다. 나아가 최적의 이산화탄소 저장소 선정에도 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

2. 지질개요

한반도 남동부에 위치한 신생대 마이오세 퇴적분지들은 지리적 위치와 퇴적물의 특징에 따라 북으로부터 포항, 장기, 와읍, 어일, 하서, 정자, 울산분지 등으로 구분될 수 있다(Kim, 1970; Lee *et al.*, 1992; Son and Kim, 1994; Son, 1998; Son *et al.*, 2000, 2005, 2007, 2013; Kim *et al.*, 2011)(그림 1). 이 중 장기, 와읍, 어일, 하서, 정자분지는 일본열도가 유라시아 대륙으로부터 분리되어 동해가 북북서-남남동 방향으로 확장함에 따라 우수향전단력이 작동하여 형성된 당겨열림(pull-apart) 퇴적분지들이다(Lallemant and Jolivet, 1986; Jolivet *et al.*, 1991, 1994; Son, 1998; Kim *et al.*, 2011; Son *et al.*, 2013). 이 분지들은 북북동 또는 북동 방향의 축을 가진 일련의 지구 혹은 반

지구의 구조를 형성하며 분지의 축과 같은 방향의 정단층군과 북북서 또는 북서 방향의 우수향 주향이 동단층군으로 구획된다. 정단층군은 분지의 북서부와 남동부 경계를 이루며 이 중 북서부 경계단층은 남동쪽으로 경사져 있어 점완/서가형(listric/dominic)의 단층 구조를 보이지만, 남동부 경계단층은 북서부 경계단층의 반향단층(antithetic fault)으로 활동하였다. 따라서 이곳 기반암과 분지충전물의 지층은 단층 인접부 일부를 제외하고는 일관되게 북서 방향으로 경사져 있어 분지가 확장하는 동안 분지 바닥이 경동된 양상을 보인다(Son and Kim, 1994; Son *et al.*, 2000, 2013).

장기분지는 북서쪽으로는 오천단층을 경계로 포항분지와 인접해 있고 남쪽으로는 와읍, 어일분지와 기반암으로 분리되어 있다. 분지 충전물은 육성 쇄설성 퇴적암과 데사이트질 및 현무암질 화산쇄설암으로 이루어져 있으며, 식물화석과 화산암의 K-Ar 전암분석을 통해 전기 마이오세 기간에 퇴적된 것으로 알려져 있다(Kim *et al.*, 1975, 1986; Jin *et al.*, 1988; Lee *et al.*, 1992; Yoon, 1992). 기존 연구에 따

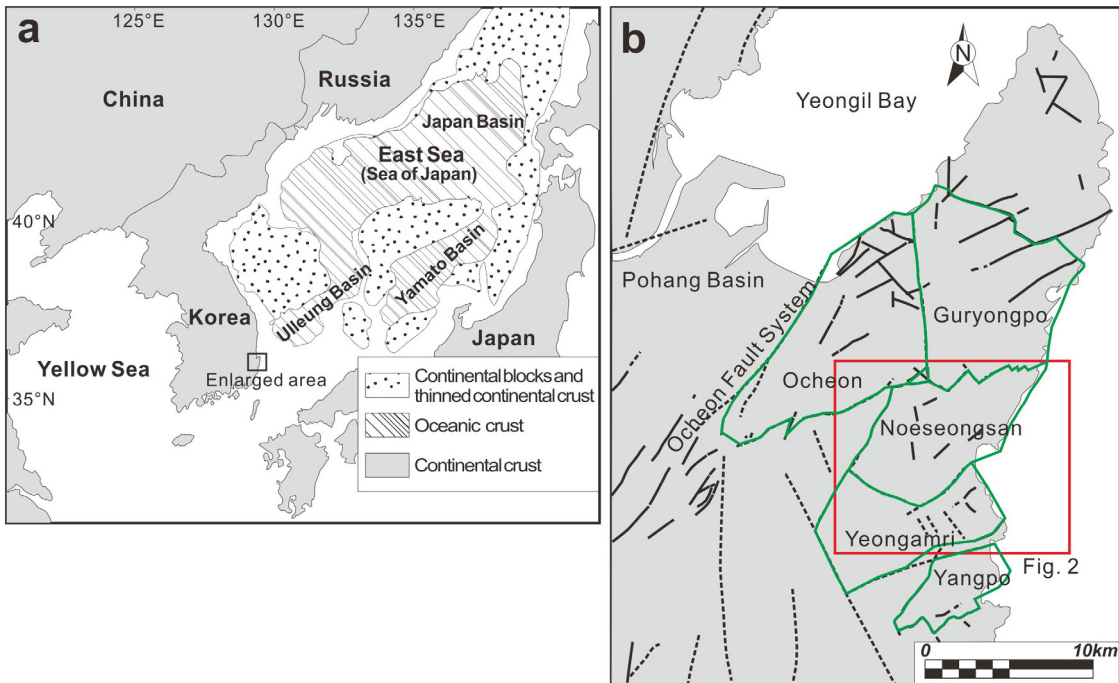


Fig. 1. Regional geological maps around the study area. (a) Simplified geologic map of the East Sea (after Jolivet *et al.*, 1991). (b) Simplified geological map of the Early Miocene Janggi Basin with five structural domains based on stratal attitudes and relative chronology of the basin fills (after Kim *et al.*, 2015).

르면 장기분지는 데사이트질 화산암류(Yoon, 1997; Sohn *et al.*, 2013)로 구성된 예오세 왕산층을 기반으로 하여 그 상부에 쇠설성 퇴적암으로 이루어진 장기역암, 데사이트질 응회암 및 응회질 퇴적암으로 구성된 성동리층, 그리고 분출상의 용암 또는 응회질 각력암과 관입상의 암맥 등을 모두 포함하는 뇌성산현 무암질암의 순서로 이루어져 있다(Kim *et al.*, 2011) (그림 2, 3). 이 중 성동리층 내 데사이트질 응회암은 야외에서 최소 4매 이상 출현하며 하/호성 기원의 퇴적암과 교호한다.

Kim *et al.* (2015)는 최근 분지 내부를 충전물의 상대연령과 지층의 자세를 근거로 북으로부터 구룡포, 오천, 뇌성산, 영암리 지괴 및 양포소분지로 구분하였다(그림 1b). 이 중 이산화탄소 지중저장을 목적으로 뇌성산 지괴 내에서 현재까지 총 6공의 시추가

이루어졌고, 각 공들 사이의 거리는 최대 1.5 km 이내이며 시추는 지하 1.1 km까지 이루어졌다(그림 3, 4).

Bahk and Chough (1996)는 분지의 남동부 영암리 지괴에서 관찰되는 충전물을 대상으로 한 퇴적학적 연구를 통해 화산활동이 활발했던 시기(syn-eruption period)와 휴지기(inter-eruption period)가 반복하며 분지를 충전한 것으로 해석하였다. 특히 화산쇄설암과 교호하는 쇠설성 퇴적암은 주로 하천활동으로 쌓인 것으로 해석하였다. 한편 양포소분지에서 관찰되는 충전물을 대상으로 연구한 Sohn *et al.* (2013)에 따르면 활발한 화산활동으로 형성된 퇴적물의 광역적인 침식 흔적 및 고토양이 없는 점을 근거로, 빠른 분지 침강과 관련된 화산활동과 쇠설성 퇴적암의 높은 공급량에 따라 화산쇄설암과 쇠설성 퇴적암이 교호하는 것으로 해석하였다.

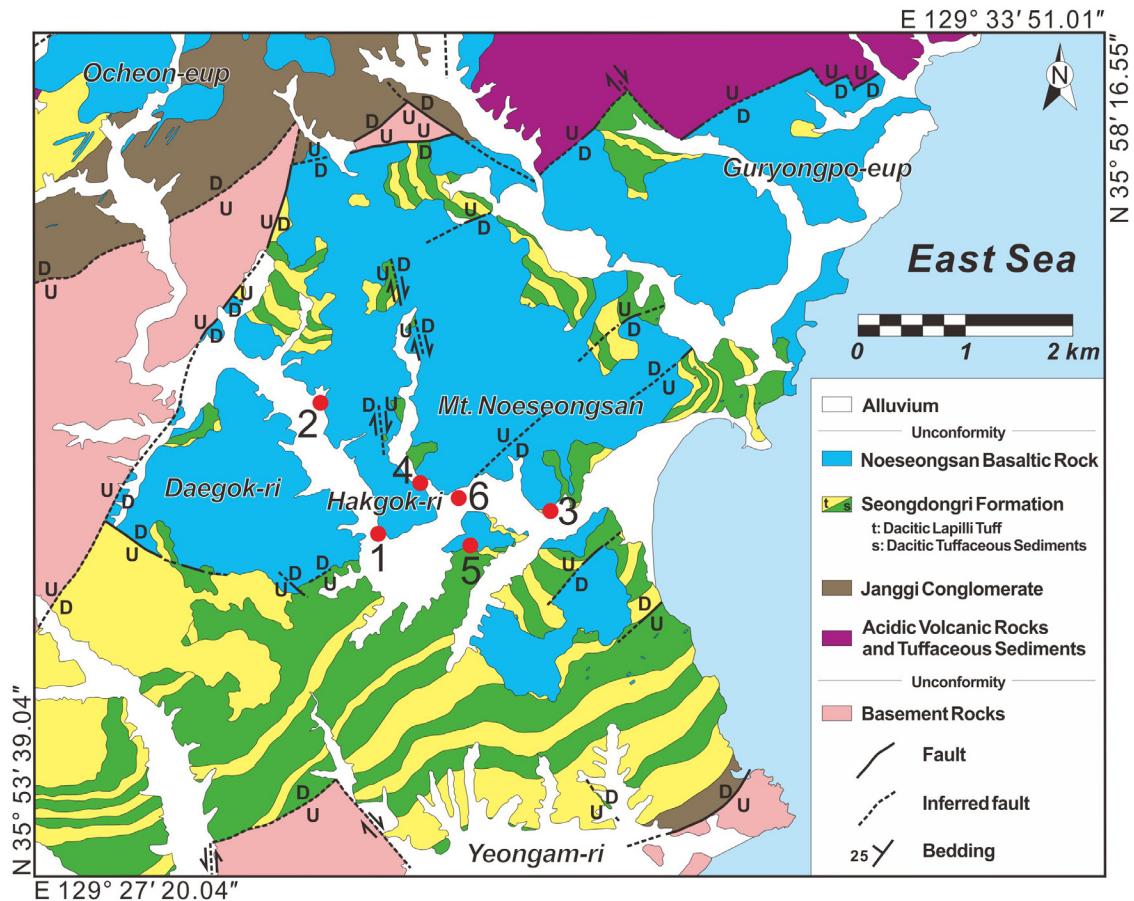


Fig. 2. Detailed geological map of the study area and six borehole locations (red dots) within the Noeseongsan Block (after Kim *et al.*, 2015).

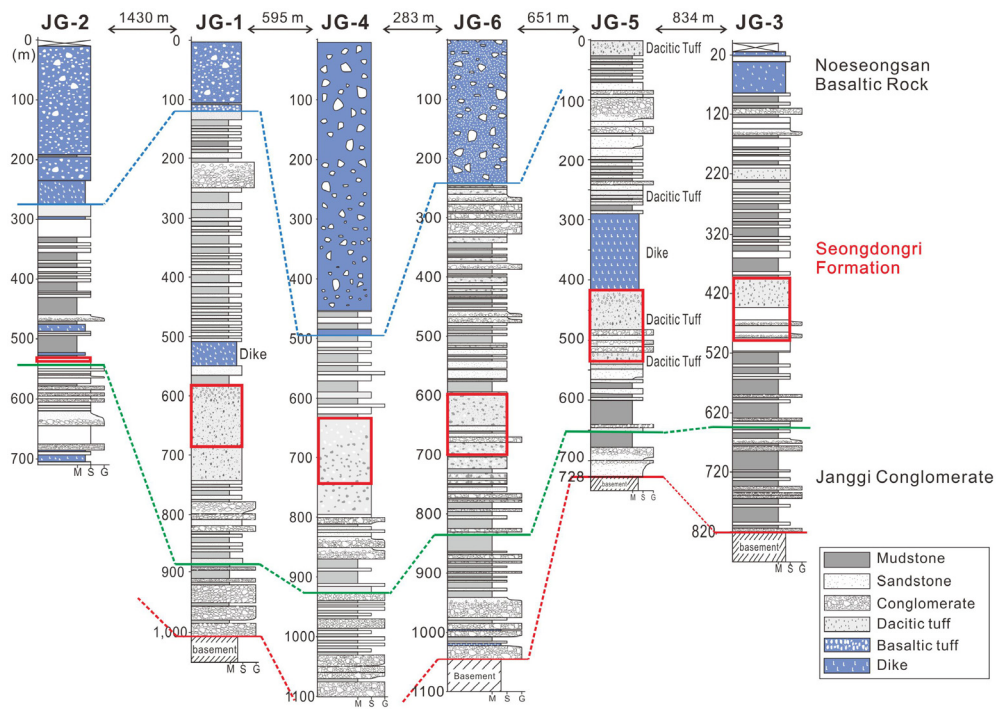


Fig. 3. Graphic logs of six cores from the Janggi Basin. The red boxes indicate the studied intervals of the cores, of which detailed columns are given in Figure 4 (after Gu *et al.*, 2016).

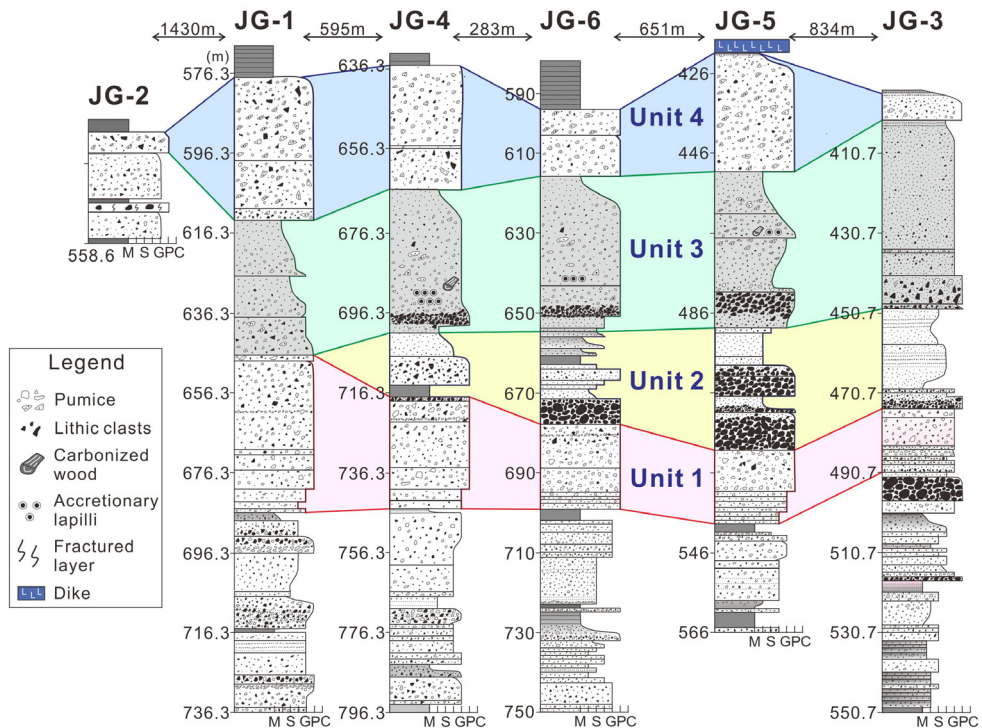


Fig. 4. Graphic columns and correlation of depositional units in the lower part of the Seongdongri Formation.

3. 용어정의

본 연구에서 사용한 용어는 주로 Fisher (1961, 1966b)와 White and Houghton (2006)의 정의를 따랐다. 표성쇄설층(epiclastic deposit)은 입자생성과 운반 방식에 있어 화산활동과 직접적인 관련이 없으며 기존 암석이 풍화, 침식 및 퇴적과정을 거쳐 쌓인 일반 퇴적암을 말한다. 이 논문에서는 주로 주변 기반암 기원의 역들로 구성된 퇴적암을 지칭한다(Sohn *et al.*, 2013). 화산쇄설층(volcaniclastic deposit)은 화산활동과 직접 관련이 있으며 쇄설성 퇴적암을 일부 포함할 수 있다. 즉 White and Houghton (2006)의 주장에 따라 화산활동으로 인한 입자의 생성방식보다 퇴적과정을 더 중요시하였다. 화산활동으로 직접 파쇄, 운반 및 퇴적된 경우를 일차퇴적층(primary deposit)으로, 화산활동으로 파쇄되었으나 고화되기 전 재운반과정을 거쳐 재퇴적된 경우를 이차퇴적층(secondary deposit)으로 분류하였다. 쇄설성 퇴적암과 화산쇄설암은 입자생성 및 운반방식에 따라 구분될 수 있다. 또한, 일차퇴적층과 이차퇴적층은 층의 두께, 사층리나 연흔과 같은 퇴적구조, 입도와 분급 및 화산쇄설물의 함량 등으로 구분될 수 있다.

4. 퇴적상분석

시추 코어에서 관찰되는 성동리층 하부 충전물을 입도, 퇴적구조 및 구성물질에 따라 총 15개의 퇴적상으로 분류하였다(표 1). 이는 10개의 화산쇄설암과 5개의 쇄설성 퇴적암으로 구분된다. 동일한 입도와 퇴적구조를 가진 화산쇄설암의 경우 화산회, 결정, 암편 및 부석을 기준으로 코어에서의 상대적인 함량 차이에 따라 이들이 풍부한 괴상 화산력 응회암 및 화산회가 결여된 괴상 화산력 응회암으로 분류하였고 그 외 층상 화산력 응회암과 역지 역점 이-정점이 화산력 응회암으로 분류하였다. 화산쇄설암 내 암편은 대개 각형~아각형이며 산성에서 중성의 조성을 지닌 초생(juvenile) 혹은 기반암에서 유래한 이질(accidental) 암편으로 이루어져 있다(Kim *et al.*, 2011; Sohn *et al.*, 2013). 유리질 화산회의 경우 대부분 불석화작용(zeolitization)을 받아 모데나이트(modenite), 클리놉틸로라이트(clinoptilolite), 아날심(analcime) 등으로 변질되어 있고, 녹니석(chlorite)

이나 스�멕타이트(smectite)와 같은 점토광물들이 공극을 채우고 있다(Noh and Hong, 2010; Sohn *et al.*, 2013).

4.1 육상 화산쇄설암

4.1.1 기술

육상 화산쇄설암은 화산회가 풍부한 괴상(화산력) 응회암(aLTm, Tm), 층상(화산력) 응회암(LTs, Ts) 및 분급이 양호한 괴상 혹은 희미한 층리를 보이는 응회암(wTm1-3)으로 구성된다. 대부분 각형의 암편과 아각형(subangular)~아원형(subrounded)의 부석이 화산회 기질에 지지되어 있다. 부석은 수 mm에서 최대 3 cm까지, 암편은 대개 1~2 cm의 크기를 가지며 분급은 불량하다.

aLTm은 수~수십 m의 두께를 가지며 2호 공을 제외한 나머지 시추공에서 가장 흔하게 관찰된다(그림 5, 6). 각형의 암편과 아각형~아원형의 부석이 화산회 기질에 지지되어 있다. 탈 유체구조(1, 5호 공) 및 탄화된 식물 파편이 관찰되며(6호 공), 기질이 연한 붉은 색(3, 4호 공)을 띠고 상부로 갈수록 암편의 크기 및 함량이 증가하는 상향조립화 경향이 관찰된다(1, 6호 공; 그림 5, 7a~d). 암편의 상향조립화 경향을 정량화하기 위해 1호 공을 대상으로 모드 분석을 실시하였다(그림 5). 총 다섯 구간(676.8 m, 671.0 m, 666.2 m, 658.8 m, 652.2 m)에서 시료를 채취하여 가로 4.7 cm, 세로 5.0-8.0 cm의 범위를 가지는 슬랩(slab)을 제작하였다. 모드 분석에는 이미지 제이(image J) 프로그램을 이용하여 암편과 부석의 면적(%)을 측정하였고 구성물질은 암편, 부석 및 기질로 나누었으며 결정의 경우 기질에 포함하였다. 기질은 2 mm 이하의 입자들을 가리키나 더욱 세밀한 분석을 위해 이미지 확대 시 육안으로 입자구별이 가능한 500 μm를 기준으로 이 이하의 입자들을 기질로 취급하였다. 모드 분석결과, 676.8 m에서 666.2 m 구간까지는 부석과 암편의 함량변화가 미미하였으나 658.8 m 구간에서 암편의 함량이 5.4%에서 20.18%로 증가하였다. 그 후 652.2 m 구간에서 암편의 함량이 9.58%로 감소하는 대신 부석의 함량이 25.6%에서 38.66%로 증가하였다.

LTs는 수~수십 cm의 두께를 가지며 각형의 세립질~극조립질 화산회(fine~very coarse ash) 크기의 암편과 아원형의 중립질 화산력(medium lapilli) 크

Table 1. Summary of lithofacies characteristics.

Lithofacies	Description	Interpretation
Volcaniclastic facies		
Facies aLTm; Fine ash-rich massive lapilli tuff	Very thick- to extremely thick-bedded; composed mainly of angular lithic and subrounded pumice lapilli in an ash matrix; poorly sorted; lithic lapilli show coarsening upward; interbedded with vitric fine tuff (facies wTm2) with transitional contact; fluid escape structures and carbonized wood fragments present at the base; pinkish matrix in JG-3 and 4	Voluminous ash-rich PDC generated by subaerial eruption
Facies cLTm; Crystal-rich massive lapilli tuff	Very thick to extremely thick-bedded; composed of angular lithic and amoeboid pumice lapilli; contains abundant crystals compared with facies aLTm; some are normally graded and pass into facies wTm3; sharp lower contact with facies wTm3; includes rip up clasts	Subaqueous crystal-rich PDC
Facies lLTm; Lithic-rich massive lapilli tuff	Extremely thick-bedded; composed of lithic ash and lapilli; moderately to well-sorted; sharp lower contact with facies adLTm; only occurs in JG-3	Subaqueous PDC which underwent density segregation
Facies pLTm; Pumice-rich massive lapilli tuff	Thick to very thick-bedded; composed of medium to coarse, amoeboid pumice lapilli in a muddy matrix	Pumice-raft deposits in a subaqueous setting
Facies adLTm; Fine ash-depleted massive lapilli tuff	Very thick to extremely thick-bedded; composed of angular fine to medium lithic and amoeboid medium pumice lapilli in a vitric fine ash-depleted matrix; poorly sorted; usually shows gradual lower contact with facies csLT(i-n) or wTm; some include accretionary lapilli and carbonized woods (JG-4, 5, 6)	Subaqueous PDC generated by subaerial eruption
Facies LTs; Stratified lapilli tuff	Thin to medium-bedded; composed of angular fine to coarse lithic ash and subrounded medium pumice lapilli; shows gradual lower contact with facies aLTm	Subaerial PDC during waning eruption
Facies csLT(i-n); Clast-supported inverse to normally graded lapilli tuff	Very thick-bedded; composed of angular to subrounded, medium to coarse lithic lapilli in a pumiceous matrix; poorly sorted; irregular lower contact with facies wTm or adLTm due to erosion and loading; occurs in JG-4, 5 and 6	Subaqueous PDC generated by subaerial eruption
Facies Tm; Massive tuff	Thick to very thick-bedded; composed of angular lithic and subrounded pumice lapilli in an ash matrix; interbedded with facies Ts or wTm in the lower part of Unit 1	Subaerial PDC generated by precursory small-volume eruption
Facies Ts; Stratified tuff	Thin-bedded; has similar characteristics to facies LTs except grain size	Subaerial PDC during waning eruption
Facies wTm; Well-sorted massive or crudely stratified tuff	Thin to very thick-bedded; occurs at the base of Unit 1 in association with facies Tm or aLTm (wTm1), interbedded with facies aLTm (wTm2), at the top of Unit 1, 3 and 4 in association with facies aLTm, lLTm, adLTm and csLT(i-n) (wTm3). at the base of Unit 3 in association with facies adLTm and csLT(i-n) (wTm4); contacts are gradational; vitric fine ash rich in wTm1, 2 and 3; mostly massive but crudely stratified in wTm3; wTm4 shows fine ash-depleted texture similar to facies adLTm	Subaerial PDC generated by small-scale precursory eruption (wTm1) or with flow pulsation (wTm2); co-ignimbrite ash fall (wTm3); turbidity current generated by flow transformation (wTm4)
Epilastic facies		
Facies Gm; Massive conglomerate	Thick to very thick-bedded; composed of subangular to rounded pebble-cobble conglomerates; commonly clast-supported and poorly sorted; weak imbrication in some layers, sharp erosional lower contact with facies aLTm; fining upward into facies Mm; interbedded with facies aLTm at the base of Unit 2 (JG-4, 5); includes crudely stratified sandstone (facies Sm, JG-6)	Hyperconcentrated flood flow in a fluvial setting
Facies Sm; Massive sandstone	Thick to very thick-bedded; occurs in association with facies Gm or Mm with gradual lower contact; well-sorted; locally includes coals (JG-5) and rip-up mudstones (JG-6)	Hyperconcentrated flood flow during waning phase or turbidity current
Facies Ss; Stratified sandstone	Thick to very thick-bedded; alternations of dark-colored very fine sand and gray medium sand; interbedded with facies Sm or Gm with gradual lower contact; moderately to well-sorted; some include ripple cross-lamination (JG-4, 5)	
Facies Mm; Massive mudstone	Thin to very thick-bedded; gray to dark in color; interbedded with facies Sm, Ss or in association with facies cLTm (Unit 4) with gradual lower contact	Suspension settling in a swamp or lake
Facies Ml; Laminated mudstone	Thin to very thick-bedded; dark-colored; occurs in association with facies cLTm (Unit 4) with sharp lower contact; partly interbedded with facies Mm and Sm	

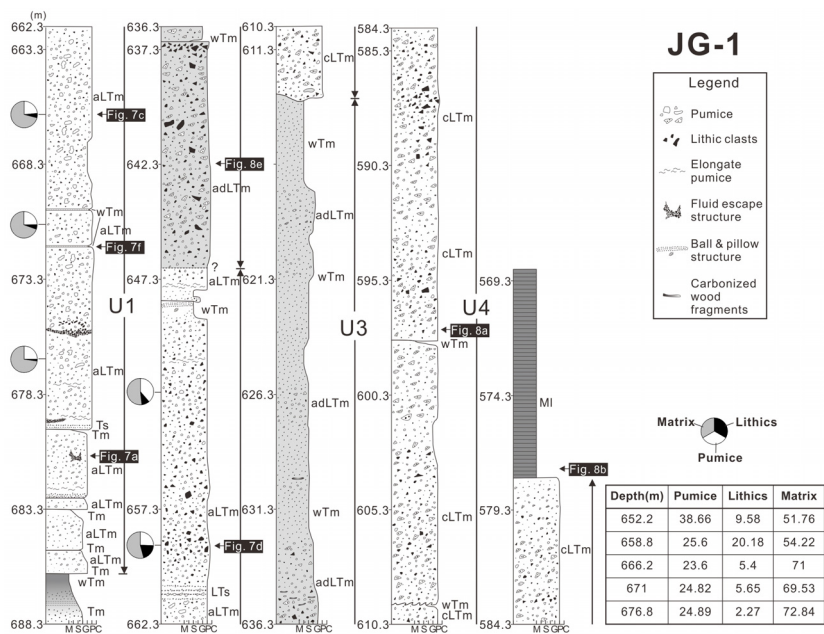


Fig. 5. Detailed graphic log of dacitic volcanoclastic deposits from JG-1 well in the lower part of the Seongdongri Formation. Pie diagrams give proportions of different clast types from image analysis using core slabs: white for pumice, black for lithic and gray for matrix (< 500um) including crystal fragments. Note the rapid increase of the proportions of lithic at 658.5 m indicating an increase of eruption intensity.

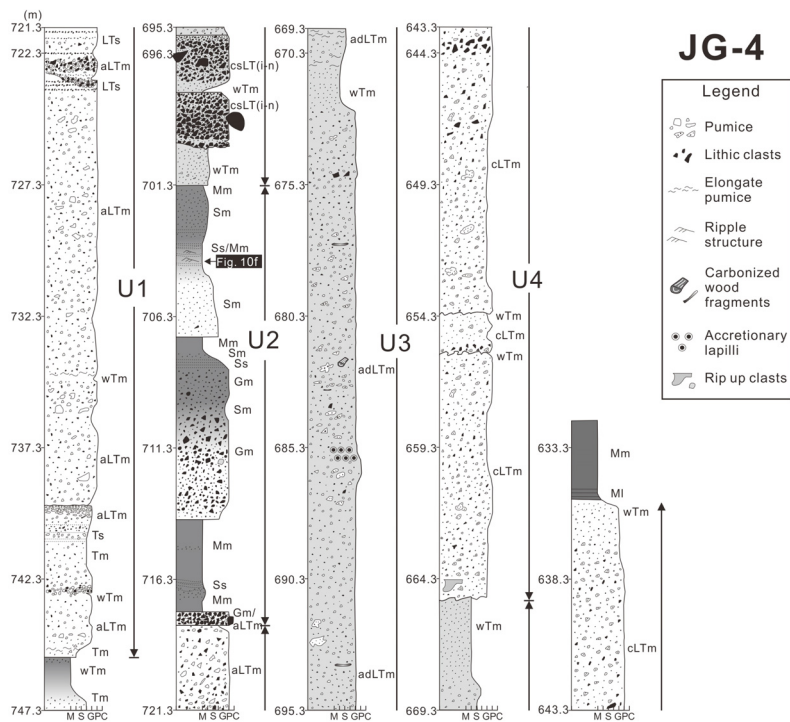


Fig. 6. Detailed graphic log of dacitic volcanoclastic deposits from JG-4 well in the lower part of the Seongdongri Formation.

기의 부식으로 구성된다. 주로 aLTm과 점이적인 상하부 경계를 보인다.

wTm은 Tm과 aLTm의 하부에 존재하는 경우(wTm1; 그림 7e), aLTm과 교호하는 경우(wTm2; 그림 7f) 및 aLTm의 상부에 존재하는 경우(wTm3)로 나뉜다. Tm과 유사하나 분급이 양호하며, 대체로 압편과 부석의 함량이 적고 세립의 유리질 화산회가 대부분을 차지한다는 차이점이 있다. 주로 aLTm과 점이적인 상하부 경계를 보인다.

4.1.2 해석

세립(< 3cm)의 압편과 부석이 화산회 기질에 지지되어 있으며 층의 두께가 수십 m에 이르고, 대부분 괴상이며 일부 공에서 기질이 연한 붉은 색을 띠

는 점을 고려하면, 이 암상들은 육상에서 폭발적인 화산분출로 형성된 화산회가 풍부한 화쇄류에 의해 퇴적된 것으로 해석된다(Fisher, 1984; Cas and Wright, 1991; Jutzeler *et al.*, 2014a). 전반적으로 괴상을 나타내는 것은 고농도 화쇄류에 의한 빠른 퇴적의 결과로 해석되며(Branney and Kokelaar, 2002), 탄화된 식물 파편과 탈 유체구조는 이 화쇄류가 뜨거운 상태에서 정치(emplacement)되었음을 지시한다(Cas and Wright, 1987; Cas and Wright, 1991). 압편의 상향조립화는 폭발강도의 증가에 따라 주변 기반암에서 더 많은 압편들이 파쇄 및 공급된 것으로 해석되며, 최상부 압편의 함량이 감소하고 부석의 함량이 증가하는 것은 일정 시간이 지난 후, 화쇄류의 세기가 감소함에 따라 부석의 밀도에 따른 선택적 걸러짐

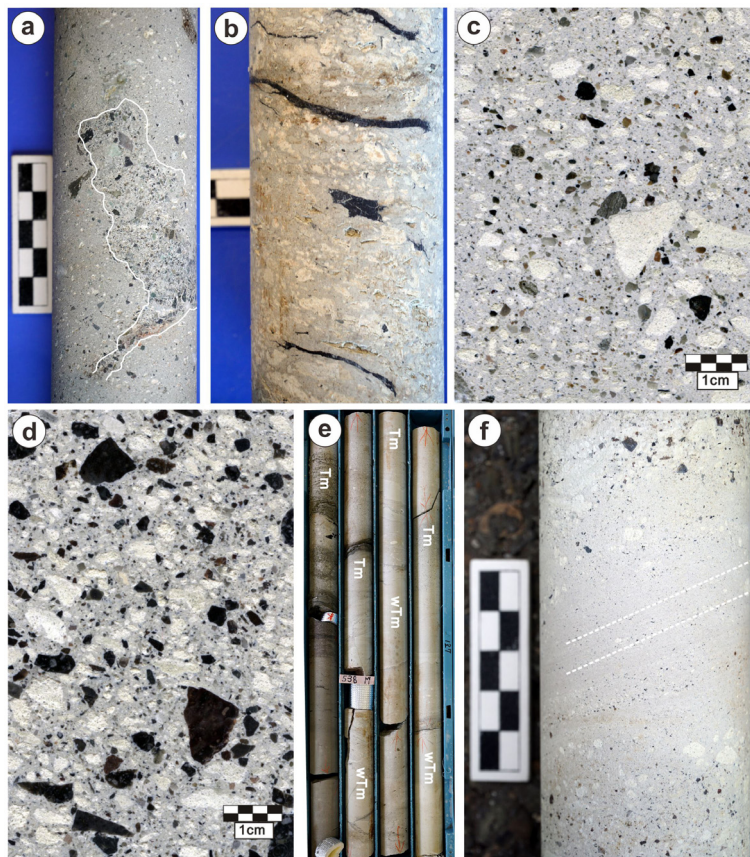


Fig. 7. Core photographs of Unit 1. (a) Fluid escape structure in JG-1 well. (b) Carbonized wood fragments in the fine ash-rich massive lapilli tuff (facies aLTm) in JG-6 well. (c, d) Slab photographs of facies aLTm at 666.2 m and 658.8 m depth of JG-1 well. (e) Base of Unit 1 in JG-5 well composed of massive tuff (facies Tm) and well-sorted, massive or crudely stratified tuff (facies wTm). (f) Facies wTm2, showing vitric fine ash-rich texture, interbedded with facies aLTm in JG-1 well.

(selective filtering) 효과가 감소하여 부석들이 퇴적될 수 있었던 것으로 해석된다(Branney and Kokelaar, 2002).

층상 화산력 응회암(LTs)의 경우, 화산회가 풍부한 괴상 화산력 응회암(aLTm)과 점이적인 상하부 경계를 가지며 퇴적중단의 흔적을 찾을 수 없다는 점에서 화쇄류가 상대적으로 저농도일 때, 그에 따른 낙하 혹은 견인퇴적층을 형성한 것으로 해석된다(Branney and Kokelaar, 2002).

분급이 양호한 괴상 혹은 희미한 층리를 보이는 응회암(wTm1)은 aLTm과 점이적인 경계를 가지며 하부에 나타나는 점을 근거로 aLTm을 퇴적시킨 화산활동이 본격적으로 일어나기 전 소규모 화산활동에 따른 저농도 밀도류(dilute PDC)에 의한 퇴적으로 해석된다. wTm2는 aLTm과 점이적인 경계를 가지며 교호하는 점을 근거로 화산분출에 의한 초기 화쇄류와 뒤따르는 화쇄류 사이의 간격(interval or pulse)을 지시하는 것으로 해석된다(Loughlin *et al.*, 2002). wTm3는 aLTm의 상부에 존재하는 점을 근거로 화쇄류가 지표표를 따라 이동하면서 세립의 입자들이 위로 빠져나가거나(elutriation) 분연주로부터 낙하된 퇴적층(co-ignimbrite ash fall deposits)으로 해석된다(Fisher, 1984).

4.2 수중 화산쇄설암

4.2.1 기술

수중 화산쇄설암은 결정, 암편 혹은 부석이 풍부한 괴상 화산력 응회암(cLTm, ILTm or pLTm), 화산회가 결여된 괴상 화산력 응회암(adLTm), 역지점 역점-정점이 화산력 응회암(csLT(i-n)) 및 분급이 양호한 괴상 혹은 희미한 층리를 보이는 응회암(wTm3, 4)으로 구성된다.

cLTm은 수~수십 m의 두께로 중립질 화산력(medium lapilli) 크기를 가진 각형의 암편과 아메바 형태의 부석 및 결정으로 이루어져 있다(그림 8a). 부석 내부에 결정의 함량이 높아 흑운모, 각섬석 및 장석과 같은 결정들이 육안으로 관찰되며, 화산회가 풍부한 괴상 화산력 응회암(aLTm)에 비해 상대적으로 세립의 유리질 화산회(vitric fine ash)가 결여된 특징을 보인다. 또한 암편에 비해 부석과 결정의 함량이 상대적으로 높다. 하부 wTm과 뚜렷한 경계를 가지며 내부 뜯어올림역(rip-up clast)을

포함한다. 암맥(dike)으로 덮인 5호 공을 제외하고 최소 10 cm (3호 공)~최대 16.3 m (6호 공) 두께의 괴상(Mm) 혹은 엽층리 이암(MI)에 의해 뚜렷한 상부경계를 보이며 덮인다(그림 8b).

ILTm은 약 23 m의 두께를 가지며 3호 공에서만 관찰된다. 세립~중립질 화산력(fine~medium lapilli) 크기를 가진 각형의 암편이 대부분을 차지하고 기질에 소량의 부석 및 결정으로 이루어져 있다(그림 8c). 하부 adLTm과는 뚜렷한 경계를 보이며 분급은 중간~양호하다.

pLTm은 약 2 m의 두께로 중립질 화산력(medium lapilli) 크기의 부석으로 구성된 경우와 약 50 cm의 두께로 조립질 화산력(coarse lapilli) 크기의 부석이 화산회 및 이암기질에 존재하는 경우로 나뉜다(그림 8d). 이때 부석은 모양이 불규칙한 아메바 형태를 띠며 내부에 다량의 결정들을 포함한다. 이 암상은 cLTm의 상부에 점이적이거나 뚜렷한 경계를 보이며 유일하게 5호 공에서만 관찰된다.

adLTm은 수~수십 m의 두께로 대부분 하부 csLT(i-n)과 점이적인 경계를 보이며 aLTm에 비해 상대적으로 기질에 세립의 유리질 화산회가 결여된 특징을 보인다(그림 8e). 세립~중립질 화산력 크기(fine~medium lapilli)를 가진 각형의 암편과 아메바 형태의 부석 및 결정으로 구성되며 cLTm과는 결정과 부석의 함량으로, csLT(i-n)과는 암편의 함량차이 및 퇴적구조로 구분된다. 내부에 탄화목과 부가화산력이 관찰된다(4, 5, 6호 공; 그림 6, 8f, 8g).

csLT(i-n)은 수 m의 두께로 대부분 기반암 기원의 아원형-각형의 중립질 화산력(medium lapilli) 크기를 가진 암편으로 구성되어 있으나 일부는 아원형의 조립질 화산력(coarse lapilli) 크기를 가진다(그림 8h). 기질은 소량의 부석 및 결정으로 이루어져 있다. 하부 wTm과 침식 혹은 하중(loading)에 의한 불규칙한 경계(irregular contact)를 보이며 상부 adLTm과는 점이적인 경계를 보인다. 하부에 뜯어올림역을 포함하며 역들의 배열성은 관찰되지 않는다.

wTm은 cLTm, ILTm 및 adLTm의 상부에 존재하는 경우(wTm3)와 adLTm과 csLT(i-n)의 하부에 존재하는 경우(wTm4)로 나뉜다. wTm3의 경우 수 m의 두께로 대부분 화산회로 이루어져 있고, wTm4의 경우 adLTm과 유사한 기질(세립의 유리질 화산

회가 결여되어 있으며 소량의 부석, 암편 및 흑운모와 각섬석 등의 결정으로 구성)을 가진다. 두 경우 모두 상하부 암상들과 점이적인 경계를 보인다.

lLTm과 adLTm의 박편관찰에서는 각각 내부균열을 가진 석영과 퍼즐구조(jigsaw-fit texture)의 사장석이 관찰된다(그림 9a, 9b).

4.2.2 해석

중립질 화산력크기의 부석과 암편으로 구성되어 있으며 층의 두께가 수~수십 m에 이르고, 대부분 괴상이며 분급이 불량한 특징들을 근거로 대부분 화산

쇄설성 밀도류에 의해 퇴적된 것으로 해석된다. 또한 수~수십 m의 두께를 가진 암상들(cLTm, adLTm)의 기질 전반에 세립의 유리질 화산회가 결여된 특징은 단순히 육상에서 밀도류의 이동과정에 따른 제거라기보다는 화산회가 제거될 수밖에 없었던 퇴적환경과 관련이 깊다고 판단된다. 즉 밀도가 낮은 화산회와 부석이 물에 뜨고 밀도가 큰 암편은 물속으로 가라앉는 식의 밀도에 따른 분급작용의 결과로 해석된다(Freundt, 2003; Allen *et al.*, 2012). 또한 내부균열의 석영, 퍼즐구조의 사장석 및 아메바 형태의 부석은 밀도류와 주변 물의 온도 차에 의한 급격

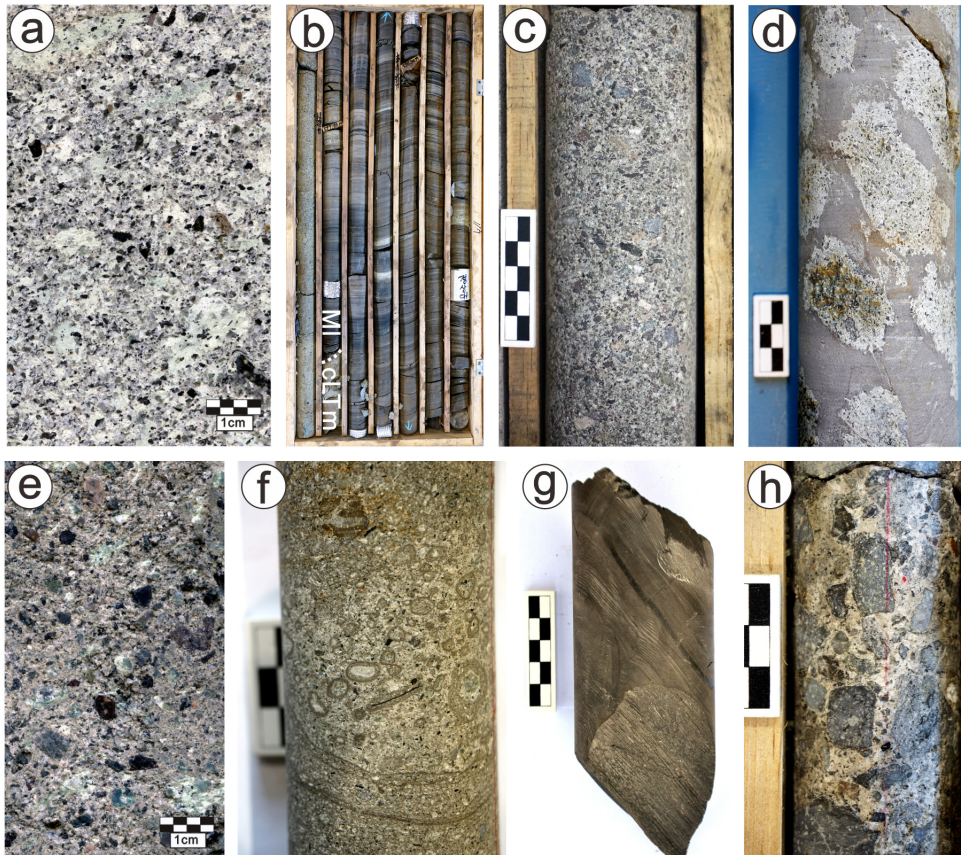


Fig. 8. Core photographs of Unit 3 and 4. (a) Slab photograph of crystal-rich massive lapilli tuff (facies cLTm, JG-1 well). Note that the matrix consists of tightly packed crystals and pumice lapilli. (b) Laminated mudstone (facies MI) above facies cLTm with sharp lower contact (dashed line, JG-1 well). (c) Lithic-rich massive lapilli tuff (facies lLTm) in JG-3 well. Note that this facies consists mainly of lithic ash and lapilli. (d) Pumice-rich massive lapilli tuff (facies pLTm, JG-5 well) in the top of Unit 4. Note amoeboid, medium to coarse pumice lapilli in a muddy matrix. (e) Slab photograph of fine ash-depleted massive lapilli tuff (facies adLTm, JG-1 well). (f) Accretionary lapilli and (g) Carbonized wood in facies adLTm (JG-6 and 5 well respectively). (h) Clast-supported inverse to normally graded lapilli tuff (facies csLT(i-n), JG-6 well) composed mainly of angular medium lithic lapilli in a pumiceous matrix.

한 냉각의 결과로 해석된다(Fiske and Matsuda, 1964; Fisher, 1984; Cole and Decelles, 1991).

cLTm의 경우, 수중에서 결정이 풍부한 고농도 화산 쇄설성 밀도류(subaqueous crystal-rich pyroclastic density currents)에 의한 퇴적으로 해석된다. 뚜렷한 하부 침식경계와 뜰어올림역의 존재는 밀도류의 앞부분(head)이 난류성 흐름이었음을 지시한다.

ILTm에서 관찰되는 암편이 우세하며 화산물질의 함량이 낮고, 분급이 비교적 양호한 특징은 수중에서 밀도류의 이동 거리에 따른 분급의 결과로 해석된다. 따라서 3호 공은 비교적 분화구에서 먼 위치였다고 추정된다.

pLTm의 경우, 이암 및 화산회를 기질로 하며 cLTm의 상부에 존재하는 점을 근거로 화산분출 후 수면 위에서 부유하던 부석들이 일정 시간이 지난 후 낙하하여 쌓인 부석-부유 퇴적층(pumice-raft deposits)으로 해석된다(White *et al.*, 2001; Jutzeler *et al.*, 2014b). 일반적으로 뜨거운 상태의 부석은 물에 빨리 포화되어 가라앉으나 부석의 크기, 내부 기공의 분포 및 연결성 등의 이유로 일정 기간 수면 위에 부유할 수 있었던 것으로 해석된다(White *et al.*, 2001). 이 암상이 유일하게 5호 공에서만 관찰되는 점은 장기분지가 바다의 영향을 받지 않은 육상분지인 점을 고려해 바람에 의해 5호 공 주위에 집중/퇴적된 것으로 추정된다(Fiske *et al.*, 1998).

adLTm에서 관찰되는 탄화목 및 부가화산력은 이 암상과 관련된 밀도류가 육상에서 형성된 후 수중으로 들어가 퇴적되었음을 지시한다(Cas and Wright, 1991). 부가화산력의 경우, 이를 형성하기 위한 수분의 공

급이 일반적인 육상 환경에 비해 호수 주변에서 훨씬 용이하며, 세립의 입자들이 공기 중으로 부유하는 동시에 물의 표면에서 발생하는 증기폭발로 인한 난류의 증가 및 대기와의 빠른 열교환이 부가화산력의 형성에 더욱 좋은 환경을 만들었을 것으로 추정된다. 이런 식으로 대부분의 부가화산력은 물속으로 들어가는 밀도류 주위에서 형성되었으며, 중력에 의해 밀도류 내부로 들어가 물속에서 퇴적될 수 있었던 것으로 추정된다(Carey *et al.*, 2000; Brown *et al.*, 2010).

csLT(i-n)은 상부 adLTm과 점이적인 경계를 보이며 화산회의 함량이 낮은 점을 근거로 육상에서 형성된 밀도류가 수중으로 들어감에 따라 내부에 포함된 역들이 퇴적층의 하부에 역지 지 조직으로 쌓인 것으로 해석된다. 역들의 원마도가 불량하고 내부에 뜰어올림역을 포함하며 불규칙한 하부경계와 분급이 불량한 특징, 조립질 화산회 기질 및 역지 지 역점이-정점이 구조를 보이는 점을 고려하면, 대부분 화도 내에서 유래되었으며 점착력이 없는 쇄설류 형태(cohesionless debris flows)로 운반 및 퇴적된 것으로 해석된다(Smith, 1986; Sohn *et al.*, 1999, 2002; Sohn, 2000). 하부 역점이 현상은 입자충돌에 의한 분산압(dispersive pressure) 때문으로 해석되며 그 후 밀도류의 세기가 약해짐에 따라 정점이를 보이는 것으로 해석된다(Bagnold, 1956).

wTm3는 밀도류가 수중으로 들어감에 따라 크기 및 밀도에 따른 분급작용을 겪으며 퇴적층의 상부에 쌓인 층으로 해석된다(Fisher, 1984). 수평적으로 연장성이 좋고 대부분 괴상 및 희미한 층리를 보이며, 하부 cLTm, ILTm 및 adLTm과 점이적인 경계를 보

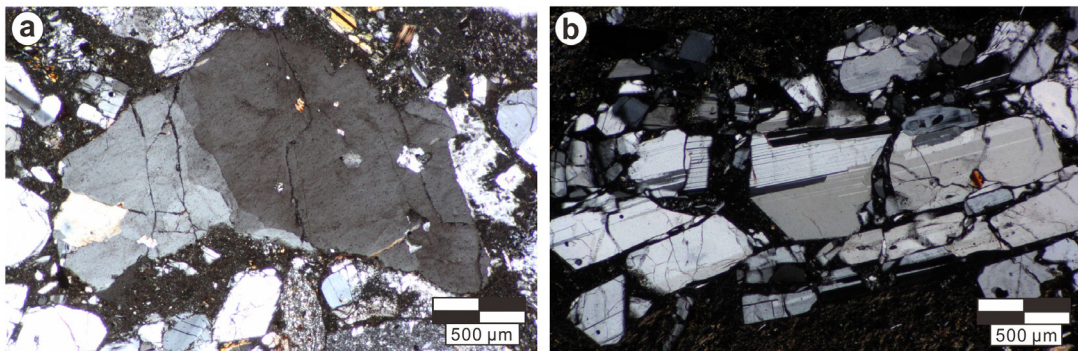


Fig. 9. Thin-section photomicrographs of lapilli tuffs from JG-3 well under closed nicols. (a) Fractured quartz crystal in lithic-rich massive lapilli tuff (facies ILTm) at 439.5 m depth. (b) Fractured plagioclase crystal showing jig-saw fit texture in fine ash-depleted massive lapilli tuff (facies adLTm) at 442.5 m depth.

이는 점은 이 암상들을 퇴적시킨 밀도류로부터 세립의 입자들이 빠져나가 형성된 저농도 저탁류(dilute turbidity current)에 의한 퇴적으로 해석된다. 이와 동시에 물의 표면에서 형성된 저농도 밀도류(dilute PDC or ash cloud surge)에 의한 퇴적으로 해석된다(Fisher, 1979; Jutzeler *et al.*, 2014a).

wTm4는 adLTm 및 csLT(i-n)과 유사한 기질을 가지며 상부 경계가 점이적이고, csLT(i-n)이 수층에서 점착력이 없는 쇄설류에 의한 퇴적으로 해석되기 때문에 유변환(flow transformation)의 결과로 쇄설류보다 앞선 저탁류에 의한 퇴적으로 해석된다(Sohn, 2000b).

4.3 쇄설성 퇴적암

4.3.1 기술

쇄설성 퇴적암은 괴상 역암(Gm), 괴상 및 층상 사암(Sm, Ss), 괴상 및 엽층리 이암(Mm, MI)으로 구성된다. 대부분 수 cm~수 m의 두께를 가진다.

괴상 역암(Gm)은 아각형~아원형의 잔자갈(pebble) 및 왕자갈(cobble) 크기의 역들로 구성된다. 하부 화산회가 풍부한 괴상 화산력 응회암(aLTm)과 뚜렷한 침식경계를 가지며, 역들은 대부분 배열성이 없고 사암을 기질로 하며, 분급은 불량하다(그림 10a, 10b). 4, 5호 공에서는 역암 내 뜯어올림역(rip-up mudstone)을 포함하며 하부는 각각 20 cm 및 1 m 두께의 aLTm과 교호한다(그림 10a, 10c). 대개 역지지 조직이 우세하나 상부로 갈수록 기질지지 조직이 우세해지며 층상 및 괴상 사암(Ss, Sm)으로의 상향 세립화 경향을 보인다(그림 10d). 6호 공에서는 역암 사이에 수 cm 두께를 가진 희미한 층리를 보이는 사암(Sm)이 협재되어 있다(그림 9e).

층상 사암(Ss)은 하부 괴상 역암(Gm) 혹은 괴상 사암(Sm)과 점이적인 경계를 가진다. 주로 검은색의 미세립사와 상대적으로 밝은색의 중립사의 반복으로 이루어져 있으며, 일부 공에서는 연흔구조(current ripple structure)가 관찰된다(4, 5호 공; 그림 9f).

괴상 이암(Mm)은 주로 회색~암회색을 띤다. 하부 괴상 사암(Sm) 및 층상 사암(Ss)과 점이적인 경계를 가진다.

4.3.2 해석

괴상 역암(Gm)에서 관찰되는 역지지-기질지지

조직을 보이고 하부 침식경계를 보이며, 뜯어올림역을 포함하고 부분적으로 희미한 층리를 보이는 사암이 협재 되어 있는 특징은 난류적 성격을 가진 고농도 홍수류(hyperconcentrated flood flow)로부터 빠른 퇴적과 견인에 의한 결과로 해석된다(Todd, 1989; Jo *et al.*, 1997; Yang and Jo, 2011; Sohn *et al.*, 2013).

층상 사암(Ss)은 하부 괴상 역암(Gm) 혹은 사암(Sm)과 점이적인 경계를 가지고 연흔이 관찰되는 점 등을 근거로 홍수류로부터 밀집 퇴적되거나 저농도의 저탁류에 의한 퇴적으로 해석된다(Todd, 1989; Jo *et al.*, 1997; Yang and Jo, 2011).

괴상 이암(Mm)은 하도유기로 인해 형성된 소규모 습지나 호수에서 침전으로 쌓인 것으로 해석된다(Miall, 1977).

5. 퇴적단위 분석

시추 코어에서 수직 암상변화, 기질의 색, 조성 등을 기준으로 연구구역을 총 4개의 퇴적단위로 구분하였다(그림 3). 퇴적단위 1, 3, 4는 화산쇄설암으로, 2는 쇄설성 퇴적암으로 구분된다. 3~6호 공에서는 모든 퇴적단위가 관찰되지만, 1호 공에서는 퇴적단위 2가 관찰되지 않고, 2호 공에서는 퇴적단위 4만 관찰된다.

5.1 퇴적단위 1

5.1.1 기술

최하부 퇴적단위 1은 1호 공에서 최대 39.3 m의 두께를 가지며, 동쪽인 3호 공(16.3 m)으로 갈수록 얇아진다(그림 4). 하부 괴상 응회암(Tm)부터 상부 괴상 역암(Gm)이 나오기 전까지의 구간이다(그림 5, 6). 대부분 퇴적단위 1의 하부경계는 검은색의 분급이 양호한 괴상 혹은 희미한 층리를 보이는 응회암(wTm)과 기질의 색 차이로 구분되나(그림 7e), 3호 공에서는 역암~사암으로 이루어진 쇄설성 퇴적암과 뚜렷한 하부경계를 보이며 구분된다. 퇴적단위 1은 화산회가 풍부한 괴상 화산력 응회암(aLTm), 층상 화산력 응회암(LTs), 괴상 응회암(Tm), 층상 응회암(Ts) 및 분급이 양호한 괴상 혹은 희미한 층리를 보이는 응회암(wTm)으로 구성된다. 퇴적단위 1의 하부는 Tm, Ts 및 wTm이 수~수십 cm의 두께로 여러 차례 교호한다(그림 5, 6, 7e). 하부를 제외하고

는 퇴적단위 1의 대부분을 aLTm이 차지하며 수~수십 cm의 두께를 가지는 LTs가 중, 상부에 존재한다. 퇴적단위 1에 포함된 암상들은 각형의 암편과 아원형의 부석이 화산회 기질에 지지되어 있으며, 일부 공에서는 기질이 연한 붉은 색을 띠고, 탈 유체구조 및 탄화된 식물 파편 등이 관찰된다(그림 7a, 7b). 1, 4, 6호 공에서는 상부로 갈수록 암편의 상향조립화 경향이 관찰되며 이는 LTs의 출현 이후 관찰되는 공통점을 보인다(그림 5, 6, 7c, 7d). 1호 공의 최상부는 aLTm과 약 70 cm의 두께를 가지는 wTm이 교호하며, 특히 최상부 aLTm은 하부 wTm과 뚜렷한 침식 경계를 가진다. 퇴적단위 1에서 가장 많은 부피를 차지하는 aLTm의 박편관찰 시, 사장석이 우세하며 K-

장석, 석영 및 소량의 흑운모가 관찰된다(그림 11a).

5.1.2 해석

하부 괴상 및 층상 응회암(Tm, Ts)과 분급이 양호한 괴상 혹은 희미한 층리를 보이는 응회암(wTm)의 경우, 본격적인 화산활동 이전의 소규모 화산활동에 따른 결과로 해석된다. 그 후 퇴적단위 1의 대부분을 차지하는 화산회가 풍부한 괴상 화산력 응회암(aLTm)과 관련된 대규모 화산활동이 발생한 것으로 해석된다(Fisher, 1984; Cas and Wright, 1991; Jutzeler *et al.*, 2014a). 화산회 기질 지지, 탄화된 식물 파편, 탈 유체구조 및 연한 붉은 색의 기질 등의 특징은 퇴적단위 1이 육상에서 화산회가 풍부한 고

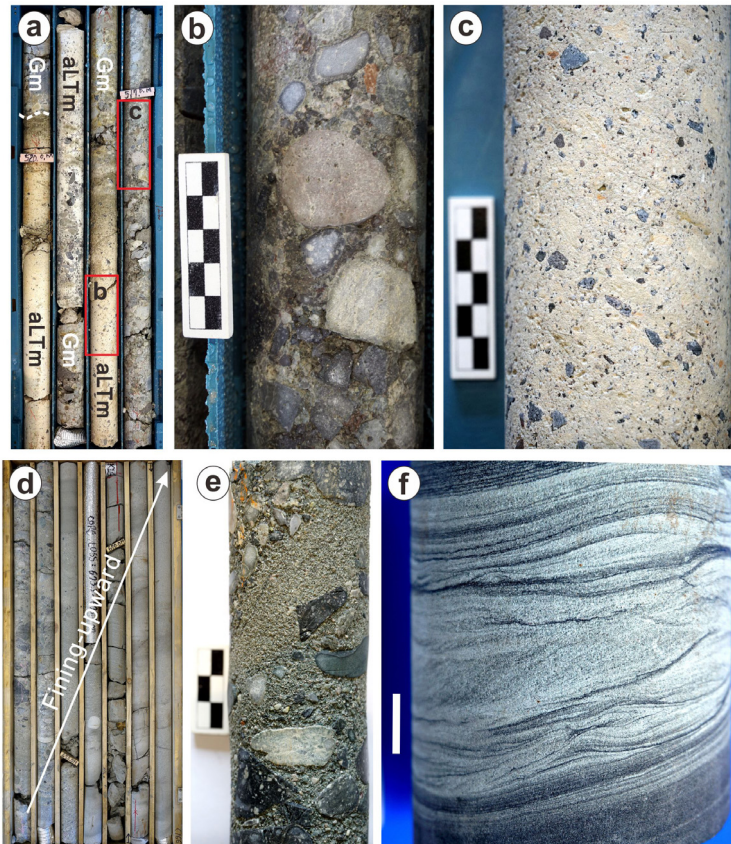


Fig. 10. Core photographs of Unit 2. (a) Base of Unit 2 showing alternation of massive conglomerate (facies Gm) and fine ash-rich massive lapilli tuff (facies aLTm, JG-5 well). Dashed line for the lower contact of Unit 2. (b) Close-up photographs of facies Gm showing subrounded, clast-supported texture and (c) facies aLTm composed of angular lithic and subrounded pumice lapilli in an ash matrix and facies in (a). (d) Fining-upward pattern from conglomerate to mudstone (JG-6 well). (e) Crudely stratified sandstone (facies Sm) interbedded with massive conglomerate (facies Gm) in (a) (JG-6 well). (f) Stratified sandstone (facies Ss) showing ripple-cross lamination (JG-4 well). The white bar for scale is 1 cm long.

농도 화쇄류에 의해 형성된 화쇄류암(ignimbrite)임을 지시한다. 퇴적단위 1의 최상부에 있는 wTm은 화쇄류가 이동함에 따라 부유된 입자들이 위로 빠져 나가거나, 분연주로부터 낙하 되어 쌓인 층으로 해석되며 일반적으로 화산분출의 마지막 산물로 여겨진다. 하지만 그 상부에 뚜렷한 침식경계를 가지며 다시 aLTm이 쌓인 것은 주된 화산활동 이후, 소규모 화산활동이 있었음을 지시한다.

5.2 퇴적단위 2

5.2.1 기술

퇴적단위 2는 5호 공에서 29.5 m의 두께로 가장 두꺼우며 서쪽으로 갈수록 얇아져 결국 침멸하여 1, 2호 공에서는 관찰되지 않는다(그림 4). 하부 괴상 역암(Gm)부터 상부 괴상 이암(Mm)까지의 구간으로, 하부 화산회가 풍부한 괴상 화산력 응회암(aLTm)과 뚜렷한 침식경계를 보인다. 퇴적단위 2는 괴상 역암(Gm), 괴상 사암(Sm), 층상 사암(Ss), 괴상 이암(Mm) 및 엽층리 이암(MI)으로 구성된다. 하부 괴상 역암(Gm)은 주로 기반암 기원의 아각형~아원형의 잔자갈(pebble) 및 왕자갈(cobble) 크기의 역들로 구성되어있고(그림 10a, 10b), 사암을 기질로 하며 분급은 불량하다. 퇴적단위 2의 하부는 역지 지 조직의 역암이 우세하나 상부로 갈수록 기질지 지 조직의 역암이 우세하고, 괴상 및 층상 사암(Sm, Ss), 괴상 및 엽층리 이암(Mm, MI)으로의 상향세립화 경향을 보인다(그림 10d). 특히 상부로 갈수록 사암과 이암으로만 구성된 특징을 보인다(그림 6). 4, 5호 공의 최하부는 각각 20 cm와 1 m 두께의 화산회가 풍부한 괴상 화산력 응회암(aLTm)이 괴상 역암(Gm)과 교호하고, 이때 aLTm의 경우 퇴적단위 1에서 관찰되는 aLTm과 유사(구성물질, 입도, 분급, 화산회 기질지 지 등)하며 외부 물질과 섞이지 않은 특징을 보인다(그림 10a, 10c). 또한, 6호 공에서는 역암 사이에 수 cm의 두께를 가지는 희미한 층리를 보이는 사암(Sm)이 협재 되어 있고(그림 10e), 4, 5호 공의 사암층에서는 연흔구조가 관찰된다(그림 10f).

5.2.2 해석

상향세립화 경향과 뚜렷한 하부 침식경계 및 연흔과 같은 퇴적구조 등을 근거로 퇴적단위 2는 하천활동에 의한 퇴적으로 해석된다(Miall, 1977; Leleu

et al., 2009; Lee and Hwang, 2012). 역지 지 조직, 하부 침식경계, 뜰어올림 및 내부의 희미한 층리를 보이는 사암(Sm)이 협재된 괴상 역암(Gm)의 경우 고농도 홍수류(hyperconcentrated flood flow)로부터 빠른 퇴적과 견인에 의한 퇴적으로 해석되며, 상부 괴상 및 층상 사암(Sm, Ss) 등은 홍수류가 약해지는 과정에서 빠른 부유퇴적의 결과로 해석된다(Todd, 1989; Jo et al., 1997; Yang and Jo, 2011). 특히 홍수 후 유량의 감소, 하도유기, 복합 사주(compound bar)의 측면 누적과 같은 과정에 의해 상향세립화 경향을 보이는 것으로 해석된다(Miall, 1977; Collinson, 1996; Lee and Hwang, 2012). 상부로 갈수록 사암과 이암으로만 구성되는 특징은 이들 암상이 쌓일 수 있었던 비교적 조용한 환경(습지 혹은 소규모 호수)이 형성되었음을 지시한다. 한편 4, 5호 공의 최하부에 괴상 역암(Gm)과 교호하는 화산회가 풍부한 괴상 화산력 응회암(aLTm)의 경우, 퇴적단위 1에서와 마찬가지로 각형의 암편과 아원형의 부석이 화산회기질에 지지되어 있고 외부 물질과 섞이지 않은 특징을 보이며, 층리나 사층리와 같은 퇴적구조가 관찰되지 않는 점에서 재동 층일 가능성은 작다고 판단된다. 대신 퇴적단위 1과 관련된 화산활동이 완전히 끝나지 않은 상태에서 괴상 역암(Gm)이 퇴적되었던 것으로 추정되며, 1호 공에서 퇴적단위 1의 최상부에 있는 aLTm과 4, 5호 공에서 퇴적단위 2의 최하부에 있는 aLTm은 동일한 화쇄류에 의한 퇴적으로 판단된다. 따라서 괴상 역암(Gm)은 퇴적단위 1과 관련된 화산활동과는 별개의 공급지로부터 유래되었을 것으로 추정된다.

5.3 퇴적단위 3

5.3.1 기술

퇴적단위 3은 3호 공에서 46.8 m의 두께로 가장 두껍고 나머지 시추공에서는 유사한 두께(약 36~39 m)를 가진다(그림 4). 상하부가 분급이 양호한 괴상 혹은 희미한 층리를 보이는 응회암(wTm)에 의해 경계지어진다. 퇴적단위 3의 하부는 괴상 이암(Mm)과, 상부는 결정이 풍부한 괴상 화산력 응회암(cLTm)과 뚜렷한 경계를 보인다(그림 5, 6). 퇴적단위 3의 하부에는 주로 wTm이 존재하고 그 상부에 역지 지 역점이-정점이 화산력 응회암(csLT(i-n)) 혹은 화산회가 결여된 괴상 화산력 응회암(adLTm)이 존재하며, 최

상부에는 다시 wTm이 존재한다. csLT(i-n)은 대부분 각형의 중립질 화산력(medium lapilli) 크기를 가진 암편으로 구성되어 있으며, 하부 wTm과 불규칙한 경계(irregular contact)를 보이고 상부 adLTm과는 점이적인 경계를 보인다. 소량의 화산회 및 부석을 기질로 하며 이는 상/하부 adLTm 및 wTm의 기질 과도 유사하다. adLTm은 퇴적단위 3의 대부분을 차지하며, 기질지지 조직 및 세립의 유리질 화산회가 결여된 특징을 보인다(그림 8e). 또한, 부가화산력과 탄화목을 포함한다(그림 8f, 8g). 5호 공에서는 결정 혹은 부석(cLTm, pLTm)이, 3호 공에서는 암편이 풍부한 괴상 화산력 응회암(ILTm)이 관찰된다. 퇴적단위 3에 포함된 암상들은 최상부 wTm을 제외하고는 각형의 암편과 아메바 형태의 부석 및 결정으로 구성되어 있다. 또한 박편 관찰 시 사장석, K-장석, 석영, 흑운모 및 각섬석이 관찰되며 내부균열을 가진 석영과 퍼즐구조의 사장석(jig-saw fit texture)이 관찰된다(그림 9a, 9b, 11b). 퇴적단위 1의 대부분을 차지하는 화산회가 풍부한 괴상 화산력 응회암(aLTm)과 비교하여 퇴적단위 3에 포함된 암상들은 결정의 함량이 높고 크기가 큰 특징을 보인다(그림 11b).

5.3.2 해석

기질에 세립의 유리질 화산회가 결여되어 있으며 일부 암상에서 탄화목과 부가화산력이 관찰되는 점 등을 근거로 퇴적단위 3은 육상에서 형성된 화산쇄설성 밀도류가 수중으로 들어가 쌓인 화산쇄설암으로 해석된다(Cas and Wright, 1991). 특히 내부균열의 석영, 퍼즐구조의 사장석 및 아메바 형태의 부석은 뜨거운 밀도류가 차가운 수중으로 들어감에 따른 급격한 냉각의 결과로 해석된다(Fiske and Matsuda, 1964; Fisher, 1984; Cole and Decelles, 1991). 이때 물과의 밀도 차에 의해, 하부는 주로 역지 조직의 암편이 풍부한 층(csLT(i-n), adLTm)에서 상부로 갈수록 부석과 화산회가 풍부한 층(pLTm, wTm)으로 크기와 밀도에 따른 분급이 발생한 것으로 해석된다.

5.4 퇴적단위 4

5.4.1 기술

최상부 퇴적단위 4는 퇴적단위 1과 마찬가지로 1호 공에서 35.5 m의 두께로 가장 두껍고 동쪽이나 북서쪽으로 갈수록 얇아진다. 퇴적단위 중 유일하게

2호 공에서도 5.4 m의 두께를 가진다(그림 4). 퇴적단위 4는 하부 결정이 풍부한 괴상 화산력 응회암(cLTm)부터 상부 괴상 및 엽층리 이암(Mm, MI) 전

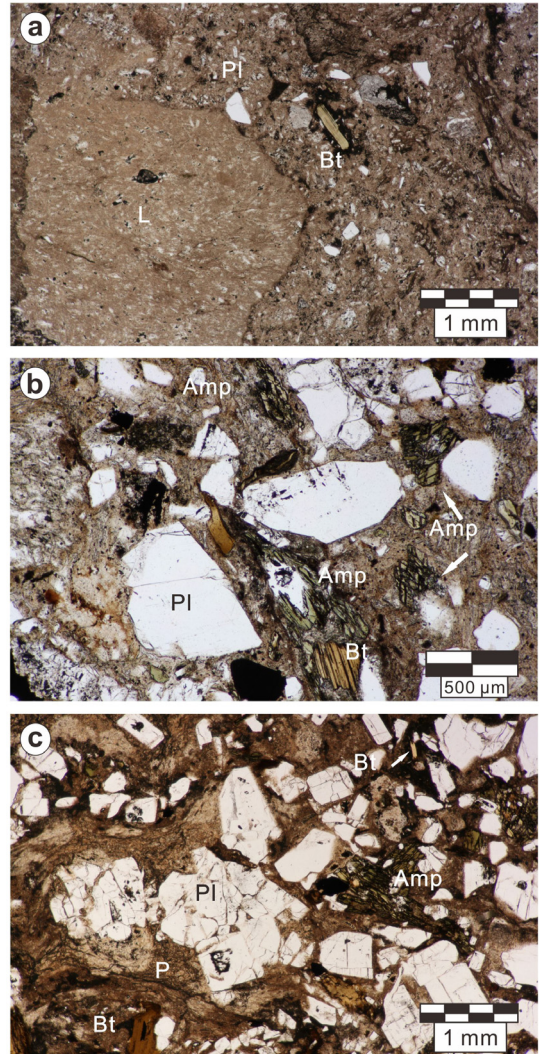


Fig. 11. Thin-section photomicrographs showing the petrographic features of the representative lithofacies in each units under open nicols. (a) Fine ash-rich massive lapilli tuff (facies aLTm) in Unit 1 at 676.8 m depth of JG-1 well. Note the rare occurrence of small biotite grains. (b) Fine ash-depleted massive lapilli tuff (facies adLTm) in Unit 3 at 442.5 m depth of JG-3 well. Note the abundance of crystals compared with facies aLTm (Unit 1). (c) Crystal-rich massive lapilli tuff (facies cLTm) in Unit 4 at 600.9 m depth of JG-1 well. Note the identical mineral assemblage with facies adLTm in Unit 3. P: pumice, L: lithic lapilli, Pl: plagioclase, Bt: biotite, Amp: amphibole.

까지의 구간이다(그림 5, 6). 퇴적단위 4의 하부는 분급이 양호한 괴상 혹은 희미한 층리를 보이는 응회암(wTm)과 뚜렷한 침식경계를 보인다. 퇴적단위 4의 대부분은 cLTm이 차지하고, 일부 공에서 층의 상부로 갈수록 정점이 층리를 보이며 wTm으로 변화한다. cLTm은 중립질 화산력(medium lapilli) 크기를 가진 각형의 암편과 아메바 형태의 부석 및 결정으로 이루어져 있다(그림 8a). 기질에 세립의 유리질 화산회(vitric fine ash)가 결여된 특징을 보이며, 4, 5, 6호 공에서는 하부에 뜰어올림역(rip-up clasts)이 관찰된다. 유일하게 5호 공의 최상부에는 부석이 풍부한 괴상 화산력 응회암(pLTm)이 약 50 cm의 두께로 존재한다. 이때 부석은 대부분 조립질 화산력(coarse lapilli) 크기이며 아메바 형태로 이암과 화산회기질에 존재한다(그림 8d). 모든 시추공에서 퇴적단위 4의 상부는 엽층리 또는 괴상 이암(Ml, Mm)에 의해 덮인다(그림 8b). cLTm의 박편관찰 시, 퇴적단위 3과 동일한 광물조성(사장석, K-장석, 석영, 흑운모 및 각섬석)을 보이며 퍼즐구조의 사장석 또한 관찰된다(그림 11c).

5.4.2 해석

기질에 세립의 유리질 화산회가 결여되어 있으며, 층의 두께가 수십 m에 이르고 대부분 결정이 풍부하며, 상부 엽층리 혹은 괴상 이암(Ml, Mm)에 의해 덮여있는 특징을 근거로 퇴적단위 4는 수중에서 결정이 풍부한 고농도 화산쇄설성 밀도류(subaqueous crystal-rich volcanoclastic density currents)에 의한 퇴적으로 해석된다(Fiske and Matsuda, 1964; Fisher, 1984; Cole and Decelles, 1991). 조립질 암편의 부재는 퇴적단위 4와 관련된 화산활동이 기존에 완성된 화도를 통해 분화하였거나 분화 중심지로부터 퇴적장소가 먼 곳이었음을 지시한다(Walker, 1985). 퇴적단위 4의 상부에 세립의 입자들로 구성된 분급이 양호한 괴상 혹은 희미한 층리를 보이는 응회암(wTm)은 수중에서 밀도류가 이동함에 따라 부유된 입자들의 침강에 의한 것으로 해석된다(Cas and Wright, 1991). 박편관찰 시, 퇴적단위 1에 비해 결정의 함량이 높고 크기가 크며, 퇴적단위 1에서 관찰되지 않는 각섬석이 관찰되는 점은 퇴적단위 1과 3, 4와 관련된 화산이 하나의 마그마방(magma chamber) 내에서 조성적으로 분리되어 분출(eruption from compositionally

zoned magma)되었거나 혹은 각기 다른 분화구로부터 분출되었음을 지시한다(Milner *et al.*, 2003).

6. 토 의

6.1 육상과 수중에서의 화산쇄설암의 비교

퇴적단위 1과 3은 각각 육상과 수중에서 쌓인 화산쇄설암으로 해석된다. 퇴적단위 1과 같이 육상에서 쌓인 경우, 하부는 주로 괴상 응회암(Tm)과 분급이 양호한 괴상 혹은 희미한 층리를 보이는 응회암(wTm)이 수 cm의 두께로 교호한다(그림 12a). 이는 본격적인 화산활동 이전의 소규모 화산활동에 따른 결과로 해석된다. 반면, 퇴적단위 3과 같이 육상 화산분출 후 수중에서 쌓인 경우, 하부는 주로 wTm 및 화산회가 결여된 괴상 화산력 응회암(adLTm) 혹은 역지지 역점이-정점이 화산력 응회암(cLT(i-n))이 존재한다(그림 12b). 이때, wTm은 유변환(flow transformation)으로 생성된 저탁류에 의한 퇴적으로 해석된다(6.2 참고). cLT(i-n)의 경우, 중립질~조립질 화산력(medium~coarse lapilli) 크기의 암편이 역지지 형태를 보이며 대부분 각형을 띤다. 이렇게 하부에 암편이 집중된 것은 밀도류가 수중으로 들어갈 때, 밀도가 작은 화산회는 물에 뜨고 밀도가 큰 암편은 물속으로 가라앉은 결과로 해석된다(Freundt, 2003; Allen *et al.*, 2012).

육상에서 쌓인 화산쇄설암의 중부는 화산회가 풍부한 괴상 화산력 응회암(aLTm)이 대부분을 차지한다(그림 12a). 일부 공에서 수 cm 두께의 wTm과 교호하며 이는 화쇄류의 펄스(pulse)를 지시하는 것으로 해석된다. 수~수십 cm 두께의 층상 화산력 응회암(LTs)이 aLTm과 교호하고, 부분적으로 기질이 연한 붉은 색을 띠며, 탈 유체구조가 관찰된다. 기질의 색은 육상에서 산화에 따른 결과로 해석되며, 탈 유체구조는 화쇄류가 뜨거운 상태였음을 지시한다. 일부 시추공에서는 상부로 갈수록 암편의 상향조립화 경향이 관찰되기도 한다. 반면 수중에서 쌓인 경우, 대부분 화산회가 결여된 괴상 화산력 응회암(adLTm)이 차지한다(그림 12b). 역지지 역점이-정점이 화산력 응회암(csLT(i-n))은 역지지조직을 보이는데 반해 adLTm의 경우 기질지지 조직을 보인다. adLTm의 내부에 존재하는 부가화산력과 탄화목 및 내부 균열을 가진 결정들의 존재는 밀도류가

뜨거운 상태에서 육상으로부터 수중으로 이동하여 쌓였음을 지시한다.

두 환경 모두에서 화산쇄설암의 상부로 갈수록 입도가 작아지며 분급이 양호해지는 특징(wTm)을 보인다(그림 12a, 12b). 이는 밀도류가 이동함에 따라 세립의 물질들이 화산쇄설암의 상부에 낙하하여 쌓인 결과로 해석된다. 특히 수중에서 쌓인 화산쇄설암의 경우, 육상에서의 것과 비교하여 훨씬 더 두꺼운 퇴적층(wTm)을 형성하는데(최대 약 8 m, 5호 공) 이는 수중에서의 분급작용이 육상에서보다 더 활발하게 일어난 결과로 해석된다. 또한, 육상에서 쌓인 응회암(wTm)은 대부분 과상인데 반해 수중에서 쌓인 응회암의 경우 일부 희미한 층리를 보인다. 이는 부유 상태에서 빠른 침강에 의한 결과이거나 저탁류에 의한 견인의 결과로 해석된다(Cas and Wright, 1987). 5호 공의 최상부에는 부석이 풍부한 과상 화산력 응회암(pLTm)이 이암 및 화산회를 기질로 하며 존재한다(퇴적단위 4). 이는 부유 상태에 있던 부석들이 이암과 함께 쌓인 결과로 해석된다.

6.2 육상 분출 후 수중으로 진입한 밀도류의 특성
퇴적단위 3과 같이 육상에서 형성된 화산쇄설성

밀도류가 수중으로 들어갈 때, 유체가 공기에서 물로 대체되고 열을 잃어버리면서 쇄설류(debris-flow)와 저탁류(turbidity current)로 변한다는 주장(Cas and Wright, 1991; Carey *et al.*, 2000)과 밀도류의 앞부분(head) 혹은 표면만 물과 접촉하여 식어버리고 내부는 열을 간직한 채, 물을 밀어버리면서 수중으로 들어간다는 상반된 주장이 존재한다(Sparks *et al.*, 1980; Fritz and Stillman, 1996). 물론 수중환경에서도 밀도류가 높은 열을 간직한 채 정치(emplacment)된 사례도 있으나, 화산쇄설암이 칼데라 내부에서 형성된 경우(Kokelaar and Busby, 1992)나 수십 m 이내의 얇은 수중환경에서 형성된 경우(Howells *et al.*, 1979)가 대부분이다.

퇴적단위 3에서 관찰되는 내부균열을 가진 결정들은 밀도류가 수중으로 들어가자마자 급격한 냉각을 겪었음을 지시한다. 이때, 낮은 밀도로 인해 수중으로 들어가지 못한, 세립질로 구성된 저농도의 밀도류(dilute PDC or ash cloud surge)가 형성된다(White, 2000; Freundt, 2003; Dufek and Manga, 2008). 이 밀도류는 수중으로 들어가는 조립질로 구성된 밀도류보다 훨씬 빠른 속도로 물의 표면에서 앞으로 나아가며, 여러 번의 증기폭발을 일으킨다

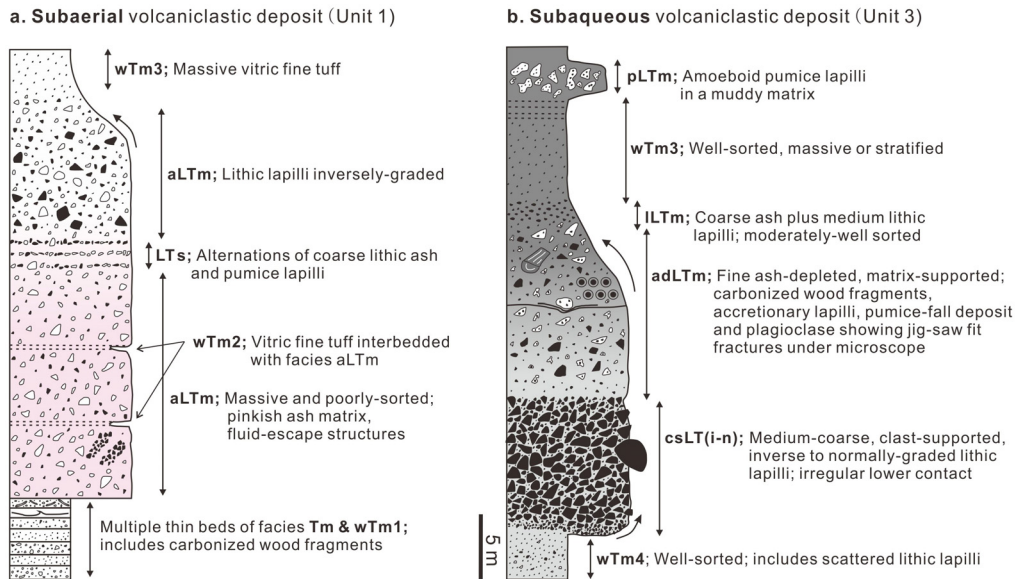


Fig. 12. Idealized sequences of pyroclastic flow deposits in subaerial and subaqueous environments in the Janggi Basin. (a) Subaerial volcaniclastic deposit is mainly massive and poorly sorted. (b) Subaqueous volcaniclastic deposit shows coarse lithic-rich base to fine ash-rich or pumice-rich top. The deposit includes broken crystals and thicker beds of well-sorted massive or crudely stratified tuff (facies wTm) at the top than the subaerial deposit.

(그림 13). 이러한 증기폭발은 저농도의 밀도류가 더욱 먼 거리까지 이동할 수 있는 추진력을 제공한다(Freundt, 2003; Allen *et al.*, 2012). 퇴적단위 3을 형성한 밀도류 역시 이와 유사한 방식으로 물의 표면에서 여러 번의 증기폭발을 일으켰을 것으로 추정된다.

한편, 수중으로 들어가는 조립질로 구성된 밀도류(쇄설류)의 경우, 육상에서와 비교하여 더 큰 흐름 저항(flow resistance)을 받기 때문에 고농도 홍수류(hyperconcentrated flood flow)나 저탁류(turbidity current)로의 유변환(flow transformation)을 일으키기 쉽다(Norem *et al.*, 1990; Sohn, 2000a, 2000b; Sohn *et al.*, 2002). 조립질 역들의 함량이 높고 기질이 주로 사암으로 이루어진 쇄설류의 경우, 이동 과정에서 역들이 쇄설류의 전면부(front)에 집중되고 그로 인해 전면부 속도가 느려진다. 따라서 쇄설류의 표면 유변환(surface transformation)으로 형성된 저탁류가 쇄설류보다 먼저 이동하여 퇴적된다. 반면, 주로 잔자갈 크기의 역들과 이암(불투수성)을 기질로 하는 쇄설류의 경우, 쇄설류의 전면부 아래로 물이 침투하여 전면부를 떼어내는 현상(detachment and disintegration of the hydroplaning flow front)이 발생한다. 이와 더불어 쇄설류 내부의 희석(dilution

of the flow interior)과 표면 유변환과 같은 다양한 방식의 유변환이 발생하여 저탁류를 형성한다. 이중 일부는 쇄설류보다 빠른 이동을 하며 쇄설류보다 먼저 퇴적될 수 있지만, 쇄설류가 빠른 속도를 유지하므로 대부분 쇄설류보다 느리게 이동하여 쇄설류의 상부에 퇴적된다(Sohn, 2000b).

4, 6호 공에서 퇴적단위 3의 최하부는 각각 1.8 m와 3.7 m의 두께를 가지는 분급이 양호한 괴상 혹은 희미한 층리를 보이는 응회암(wTm)이 존재하며 5호 공에서는 3.8 m 두께의 화산회가 결여된 괴상 화산력 응회암(adLTm) 및 wTm이 존재한다. 그리고 그 상부에는 역지 역점-정점이 화산력 응회암(csLT(i-n))이 존재한다. 이 세 암상은 모두 유사한 기질(세립의 유리질 화산회가 결여되어 있으며 소량의 부석, 암편 및 흑운모와 각섬석 등의 결정으로 구성)을 가지며 각 암상간의 점이적인 상하부 경계를 보인다(그림 14a~e). 또한, csLT(i-n)의 경우 비점착성 쇄설류(cohesionless debris flow)에 의한 퇴적으로 해석되며 육상에서 발생한 화산 쇄설성 밀도류(쇄설류)가 수중으로 들어감에 따라 세립의 유리질 화산회의 선택적 제거가 발생한 것으로 해석된다. 덧붙여 csLT(i-n)의 존재로 보아, 수중에서 쇄설류는

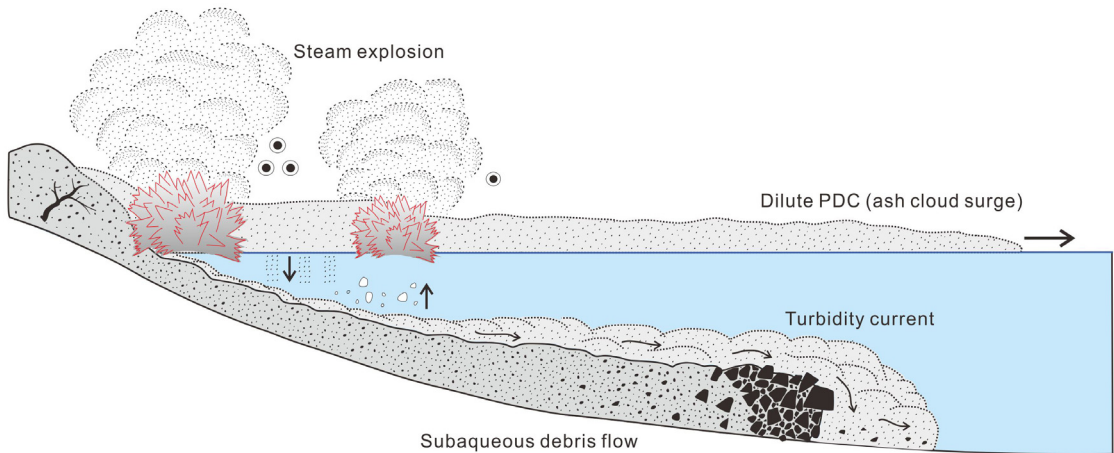


Fig. 13. Inferred depositional processes of pyroclastic density currents (PDCs) related to Unit 3. PDCs generated by subaerial volcanic eruption divide into two density currents: dilute PDC (ash cloud surge) and subaqueous debris flow. The former is composed mainly of fine ash and passes over water, generating steam explosions whereas the latter is composed of coarse particles and enters the water via flow transformation. Fine ash from dilute PDC settles through the water column (downward arrow) whereas pumice is segregated from subaqueous debris flow as soon as the flow enters the water (upward arrow). The flow may become longitudinally segregated, producing suspended sediment clouds (turbidity current) which precede the flow. Most accretionary lapilli may be formed around a lake when PDCs encounter the water (modified from Sohn, 2000b; Jutzeler *et al.*, 2014a).

이동 중 전면부에 역들이 집중되는 현상이 발생했다고 추정된다. 이는 전단속도(shear rate)가 약한 쇄설류의 상부에 역들이 집중되거나, 역들이 쇄설류의 전면부보다 더 빠른 속도를 가지기 때문으로 해석된다(Bagnold, 1968; Suwa, 1988; Sohn, 2000b). 이렇게 전면부에 집중된 역들은 일종의 저항 갑옷(resistant armor)을 형성하며, 이로 인해 쇄설류로부터 제거되는 입자들의 양이 제한된다. 이와 동시에 입자 간의 마찰과 충돌로 인한 운동에너지(kinematic energy)의 빠른 소비로 쇄설류의 전면부 속도가 느려진다. 특히, 쇄설류로부터 제거된 입자들은 저탁류 형태로 이동하며 지형의 경사가 작아졌을 때, 쇄설류의 전면부에 비해 훨씬 빠른 속도로 앞으로 나아간다(Sohn, 2000b). 결국, 저탁류로 인한 세립의 입자들이 먼저 퇴적되고(wTm, adLTm) 그 상부에 쇄설류에 의한 퇴적이 발생한 것으로 해석된다(csLT(i-n), adLTm).

7. 결론

이산화탄소의 육상 저장부지를 찾기 위해 장기분지 내 뇌성산지괴에서 이루어진 시추결과, 성동리층

하부에 약 100 m 이상의 데사이트질 화산쇄설암이 퇴적되어 있음을 확인하였고, 이를 대상으로 실시한 화산/퇴적학적 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 성동리층 하부 데사이트질 화산쇄설암은 15개의 퇴적상과 4개의 퇴적단위로 구분될 수 있다.
- 2) 최하부 퇴적단위 1은 육상에서 쌓인 화쇄류암(ignimbrite)으로 화산회 기질 지지, 괴상, 분급불량, 탄화된 식물 파편, 탈 유체구조 및 연한 붉은색의 기질 등은 이를 뒷받침한다.
- 3) 퇴적단위 2는 주로 기반암 기원의 역들로 구성되어 있으며, 역암-사암-이암으로의 상향세립화 경향, 하부 침식경계 및 연흔구조 등을 근거로 하천활동에 의한 쇄설성 퇴적암으로 해석된다.
- 4) 퇴적단위 3은 기질에 세립의 유리질 화산회(vitric fine-ash)가 결여되어 있으며 탄화목, 부가화산력 및 내부균열을 가진 결정들의 존재 등을 근거로 육상 화산활동으로 형성된 화산쇄설성 밀도류가 수중으로 들어가 쌓인 화산쇄설암으로 해석된다. 이때 조립질 입자들로 구성된 밀도류는 수중으로 들어가 바닥을 따라 흐르며 저탁류로의 유변환을 일으키는 반면, 상대적으로

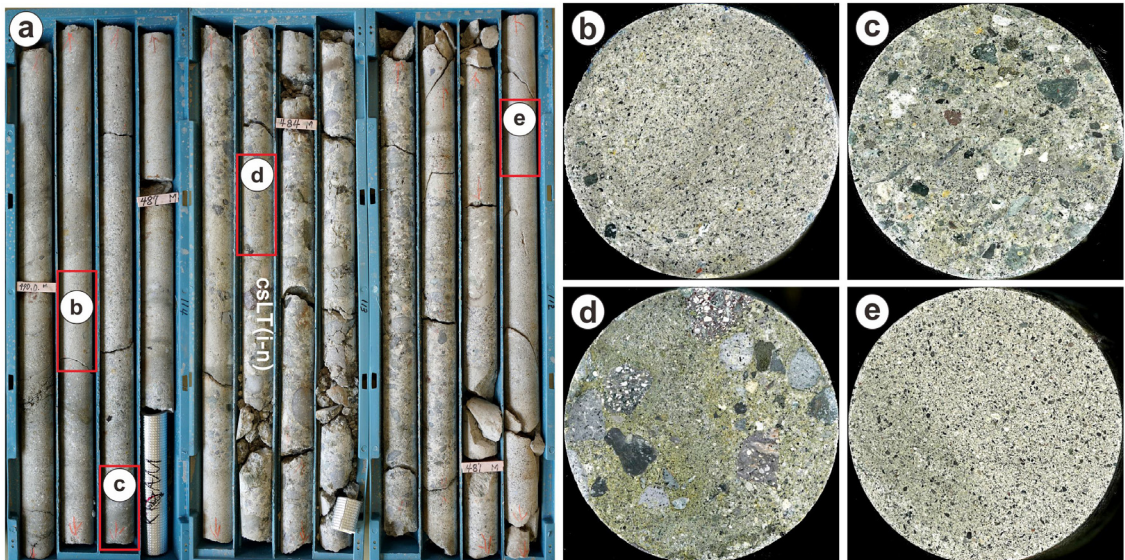


Fig. 14. (a) Core and (b to e) slab photographs showing the basal part of Unit 3 (JG-5 well). (b) and (e) are identical to the under- and overlying clast-supported inverse to normally graded lapilli tuff (facies csLT(i-n)), (d) (c) has coarser lithic lapilli than (b). (d) is a part of facies csLT(i-n), which has predominantly matrix-supported texture. Note that (b) to (e) show similar matrix composed mainly of crystals and matrix of similar grain sizes. Slab size is 6 × 6 cm. (b, e) Well-sorted massive or crudely stratified tuff (facies wTm), (c) Fine ash-depleted massive lapilli tuff (facies adLTm), (d) Clast-supported inverse to normally graded lapilli tuff (facies csLT(i-n)).

세립의 입자들로 구성된 밀도류는 물의 표면을 따라 앞으로 나아가는 혼탁류를 형성한다. 부가화산력의 경우 대부분 밀도류가 수중으로 들어갈 때 형성되었을 경우로 추정된다.

- 5) 최상부 퇴적단위 4는 퇴적단위 3과 동일한 광물조성 및 특징을 보이며 괴상 혹은 엽층리 이암(Mm/MI)으로 덮여 있어, 수중에서 퇴적된 화산쇄설암으로 해석된다.
- 6) 육상 화산쇄설암의 경우 화산회 기질지, 탈유체 구조, 탄화된 식물 파편 및 기질이 연한 붉은 색을 띠는 반면, 수중 화산쇄설암의 경우 하부는 주로 중립질 화산력크기의 암편이 우세하며 상부로 갈수록 부석 및 화산회가 풍부한 층으로, 밀도와 크기에 따른 분급이 발생한 특징을 보인다. 또한 기질에 세립의 유리질 화산회가 결여되어 있고 내부 균열을 가진 결정들이 관찰되며, 층의 최상부는 이암을 기질로 하는 부석들이 퇴적된 특징을 보인다.
- 7) 퇴적단위 1에 비해 퇴적단위 3과 4에서는 결정의 함량이 높고 크기가 크며 퇴적단위 1에서 관찰되지 않는 각섬석이 관찰된다.
- 8) 추후 퇴적단위 1과 3, 4와 관련된 화산이 서로 다른 분화구에서 분출된 것인지 혹은 하나의 마그마 방(magma chamber) 내에서 조성적으로 분리되어 분출(eruption from compositionally zoned magma)된 것인지에 관한 연구가 필요하다.

사 사

이 연구는 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 (재)한국이산화탄소 포집 및 처리 연구개발센터의 지원(NRF-2014M1A8A1049342)을 받아 수행되었다. 논문에 대해 건설적인 의견을 제시해주신 익명의 심사자들에게 감사드린다.

REFERENCES

- Allen, S.R., Freundt, A. and Kurokawa, K., 2012, Characteristics of submarine pumice-rich density current deposits sourced from turbulent mixing of subaerial pyroclastic flows at the shoreline: Field and experimental assessment. *Bulletin of Volcanology*, 74, 657-675.
- Bagnold, R.A., 1956, The flow of cohesionless grains in fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 249, 235-297.
- Bagnold, R.A., 1968, Deposition in the process of hydraulic transport. *Sedimentology*, 10, 45-56.
- 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.
- Branney, M.J. and Kokelaar, B.P., 1997, Giant bed from a sustained catastrophic density current flowing over topography: Acatlan ignimbrite, Mexico. *Geology*, 25, 115-118.
- Branney, M.J. and Kokelaar, B.P., 2002, Pyroclastic Density Currents and the Sedimentation of Ignimbrites: The Geological Society, London, Memoir 27, 143 p.
- Brown, R.J., Branney, M.J., Maher, C. and Davila-Harris, P., 2010, Origin of accretionary lapilli within ground-hugging density currents: Evidence from pyroclastic couplets on Tenerife. *Geological Society of America Bulletin*, 122, 305-320.
- Carey, S., Sigurdsson, H., Mandeville, C. and Bronto, S., 2000, Volcanic hazards from pyroclastic flow discharge into the sea: examples from the 1883 eruption of Krakatau, Indonesia. *Geological Society of America Special Papers*, 345, 1-14.
- Cas, R.A.F. and Wright, J.V., 1987, *Volcanic Successions: Modern and Ancient*. Allen and Unwin, London, 528 p.
- Cas, R.A.F. and Wright, J.V., 1991, Subaqueous pyroclastic flows and ignimbrites: an assessment. *Bulletin of Volcanology*, 53, 357-380.
- Cole, R.B. and Decelles, P.G., 1991, Subaerial to submarine transitions in early Miocene pyroclastic flow deposits, southern San Joaquin basin, California. *Geological Society of America Bulletin*, 103, 221-235.
- Collinson, J.D., 1996, Alluvial sediments, In: Reading, H.G. (eds.), *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy*. Blackwell Science, Oxford, 37-82.
- Dufek, J. and Manga, M., 2008, In situ production of ash in pyroclastic flows. *Journal of Geophysical Research*, 113(B09207): doi:10.1029/2007JB005555.
- Fisher, R.V., 1961, Proposed classification of volcaniclastic sediments and rocks. *Geological Society of America Bulletin*, 72, 1409-1414.
- Fisher, R.V., 1966a, Mechanism of deposition from pyroclastic flows. *American Journal of Science*, 264, 350-363.
- Fisher, R.V., 1966b, Rocks composed of volcanic fragments and their classification. *Earth-Science Reviews*, 1, 287-298.
- Fisher, R.V., 1979, Models for pyroclastic surges and pyro-

- clastic flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 6, 305-318.
- Fisher, R.V., 1984, Submarine volcanoclastic rocks. The Geological Society, London, Special Publications, 16, 5-27.
- Fiske, R.S., Cashman, K.V., Shibata, A. and Watanabe, K., 1998, Tephra dispersal from Myojinsho, Japan, during its shallow submarine eruption of 1952-1953. *Bulletin of Volcanology*, 59, 262-275.
- Fiske, R.S. and Matsuda, T., 1964, Submarine equivalents of ash flows in the Tokiwa Formation, Japan. *American Journal of Science*, 262, 76-106.
- Freundt, A., 2003, Entrance of hot pyroclastic flows into the sea: experimental observations. *Bulletin of Volcanology*, 65, 144-164.
- Fritz, W.J. and Stillman, C.J., 1996, A subaqueous welded tuff from the Ordovician of County Waterford, Ireland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 70, 91-106.
- Gu, H.-C., Gihm, Y.S., Kim, M.-C., Gim, J.-H. and Hwang, I.G., 2016, Sedimentary facies and depositional environment of the core section in the lower part of the Janggi Basin. The 6th Korea CCS Conference (Abstract), Jeju, January 27-29.
- Howells, M.F., Campbell, D.G. and Reedman, A.J., 1985, Isolated pods of subaqueous welded ash-flow tuff: a distal facies of the Capel Curig Volcanic Formation (Ordovician), North Wales. *Geological Magazine*, 122, 175-180.
- Jeong, J.O., Kwon, C.W. and Sohn, Y.K., 2008, Lithofacies and architecture of a basinwide tuff unit in the Miocene Eoil Basin, SE Korea: Modes of pyroclastic sedimentation, changes in eruption style, and implications for basin configuration. *Geological Society of America Bulletin*, 120, 1263-1279.
- 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).
- 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, 51-79.
- Jolivet, L., Huchon, P., Brun, J.P., Le Pichon, X., Chamot-Rooke, N. and Thomas, J.C., 1991, Arc deformation and marginal basin opening: Japan Sea as a case study. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96, 4367-4384.
- Jolivet, L., Tamaki, K. and Fournier, M., 1994, Japan Sea, opening history and mechanism: A synthesis. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99, 22237-22259.
- Jutzeler, M., McPhie, J. and Allen, S.R., 2014a, Facies architecture of a continental, below-wave-base volcanoclastic basin: The Ohanapecosh Formation, Ancestral Cascades arc (Washington, USA). *Geological Society of America Bulletin*, 126, 352-376.
- Jutzeler, M., McPhie, J. and Allen, S.R., 2014b, Submarine eruption-fed and resedimented pumice-rich facies: the Dogashima Formation (Izu Peninsula, Japan). *Bulletin of Volcanology*, 76, 1-29.
- Kim, B.K., 1970, A study on the Neogene Tertiary deposits in Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 6, 77-96 (in Korean with English abstract).
- Kim, B.K., Cheong, C.H. and Kim, S.J., 1975, Stratigraphic studies on the lignite-bearing strata distributed in the Yeongil district, north Gyeongsang-Do, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 11, 240-252 (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 for Guryongpo area. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 19, 231-239.
- 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 its structural and sedimentologic characteristics in the Miocene Janggi Basin, SE Korea. *Journal of the geological society of Korea*, 51, 253-271 (in Korean with English abstract).
- 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).
- Kokelaar, P. and Busby, C., 1992, Subaqueous explosive eruption and welding of pyroclastic deposits. *Science*, 257, 196-201.
- Lallemand, S. and Jolivet, L., 1986, 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 Korean Institute of Mining Geology* 25, 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*, 48, 365-381 (in Korean with English abstract).
- Leleu, S., Hartley, A.J. and Williams, B.P.J., 2009, Large-scale alluvial architecture and correlation in a Triassic pebbly

- braided river system, lower Wolfville Formation (Fundy Basin, Nova Scotia, Canada). *Journal of Sedimentary Research*, 79, 265-286.
- Loughlin, S.C., Calder, E.S., Clarke, A., Cole, P.D., Luckett, R., Mangan, M.T., Pyle, D.M., Sparks, R.S.J., Voight, B. and Watts, R.B., 2002, Pyroclastic flows and surges generated by the 25 June 1997 dome collapse, Soufrière Hills Volcano, Montserrat. Geological Society, London, *Memoirs*, 21, 191-209.
- Miall, A.D., 1977, A review of the braided river depositional environment. *Earth Science Reviews*, 13, 1-62.
- Milner, D.M., Cole, J.W. and Wood, C.P., 2003, Mamaku Ignimbrite: a caldera-forming ignimbrite erupted from a compositionally zoned magma chamber in Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 122, 243-264.
- Noh, J.H. and Hong, J.S., 2010, Pyroclastic lithology and stratigraphy of the Beomgockri Group of Tertiary age in Janggi area. *Journal of the Geological Society of Korea* 46, 141-156 (in Korean with English abstract).
- Norem, H., Locat, J. and Schieldrop, B., 1990, An approach to the physics and the modeling of submarine flow slides. *Marine Georesources & Geotechnology*, 9, 93-111.
- Smith, G.A., 1986, Coarse-grained nonmarine volcanoclastic sediment: Terminology and depositional process. *Geological Society of America Bulletin*, 97, 1-10.
- Sohn, Y.K., 2000a, Coarse-grained debris-flow deposits in the Miocene fan deltas, SE Korea: A scaling analysis. *Sedimentary Geology*, 130, 45-64.
- Sohn, Y.K., 2000b, Depositional processes of submarine debris flows in the Miocene fan deltas, Pohang Basin, SE Korea with special reference to flow transformation. *Journal of Sedimentary Research*, 70, 491-503.
- Sohn, Y.K., Choe, M.Y. and Jo, H.R., 2002, Transition from debris flow to hyperconcentrated flow in a submarine channel (the Cretaceous Cerro Toro Formation, southern Chile). *Terra Nova*, 14, 405-415.
- 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 Kim, B.C., 1999, Debris flow and hyperconcentrated flood-flow deposits in an alluvial fan, northwestern part of the Cretaceous Yongdong basin, central Korea. *Journal of Geology*, 107, 111-132.
- Son, M., 1998, Formation and evolution of the Tertiary Miocene basins in southeastern Korea: Structural and paleomagnetic approaches. Ph.D. Thesis, Pusan National University, Busan, 233 p (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, 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, 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.
- 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.
- Son, M., Song, C.W., 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).
- Sparks, R.S.J., 1976, Grain size variations in ignimbrites and implications for the transport of pyroclastic flows. *Sedimentology*, 23, 147-188.
- Sparks, R.S.J., Sigurdsson, H. and Carey, S.N., 1980, The entrance of pyroclastic flows into the sea, II. Theoretical considerations on subaqueous emplacement and welding. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 7, 97-105.
- Suwa, H., 1988, Focusing mechanism of large boulders to a debris-flow front. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, 9, 151-178.
- 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, 513-530.
- Walker, G.P.L., 1985, Origin of coarse lithic breccias near ignimbrite source vents. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 25, 157-171.
- White, J.D.L., 2000, Subaqueous eruption-fed density currents and their deposits. *Precambrian Research*, 101, 87-109.
- White, J.D.L. and Houghton, B.F., 2006, Primary volcanoclastic rocks. *Geology*, 34, 677-680.
- White, J.D.L., Manville, V., Wilson, C.J.N., Houghton, B.F., Riggs, N.R. and Ort, M., 2001, Settling and deposition of AD 181 Taupo pumice in lacustrine and associated environments. *Volcanoclastic Sedimentation in Lacustrine Settings (Special Publication 30 of the IAS)*,

- 15, 141-150.
- Wright, J.V. and Walker, G.P.L., 1981, Eruption, transport and deposition of ignimbrite: a case study from Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 9, 111-131.
- Yang, I.H. and Jo, H.R., 2011, Depositional processes and model of Giran conglomerate body, northern part of the Gyeongsang Basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 569-584 (in Korean with English abstract).
- Yoon, S., 1992, Geology of the Tertiary Yangnam and Pohang basins, Korea. *Bulletin of the Mizunami Fossil Museum*, 19, 13-31.
- Yoon, S., 1997, Miocene-Pleistocene volcanism and tectonics in southern Korea and their relationship to the opening of the Japan Sea. *Tectonophysics*, 281, 53-70.
-

Received : October 22, 2016

Revised : December 20, 2016

Accepted : December 21, 2016