

제주도 지질학 발전을 위한 제언

안용산

요약

화산섬 제주도는 1920년대 일제 강점기 일본 지질학자들에 의해 연구가 시작된 이후 지속적으로 연구가 진행되고 있다. 해방 이후 용수난 해결을 위해 제주도 지질 및 지하수 연구가 본격적으로 시행되어, 1960년대 말 제주도 지질도가 최초 작성되었다. 이후 1980년 중반에 접어들어 제주도 화산활동 시기를 수치적으로 제시하고자 하는 연대학적 연구들이 시작되었다. 1990년대에는 제주도 지질도가 새롭게 작성되었으며, 이후 지표에 분포하는 암석과 지하 시추코아 자료를 연계한 연구들이 활발히 진행되어 2010년대에 들어 제주도 화산활동사가 시공간적 차원에서 입체적으로 정립되었다. 최근에는 제주도 전역에 걸친 개별 소화산체(오름)들에 대한 연대측정, 지하 마그마 작용과 화산활동과의 관계, 화산재해 예측, 고기후 연구 등으로 연구 영역이 다양화되고 있다. 제주도 지질연구 과정을 살펴보고, 향후 제주도 지질학 발전 방안을 모색해보고자 한다.

I. 서언

세계자연유산이자 세계지질공원인 제주도는 그동안 많은 국내외 지질학자들의 관심의 대상이었다. 1920년대 일제강점기 일본 학자에 의한 최초의 지질학적 연구가 수행된 이후, 지하수개발과 보존, 지열활용, 지질자원의 보존, 지질컨텐츠 발굴, 순수 학문적 연구 등 다양한 목적에서 지속적인 연구가 이루어져 왔다. 다른 학문과 마찬가지로 지질학 또한 시대적 요구, 연구 트렌드, 활용 가능한 분석방법 등 다양한 요인에 의해 시기에 따라 연구의 방향과 결과물이 크게 변화해왔다. 지질학적 연구가 최초 수행된 일제강점기 이후 현재에 이르기까지의 제주도 지질연구 과정을 살펴보고, 제주도 지질연구가 나아갈 방향에 대해 간략히 논의하고자 한다.

II. 제주도 지질연구 과정

1. 일제 강점기~ 1960년

일제 강점기 Yokoyama(1923)에 의해 최초로 제주도 지질 연구가 실시되었다. 그는 서귀포 층에서 27종

의 연체동물 화석을 보고하고, 그 형성시기를 후기 플라이오세(Upper Pleiocene)로 추정하였다. 이후, Nakamura(1925)와 Haraguchi(1931)에 의해 지질조사 및 암석학적 연구가 실시되었다. 특히 Haraguchi(1931)는 처음으로 제주도의 전역에 대한 화산활동을 시대적으로 구분하였다. 그는 제주도가 한라산을 중심으로 조면암(trachyte)이 중기 플라이오세(Middle Pliocene)에 분출한 이후, 초기 플라이스토세(Lower Pleistocene)에 조면안산암(Trachyandesite)을 거쳐 후기 플라이스토세(Upper Pleistocene)에 현무암류(Basalt)가 분출하여 형성된 화산도라고 해석하였다. 또한 Haraguchi(1931)는 서귀포 지역에 분포하는 퇴적층을 서귀포층이라 명명하고, 전기 플라이스토세(Lower Pleistocene) 지층으로 해석하였다.

2. 1960~1990년

1960년대에 들어 제주도의 용수난을 해결하기 위해 제주도 지하수에 대한 조사연구가 본격적으로 이루어지기 시작하였다. 국립지질조사소(현 한국지질자원연구원)에서 1963년부터 1965년까지 지하수 조사와 아울러 지질조사를 실시하여 지하수원 조사보고서를 발간하였으며, 1965~1966년에는 한국지하자원조사소에서 제주도 전역에 걸쳐 지하수 개발을 위한 지질조사를 실시하였다. 1968년에는 손치무 등에 의하여 최초로 제주도 전역에 대한 10만분의 1의 지질도가 작성되었다.

이 시기 들어 순수 학술적 차원의 연구들이 수행되기 시작하였다. 김봉균(1969)은 성산포와 고산리 일대에 분포하는 퇴적층을 신양리층이라고 명명하고, 유공층 화석 연구를 통해 플라이스토세(Pleistocene)에 퇴적된 것으로 추론하였다. Taneda 외(1970)은 산방산 조면암에 대한 고지자기 연구를 통해, 산방산이 현재의 극방향과 반대인 Negative polarity를 지시하고 있어 Matuyama reversed polarity epoch에 해당하는 2백만년 전에서 7십만년 전 사이에 분출한 것으로 해석하였다. Taneda 외(1970)은 Haraguchi(1931)와 달리 서귀포층의 퇴적시기를 플라이오세 말기의 퇴적층으로 해석하였다.

1970년대 중반에는 국내 학자들에 의해 제주도의 지질층서가 새롭게 제시되었다. 원종관(1976)은 암석화학적 연구를 실시하여 제주도의 화산활동을 5단계로 분류하였으며, 각 현무암들의 표식지를 인용한 암석명을 사용하여 분출순서를 정의하였다. 한편 Lee(1982)은 원종관과 유사하게 암석화학적 연구를 실시하여 제주도의 화산암류를 Alkali basalt-Hawaiite-Mugearite-Trachyte로 분류하고, 제주도의 화산활동사를 4단계로 대분하였다.

1980년도에 들어 이기화 외(1983)는 중력 및 지자기를 이용한 지구물리학적 연구를 최초로 실시하였으며, 원종선(1984)는 국내학자로는 처음으로 고지자기학적 연구를 실시하기도 하였다. 또한 이문원(1984)는 화산암류에 포획된 포획암을 연구함으로써, 제주 지하 하부지각 혹은 상부맨틀 물질에도 관심을 가지기 시작하였다. 더불어 이 시기에는 개별 화산체들, 특히 수성화산활동에 대한 연구들이 활발히 수행되기 시작하였으며(김동학 외, 1986; 김동학 외, 1988; 박일진, 1988; Chough & Sohn, 1990), 제주도 연안퇴적물(윤정수, 1985; 고기원, 1986; 윤정수, 1986; 윤정수 외, 1989)에 관한 연구들도 새롭게 시작되었다.

특히 Won et al.(1986)과 윤상규 외(1987)은 고지자기학적 연구 및 K-Ar연대측정을 실시함으로써 기존의 상대적 화산층서 파악에서 벗어나, 수치화된 연대자료를 바탕으로 한 화산활동 시기를 규명하려는 시도가 처음으로 시도되기 시작하였다. 1980년대에도 서귀포층에 대한 연구는 고생물학, 퇴적학, 고지자기학 등 다양한 분야에서 지속되었다(박근배, 1986; 유환수 외, 1986, 1987; 이은일, 1987; Yoon, 1988; 이의형, 1990).

3. 1990~2000년

1968년 제주도 지질도가 최초로 작성된 이후, 1990년대에 들어 새롭게 제주도 지질도가 작성되기 시작하였다. 지질도는 성산도폭(원종관 외, 1993), 표선도폭(원종관 외, 1995), 제주.애월(박기화 외, 1998), 모슬포.한림 도폭(박기화 외, 2000a), 서귀포.하효리 도폭(박기화 외, 2000b) 순으로 발간되었다. 이들 지질도들은 서로 다른 시기에 서로 다른 연구기관 및 연구자에 의해 작성되어 지질도들 간에 서로 불일치하는 문제를 낳기도 하였다.

이 시기에는 제주도 오름들 중 수성화산활동으로 형성된 송악산, 우도, 일출봉, 수월봉과 같은 수성화산체에 대한 연구가 활발히 진행되어, 화산활동 과정 및 화산쇄설물의 퇴적기작 등이 상세히 밝혀지게 되었다(Hwang et al., 1991; Sohn & Chough, 1992; 손영관, 1992; 황상구, 1992; 황상구 외, 1992; Sohn & Chough, 1993; 황상구, 1993; 황상구, 1998; 황상구, 2000). 또한 1960년대 이후 지속적인 지하수 연구와 시추작업으로 인해 축적된 자료들을 바탕으로 제주도 지하지질 분포에 대한 이해가 크게 증가되었다(고기원, 1991; 고기원, 1997; 손인석 외, 1998; 오진용 외, 2000). 특히, 고기원(1997)은 제주도 수문지질에 관한 연구조사 자료들을 수집 정리했을 뿐만 아니라, 지하수 시추공에 대한 지질검층, 지하수위조사, 수질조사 등을 실시하고, 제주도의 거시적인 지하지질구조를 포함하여 서귀포층과 지하수 부존형태와의 관계를 해석하였다.

화산암석학적 연구에 있어, 박준범(1994)은 암석화학적 연구를 통해 제주도 화산활동을 일으킨 마그마의 진화과정과 마그마를 형성시킨 맨틀근원물질에 대한 연구를 수행하였다. 그는 제주도 알칼리암류와 솔리아이트는 동질의 맨틀근원암이 서로 다른 정도의 부분용융을 거쳐 형성된 것으로 해석하였다. 또한, 장광화(1997)은 제주도 내 조면암류들에 대한 암석학적 연구를 실시하고, 제주도 남부지역의 조면암과 정상부 조면암에서 나타나는 차이는 마그마 근원지에서의 이질적인 차이뿐만 아니라, 지각에서의 마그마 정치 심도 차이 등에 기인함을 보고하기도 하였다. 최성희(1998)에 의해 현무암에 포획되어 운반된 초염기성암류들이 연구됨으로써, 제주도 지하의 상부맨틀에 대한 연구가 시작되었다. 그런가 하면, 송시태(2000)은 제주도 전역의 꽃자왈 지대를 체계적으로 연구하여, 꽃자왈 지대에 특징적으로 분포하는 아아 용암류 중의 암괴상용암류를 「꽃자왈용암류」로 명명할 것을 제안하였다.

4. 2000~2010년

이 시기는 제주도가 세계자연유산 등재 및 세계지질공원으로 인증된 시기로, 제주도 화산과 지질명소에 대한 관심도가 그 어느 때보다 높았던 시기이다. 이러한 사회적 관심과 분위기에 힘입어, 제주도 천연동굴에 대한 전반적인 조사가 실시되어 제주도 전역의 용암동굴 분포가 밝혀졌으며(문화재청, 2003), 용암동굴에 대한 형성과정과 특징들이 새롭게 조사되었다(황상구 외, 2005; 안웅산과 황상구, 2008, 안웅산과 황상구, 2009). 세계유산 등재를 위한 노력들은 한라산의 형성과정에 대한 관심으로도 이어져, 윤선 외(2001), 고정선 외(2003), 윤선 외(2005)의 연구들이 수행되었다.

Sohn and Park(2004)은 시추코아에서 나타나는 서귀포층의 특성을 기재하고, 서귀포층을 “제주도 화산활동 초기에 대륙붕환경에서 형성된 수성화산체(응회환과 응회구)와 이들 화산체가 침식되고 다시 퇴적되어 형성된 해성퇴적암 등으로 구성된다”라고 재정의 하였다. 이전까지 서귀포층이라는 명칭은 시추 시에 일련의 화석대가 나타나면 심도에 심도에 관계없이 서귀포층으로 기재되곤 했다(윤상규 외, 1987 재인용).

이 시기 뜨거웠던 지질학적 이슈 중 하나는 사계리 사람발자국 화석의 형성시기에 관한 것으로, 2004

년 학계에 보고된 이후 10여 년에 걸쳐 생성시기에 대한 논쟁이 계속되었다(조등룡 외, 2005; 김경수와 김정률, 2006; Kim et al., 2004; Kim et al., 2006; Cheong et al., 2006, Cheong et al., 2007; Kim et al., 2009; Kim et al., 2010). 이 시기 사람발자국 화석의 생성연대에 있어 논쟁이 계속된 것은 상세한 층서적 연구가 부족한 상황에서 단편적인 수치연대(numerical age)(Ar-Ar, OSL, radiocarbon dating 등)에 의존하여 퇴적연대를 해석하려 하였기 때문으로 여겨진다.

화산암석학에 있어서 Tatsumi et al.(2005)는 제주도 암석을 고알루미나 알칼리계열(high-alumina alkalic series), 저알루미나 알칼리계열(low-alumina alkalic series), 그리고 서브알칼리계열(sub-alkalic series)로 구분하고, 이들 용암류가 맨틀의 서로 다른 심도에서 서로 다른 정도의 부분용융으로 생성되었다고 보고하였다. Brenna et al.(2010)는 우도에 대한 암석화학적 연구를 통해 하나의 오름이 형성되는 과정에서 관찰되는 암석 화학조성 변화를 바탕으로, 제주도 지하에 서로 다른 깊이에서 서로 다른 성분의 마그마가 생성되고, 지표로 상승하는 과정에서 서로 다른 분화과정을 거쳤다는 보다 상세한 연구 결과를 소개 하였다.

5. 2010~현재

근래에는 다양한 연대측정기법의 적용과 암석화학적 연구들이 수행되어, 제주도 화산활동사에 대한 시공간적 차원의 3차원적인 프레임이 제시되었다. 고기원 외(2013)은 2001년부터 수집된 시추공 주상도자료, 시추공 및 노두 시료에 대한 Ar-Ar연대측정 결과를 바탕으로, 제주도 화산활동을 서귀포층을 층준으로 크게 퇴적동시대 화산활동기(약 1.88~0.5Ma)와 퇴적이후 화산활동기(0.5Ma~홀로세)로 구분하였다. 퇴적동시대 화산활동기는 서귀포층이 퇴적되는 동안 국지적이고 간헐적인 화산활동이 있었으며, 퇴적이후 화산활동기는 서귀포층 퇴적이 종료된 이후 전도에 걸친 활발한 화산활동이 있었던 것으로 해석하였다. 그런가 하면 Brenna et al.(2012, 2015)는 고지대 시추코아 시료에 대한 암석화학분석과 연대측정을 통해, 제주도 화산활동을 3단계로 구분하여 제시하였다. 특히 그는 각 단계별 마그마 생성 깊이, 맨틀 부분용융의 정도, 화산분출량에서의 변화를 시공간적으로 설명하고 있다. 또한 제주도 화산활동이 판내부의 열점활동과 관련된 것이라고 보아왔던 기존 관점(예, Lee, 1982; 박준범, 1994; Tatsumi et al., 2005)에서 벗어나, 제주도 화산활동이 섭입대에 인접한 지역에서의 지구조 응력의 변화에 의한 맨틀상승에 기인한 감압과 관계된 것으로 해석하였다.

특히 최근에는 연대학 분야에서 다양한 연구가 시도되었다. 기존에 암석을 직접 분석하여 연대를 얻었던 K-Ar, Ar-Ar연대측정법에서 벗어나, 고토양이나 탄화목과 같은 암석의 주변 물질을 분석하는 광여기루미네선스 연대측정, 방사성탄소연대측정 등의 연대측정법들이 폭넓게 적용되었다. 기존 연대측정법의 정밀도 개선과 새로운 연대측정법의 적용으로 2~5만년 이내의 매우 젊은 화산체(오름)들에 대한 연대들이 보고되고 있다(예, 이진영 외, 2014; 안웅산 외, 2015; 임재수 외, 2015; 김진철 외, 2016). 또한 이러한 연대측정법의 발달에 힘입어 제주도 화구호 내 퇴적물에 대한 고기후학적 연구들이 활발히 진행되고 있다(제주특별자치도 세계유산본부, 2016, 2017; Park et al., 2014).

이외에도 곳자왈의 성인과 지질적 특성에 관한 다양한 관점에서의 연구들이 진행되었으며(전용문 외, 2012, 2015; 박준범 외, 2014, 안웅산과 최형순, 2016), 화산활동 재해에 대한 연구들이 최근 조금씩 수행되고 있는 실정이다(윤성효와 장철우, 2016; 장철우와 윤성효, 2017).

Ⅲ. 제주도 지질학 발전을 위한 제언

1. 개별 오름에서부터 제주도 전역에 걸친 다양한 스케일의 연구 필요

하나의 단성화산체(오름)에 대한 최근의 연구결과들을 살펴보면, 하나의 단성화산체 형성과정에서 다양한 조성 및 광물구성을 가진 용암들이 분출하는 것으로 보고되고 있다(예, Brenna et al., 2010, Brenna et al., 2011; Neave et al., 2014). 뿐만 아니라, 하나의 단성화산체가 형성되는 동안에 여러 번의 화산활동 휴지기들이 존재하고, 그 결과 용암류의 흐름 혹은 화산쇄설물의 분출양상까지도 다양하게 변화하는 것으로 보고되고 있다(예, Heliker et al., 2003; Luhr, 2001; Pioli et al., 2008; Thomas et al., 1999). 제주도 전역에 걸친 화산활동사를 보다 구체적으로 규명하기 위해서는 개별 오름의 화산분출 특성과 성분변화 과정 등에 대한 보다 상세한 연구들이 선행되어야 할 것이다. 이러한 연구들을 토대로 기존의 지질도가 보완되고 재해석되어야 할 것이다.

2. 지속적이고 복합적인 연대분석

초기 제주도 연구들은 화산활동의 시기를 밝히기 위해 암석과 지층들의 상호 접촉관계와 퇴적층에 포함된 화석을 주로 연구하였다. 1920년대 서귀포층에 대한 고생물학적 연구가 시작된 이래 2000년대 초반까지 고생물학적 연구가 끊이지 않고 지속되었던 것은 이러한 이유에서 일 것이다. 앞서 언급한 것과 같이 1980년대 중반에 접어들어, 제주도 화산암 연대측정을 위해 K-Ar연대측정법이 적용되기 시작하였으며, 1990년대 후반부터는 Ar-Ar연대측정법에 의한 연대학적 연구들이 활발히 진행되어왔다. 최근에는 화산암 주변 물질을 통해 간접적으로 화산암의 연대를 추정하는 방사성탄소연대, 광여기루미네선스 연대측정법 등이 활발히 적용되고 있는 실정이다. 하지만 이들 연대측정법의 적용에는 제한이 따른다. 방사성탄소연대측정의 경우 해당물질에 연대측정에 적합한 유기물질이 존재하지 않거나, 혹은 해당물질의 연령이 4만년 이상으로 연대측정 범위를 벗어나는 경우 적용이 제한된다. 그런가 하면, K-Ar 혹은 Ar-Ar연대측정의 경우 대상물질에서 K(포타슘)이나 Ar(아르곤)이 빠져나가거나 혹은 과잉되는 경우가 발생할 수 있어, 풍화에 취약한 화산유리나 외래결정입자를 포함한 암석에는 적용이 제한된다. 그런가 하면 광여기루미네선스 연대측정의 경우 퇴적층내의 수분함량에 의해 루미네선스 신호에 변화가 생기거나 연간선량(dose rate)이 변화할 수 있다. 이러한 이유에서 지질학자들은 주요한 지질학적 의미를 가지는 지층에 대해 서로 다른 연대측정법을 적용하거나, 동일한 지층의 서로 다른 시료에 대해 서로 다른 연대측정법을 적용하게 된다. 그 결과는 오차범위 내에서 동일하거나 혹은 서로 일치하지 않는 경우도 발생한다. 이러한 이유에서 지질학자들은 주변 지역의 지질층서나 지질특징(예, 퇴적층의 구조, 해수면의 높이를 지시하는 퇴적층, 퇴적층 내의 화석 등) 등을 종합적으로 고려하여 가장 신뢰할 수 있는 연대결과를 도출해 내는 것이다. 연대측정법은 새로운 연대측정법 개발, 연대측정 장비의 발달, 기존 연대측정법의 개선 등으로 인해 그 정밀도가 개선될 뿐만 아니라, 과거에 측정 불가능한 시간 영역까지 측정이 가능해지고 있다. 새로운 연대분석법의 적용과 종합적인 연구를 지속적으로 추진해야 하는 이유이다.

3. 다양한 분야에 걸친 교류와 협력

“화산재연대학(tephrochronology)과 그 적용”이라는 논평을 쓴 Lowe(2011)은 “절대연대(absolute ag

e)"라는 용어보다는 "수치연대(numerical age)"라는 용어를 쓸 것을 제안했다. 위에서 잠시 언급한 것과 같이 연대측정법들은 각각 해당 측정법의 적용을 위한 가정 혹은 전제조건이나 제한사항이 있게 마련이다. 광여기루미네선스 연대측정의 경우, 퇴적물 속의 석영입자들은 퇴적되기 직전 충분한 시간동안 햇빛에 노출되어 기존에 석영결정 내에 축적되었던 에너지가 모두 지워졌다는 가정에서 시작한다(최정헌 외, 2004). 결국 자연계에서의 현상이 이러한 가정이나 전제조건을 부분적으로 충족할 경우, 그 결과는 지질사건의 절대적 시간을 지시하기 보다는 측정법에 의해 수치로 제시되는 시간인 것이다. 위에서 언급한 것처럼 연대측정기법의 보완과 개발로 수치연대는 보다 사실에 가까운 결과를 제공할 것이다. 사계리 사람발자국 화석의 형성시기에 대한 논쟁이 10여 년 간 지속되었지만, 결국 지표 지질조사와 암석화학적 분석을 통해 사람발자국 퇴적층 하부에 송악산 화산재층이 존재하는 것이 확인되고, 연대학적 연구를 통해 송악산 분출 연대가 종합적으로 밝혀지면서 그 형성시기가 보다 명쾌하게 규명되었다(안웅산 외, 2015; Sohn et al., 2015). 이러한 예에서 보듯 제주도 지질학의 발전을 위해서는 연대학, 암석학, 암석화학, 화산층서학, 퇴적학, 구조지질학 등 다양한 분야에서 교류와 협력을 통한 통섭적인 연구가 필요할 것이다. 필요에 따라서는 인문분야와의 협력도 필요할 것이다.

4. 시추코아 자료, 객관적 기재를 위한 메뉴얼

제주도에는 1960년대 이후 약 4천900여개 관정(2017년 5월 현황)이 지하수 개발 및 조사관측을 위해 허가되어 운영되고 있다. 지하수개발을 위한 시추작업으로 얻어지는 시추코아 자료는 제주도 지하지질을 파악할 수 있는 자료이다(고기원, 1997; 고기원 외, 2008; 고기원과 박준범, 2010a, 2010b; Brenna et al., 2012; Brenna et al., 2015). 시추작업으로 회수되는 암석코아를 모두 보관하는 것을 불가능하다. 하지만, 시추코아에 대한 객관적 기재와 사진 혹은 영상자료 등을 구축한다면, 관련된 다양한 분야에서의 연구에 활용될 수 있다. 시추코아 자료의 객관적 기재와 정보공유를 위해 적절한 시스템과 메뉴얼이 절실하다. 최근 제주특별자치도개발공사에서 시추코아 지질검층 지침서(고기원 외, 2017)가 발간된 바 있어, 향후 보다 상세하고 객관적인 시추코아 자료 구축에 기여할 것으로 기대된다.

5. 화산 모니터링과 화산재해에 관한 연구

2000년대 들어 국내외 화산학자들은 백두산 폭발 가능성에 깊은 관심을 가져왔다. 그 결과 화산폭발 예측을 위한 모니터링, 화산재해에 대한 대비 방안에 대한 다양한 지질학적 연구들이 활발히 진행중이다. 역사기록에 의하면 제주에는 지금으로부터 1천 년 전 화산활동이 있었던 것으로 추정된다. 하지만, 지금까지 제주에서 그 분출시기가 밝혀진 가장 최근의 화산활동은 송악산 분출로, 여러 연구에서 약 4천 년 전 형성된 것으로 추정된다(안웅산 외, 2015; Sohn et al., 2015). 이러한 사실들은 그리 멀지 않은 과거에 제주에 화산활동이 있었음을 지시하는 증거들인 것이다. 그런가 하면, 채석장 절개지에 드러난 수 매의 용암층 사이에 협재된 고토양층에서 약 1만3천년과 2만년의 퇴적연대가 각각 보고된 바 있다(안웅산과 최형순, 2016). 이러한 결과는 현재와 같이 화산활동이 없었던 시기들이 과거에도 반복적으로 존재했다는 것을 시사하는 것이다. 바꾸어 보면, 결국 미래의 어느 시기에는 또 다른 화산분출이 발생할 수 있음을 의미하는 것이다.

제주도는 1920년대 최초 지질학적 연구가 시작된 이후, 지금까지 제주도에 대한 대부분의 지질학적 연

구들은 과거의 화산활동에 초점이 맞추어져 있었다. 물론 과거의 화산분출 패턴과 양상을 정확히 아는 것도 중요하다. 하지만, 미래의 화산활동에 대한 예측과 그로 인해 발생할 수 있는 재해에 대한 대처방안을 연구하는 일도 매우 중요한 일일 것이다. 하와이 킬라우에아 화산지대의 푸오오 화산은 1983년 이래로 화산분출과 휴지기를 반복하며 화산활동을 지속해 왔다. 최근 2018년 5월 또 다시 하와이 킬라우에아 화산에서 많은 용암들이 분출하고 있다. 하와이와 같은 현무암질 화산활동의 경우, 화산분출 특성상 인명피해보다는 사회간접자본 및 사유재산에 대한 피해가 큰 편이다. 현무암질 화산활동이 주를 이루는 제주도의 경우도 이와 유사할 것으로 판단된다. 이런 이유에서 하와이와 같은 활화산 지대에 대한 연구가 함께 이루어진다면, 제주도의 과거 그리고 현재를 넘어 미래 제주도 지질학 발전에 큰 도움이 될 것이다.

IV. 결론

1920년대 일제 강점기 일본 지질학자들에 의한 지질학적 연구가 시작된 이후 오늘날까지 지속적으로 연구가 진행되었다. 1930년대 Haraguchi(1931)에 의해 최초로 제주도 화산활동사에 관한 모델이 제시된 이후, 1980년대 Lee(1982)에 의한 4단계 형성모델을 거쳐, 연대분석 및 암석화학에 기초한 고기원과 박준범(2013)과 Brenna et al.(2015)의 제주도 형성모델을 거치면서, 제주도의 형성과정이 시공간적 프레임 하에서 보다 입체적으로 제시되었다. 이러한 일련의 지질학적 발전과정은 화산암석학, 암석화학, 고생물학, 퇴적학, 구조지질학, 지구물리학, 응용지질학, 연대학 등 다양한 분야에서의 연구 결과들이 종합된 성과이다. 기술의 발달과 새로운 연구기법의 개발로 보다 다양한 연구가 수행될 수 있는 여건이 마련되었다. 향후 제주도 지질학 발전을 위해 새로운 연구기법의 적극적 도입, 서로 다른 연구분야 간의 교류와 협력, 각종 자료의 수집과 전수에 필요한 시스템 및 메뉴얼 마련 등의 노력이 필요할 것이다. 더불어 과거의 지질활동에 국한하지 않고 미래의 화산활동에 대한 모니터링과 화산재해 대처 방안에 대한 연구도 동반되어야 할 것이다.

참고문헌

- 고기원, 1986, 「제주남방해역 표층 퇴적물의 특성 및 퇴적환경」, 제주대학교 석사학위 논문.
- 고기원, 1991, 「제주도 서귀포층의 지하분포상태」, 『제주대학교 해양연구소 연구보고』, 15, 81-92.
- 고기원, 1997, 「제주도의 지하수 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성」, 부산대학교 박사학위논문.
- 고기원, 박준범, 2010a, 「제주도 지질과 화산활동에 관한 연구(3): 40Ar/39Ar절대연대자료에 근거한 제주도 형성 초기 용암 분출 기록」, 『자원환경지질』, 43, 163-176.
- 고기원, 박준범, 2010b, 「제주도의 지질과 화산활동에 관한 연구(2): 가파도와 마라도 화산암류의 암석학 및 40Ar/39Ar 절대연대」, 『자원환경지질』, 43, 53-66.
- 고기원, 박준범, 박윤석, 2008, 「제주도의 지질과 화산활동에 관한 연구 (I): 동부지역 저지대 시추코어 화산암류의 암석화학 및 40Ar/39Ar 절대연대」, 『자원환경지질』, 41, 93-113.
- 고기원, 박준범, 강봉래, 김기표, 문덕철, 2013, 「제주도의 화산활동」, 『지질학회지』, 49, 209-230.
- 고기원, 박준범, 손영관, 윤석훈, 2017, 『제주도 시추코어 지질검층 지침서』, 하나출판.
- 고정선, 윤성효, 강순석, 2003, 「제주도 한라산 백록담 분화구 일대 화산암류의 암석학적 연구」, 『암석학회지』, 12, 1-15.
- 김경수, 김정률, 2006, 「남제주 사람 발자국 화석을 포함한 지층의 층서와 지질 연대에 대한 고찰」, 『한국지구과학회지』, 27, 236-246.
- 김봉균, 1969, 「제주도 신양리 및 고산리 지구의 신양리층에 대한 층서 및 고생물학적 연구」, 『지질학회지』, 5, 103-121.
- 김동학, 황재하, 황상구, 김영범, 1986, 『제주도 화산활동 연구』, 한국동력자원연구소, KR-86-(B)-4, 1-35.
- 김동학, 황재하, 황상구, 최성자, 1988, 『제주도 화산활동 연구 (II): 제주도 서부지역의 화산층서와 분출사』, 과학기술처, KR-88-(B)-4, 49p.
- 김진철, 이진영, 홍세선, 임재수, 최한우, 2016, 「제주도 내도동 제 4 기 미고화 퇴적층의 형성시기」, 『지질학회지』, 52, 149-154.
- 문화재청, 2003, 『제주도 천연동굴 일제조사 보고서』, 제주: 이지콤, 263p.
- 박근배, 이의형, 백광호, 1986, 「제주도 서귀포층(플라이오-플라이스토세)산 개형층의 균질분석 및 고환경 해석」, 『고려대학교 이학논문집』, 27집, 133-147.
- 박기화, 이병주, 조등룡, 김정찬, 이승렬, 김유봉, 이한영, 조병욱, 장영남, 손병국, 2000a, 『서귀포·하효리 도폭 지질 보고서』, 제주도, 한국지질자원연구원.
- 박기화, 이병주, 조등룡, 김정찬, 이승렬, 김유봉, 최현일, 황재하, 송교영, 최범영, 1998, 「제주.애월도폭 지질보고서」, 제주도, 290p.
- 박기화, 조등룡, 김정찬, 2000b, 『모슬포. 한림도폭 지질보고서』, 한국자원연구소, 56p.
- 박일진, 1988, 「제주도 서해안의 응회구에 관한 연구」, 부산대학교 석사학위논문, 47p.
- 박준범, 권성택, 1994, 「제주도 화산암의 지화학적 진화」, 연세대학교박사학위논문, 305p.
- 박준범, 강봉래, 고기원, 김기표, 2014, 「제주도 꽃자왈지대의 지질 특성」, 『지질학회지』, 50, 431-440.
- 손인석, 이문원, 윤정수, 1998, 「제주화산도의 해수면하의 층서」, 『한국지구과학회지』, 19, 581-589.
- 송시태, 2000, 「제주도 암괴상 아아용암류의 분포 및 암질에 관한 연구」, 부산대학교 박사학위논문, 118p.
- 안웅산, 손영관, 강순석, 전용문, 최형순, 2015, 「제주도 꽃자왈 형성의 주요 원인」, 『지질학회지』, 51(1): 1-19.
- 안웅산, 손영관, 윤우석, 류춘길, 정종욱, 강창화, 2015, 「사람 발자국 퇴적층 하부의 테프라 유리 조성 연

- 조등룡, 박기화, 진재화, 홍완, 2005., 「제주도 하모리층에 발달하는 사람 발자국의 형성시기」, 『암석학회지』, 14, 149-156.
- 제주특별자치도 세계유산본부, 2016, 『한라산천연보호구역 지형식생기후 기초학술조사보고서』, 한국지질자원연구원, 554p.
- , 2017, 『한라산천연보호구역 지형식생기후 기초학술조사보고서』, 한국지질자원연구원, 614p.
- 최성희, 1998, 「Geochemical study of ultramafic xenoliths in basalts from Cheju Island, Korea
제주도의 현무암내에 포획되어 있는 초기염기성암에 대한 지구화학적 연구」, 서울대학교 이학박사학위논문, 203p.
- 최정현, 정창식, 장호완, 2004, 「석영을 이용한 OSL (Optically Stimulated Luminescence) 연대측정의 원리와 지질학적 적용」, 『지질학회지』, 40, 567-583.
- 황상구, 안웅산, 이문원, 윤성효, 2005, 「제주도 북동부 거문오름 용암튜브계의 형성과 내부구조」, 『지질학회지』, 41, 385-400.
- 황상구, 1992, 「우도응회구의 분출기구와 분출과정」, 『암석학회지』, 1, 91-103.
- , 1993, 「우도분화구에서의 일유희 화산과정」, 『광산지질학회지』, 26, 55-65.
- , 1998, 「제주도 당산봉 화산의 화산과정」, 『암석학회지』, 7, 1-14.
- , 2000, 「제주도 송악산 응회환·분석구 복합체의 화산형태」, 『지질학회지』, 36, 473-486.
- 황상구, 황재하, 김동학, Howells, M.F., 1992, 「제주도 송악산 응회환분석구의 화산과정」, 『지질학회지』, 28, 110-120.
- Brenna, M., Cronin, S.J., Kereszturi, G., Sohn, Y.K., Smith, I.E. and Wijbrans, J., 2015, "Intraplate volcanism influenced by distal subduction tectonics at Jeju Island", Republic of Korea. Bulletin of volcanology, 77(1): 1-16.
- Brenna, M., Cronin, S.J., Nemeth, K., Smith, I.E.M. and Sohn, Y.K., 2011, "The influence of magma plumbing complexity on monogenetic eruptions, Jeju Island, Korea", Terra Nova, 23 (2): 70-75.
- Brenna, M., Cronin, S.J., Smith, I.E., Sohn, Y.K. and Nemeth, K., 2010, "Mechanisms driving poly-magmatic activity at a monogenetic volcano, Udo, Jeju Island, South Korea", Contr. Mineral. and Petrol., 160(6): 931-950.
- Brenna, M., Cronin, S.J., Smith, I.E.M., Sohn, Y.K. and Maas, R., 2012, "Spatio-temporal evolution of a dispersed magmatic system and its implications for volcano growth, Jeju Island Volcanic Field, Korea", Lithos, 148(0): 337-352.
- Cheong, C.S., Choi, J.H., Sohn, Y.K., Kim, J.C. and Jeong, G.Y., 2007, "Optical dating of hydro magmatic volcanoes on the southwestern coast of Jeju Island, Korea", Quaternary Geochronology, 2(1-4): 266-271.
- Cheong, C.S., Choi, M.S., Khim, B.K., Sohn, Y.K. and Kwon, S.T., 2006, "230Th/234U dating of Holocene mollusk shells from Jeju Island, Korea, by multiple collectors inductively coupled plasma mass spectrometry", Geosciences Journal, 10(1): 67-74.
- Chough, S. and Sohn, Y., 1990, "Depositional mechanics and sequences of base surges, Songa ksan tuff ring, Cheju Island, Korea", Sedimentology, 37(6): 1115-1135.
- Haraguchi, K., 1931, Geology of Jeju Island. Bulletin on the geological survey of Chosen (Korea)

- a), 10, 1-34 (in Japanese).
- Heliker, C., Swanson, D.A. and Takahashi, T.J., 2003, The Pu'u O'o-Kupaianaha eruption of Kilauea Volcano, Hawai'i : the first 20 years. Professional Paper 1676, USGS.
- Hwang, S.-K., Hwang, J.-H., Kim, D.-H. and Howells, M.F., 1991, "Tuff cones and Tuff Rigns, and Their Stratigraphic Relationships on the Western Side of Cheju Island, Korea", *Jour.Korean Inst. Mining Geol*, 24(4): 399-408.
- Kim, C.B., Kim, J.Y., Kim, K.S. and Lim, H.S., 2010, "New age constraints for hominid footprints found on Jeju Island, South Korea", *Journal of Archaeological Science*, 37(12): 3338-3343.
- Kim, J.Y., Kim, K.S., Lee, C.Z., Lim, J.D., 2004, "Occurrence of hominid and other vertebrate footprints of Jeju Island, Korea", In: Kim, J.Y., Kim, K.S., Park, S.I., Shin, M.K. (Eds.), *Proceedings of International Symposium on the Quaternary Footprints of Hominids and Other Vertebrates*, Namjejugun, Jeju, pp. 1-26.
- Kim, K.S., Kim, J.Y., Kim, S.H., Lee, C.Z. and Lim, J.D., 2009, "Preliminary report on hominid and other vertebrate footprints from the late Quaternary strata of Jeju Island, Korea", *Ichnos*, 16(1-2): 1-11.
- Lee, M.W., 1982, "Petrology and Petrochemistry of Jeju volcanic island, Korea", *Sci Rep., Tohoku Univ., Ser.*, 315, 521-541.
- Lowe, D.J., 2011, "Tephrochronology and its application: A review", *Quaternary Geochronology*, 6(2): 107-153.
- Luhr, J., 2001, "Glass inclusions and melt volatile contents at Paricutin Volcano, Mexico", *Contrib. Mineral. and Petrol.*, 142(3): 261-283.
- Nakamura, S., 1925, "Geographical and geological notes of SaishU-to (Quelpart Island), Korea. *Chikyu (Earth)*", 4, 325-336 (in Japanese).
- Neave, D.A., MacLennan, J., Hartley, M.E., Edmonds, M. and Thordarson, T., 2014, "Crystal storage and transfer in basaltic systems: the Skuggafjoll eruption, Iceland", *Journal of Petrology*, 55(12): 2311-2346.
- Park, J., Lim, H.S., Lim, J., Yu, K.B. and Choi, J., 2014, "Orbital and millennial scale climate and vegetation changes between 32.5 and 6.9 k cal a BP from Hanon Maar paleolake on Jeju Island, South Korea", *Journal of Quaternary Science*, 29(6): 570-580.
- Pioli, L., Erlund, E., Johnson, E., Cashman, K., Wallace, P., Rosi, M. and Granados, H.D., 2008, "Explosive dynamics of violent Strombolian eruptions: The eruption of Paricutin Volcano 1943-1952 (Mexico)", *Earth and Planetary Science Letters*, 271: 359-368.
- Sohn, Y. and Chough, S., 1992, "The Ilchulbong tuff cone, Cheju Island, South Korea", *Sedimentology*, 39(4): 523-544.
- Sohn, Y.K. and Chough, S.K., 1993, "The Udo tuff cone, Cheju Island, South Korea: transformation of pyroclastic fall into debris fall and grain flow on a steep volcanic cone slope", *Sedimentology*, 40: 769-786.
- Sohn, Y.K. and Park, K.H., 2004, "Early-stage volcanism and sedimentation of Jeju Island revealed by the Sagye borehole, SW Jeju Island, Korea", *Geosciences Journal*, 8(1): 73.

- Sohn, Y.K., Yoon, W.S., Ahn, U.S., Kim, G.B., Lee, J.H., Ryu, C.K., Jeon, Y.M. and Kang, C.H., 2015, "Stratigraphy and age of the human footprints-bearing strata in Jeju Island, Korea: Controversies and new findings", *Journal of Archaeological Science: Reports*, 4: 264-275.
- Taneda, S., Tsuji, K. and Nakamura, M., 1970, "Geological, petrological and paleomagnetic studies on the volcanic rocks of Cheju Island", *Bulletin of Volcanological Society of Japan*, 2 (15): 96-108
- Tatsumi, Y., Shukuno, H., Yoshikawa, M., Chang, Q., Sato, K. and Lee, M.W., 2005, "The Petrology and Geochemistry of Volcanic Rocks on Jeju Island: Plume Magmatism along the Asian Continental Margin", *Journal of Petrology*, 46(3): 523-553.
- Thomas, L.E., Hawkesworth, C.J., Van Calsteren, P., Turner, S.P. and Rogers, N.W., 1999, "Melt generation beneath ocean islands: a U-Th-Ra isotope study from Lanzarote in the Canary Islands", *Geochimica et cosmochimica acta*, 63(23-24): 4081-4099.
- Won, J., Matsuda, J.-i., Nagao, K., Kim, K. and Lee, M., 1986, "Paleomagnetism and radiometric age of trachytes in Jeju Island, Korea", *Journal of Korean Institute of Mining Geology*, 19: 25-33.
- Yokoyama, M., 1923, "On some fossil shells from the Island of Saishu in the strait of Tsushima", *Journal of the College of Science, Imperial University of Tokyo*. 44, 1-9.
- Yoon, S., 1988, "The Seoguipo molluscan fauna of Jeju island, Korea", *Prof. Tamio Kotaka Commemorative Volume on Molluscan Paleontology*.