



통영 옥지도 주변 화산암류의 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대측정과 층서적 의미

황상구¹ · 이소진¹ · 송교영^{2,*} · 이기욱³

¹안동대학교 지구환경과학과

²한국지질자원연구원 국토지질연구본부

³한국기초과학지원연구원 지구환경연구부

요 약

통영 남부 옥지도 주변 화산암류는 하부 안산암질암류(주사산아층군), 중부 운문암질암류(운문사아층군)와 상부 안산암질암류(옥지아층군)로 구분된다. 이들 중에 운문사아층군에 대한 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대측정을 실시함으로써 분출시기와 층서관계를 확실하게 하였다. 운문사아층군은 야포각력암, 자부포옹회암, 사이도층, 노대도옹회암과 갈도옹회암으로 분류된다. SHRIMP 저어콘 U-Pb 측정에 의하면, 자부포옹회암은 82.06 ± 0.55 Ma ($n=14, 2\sigma$)에 집중되는 일치곡선 연대를 나타내고 노대도옹회암은 81.30 ± 0.54 Ma ($n=14, 2\sigma$)에 집중되는 일치곡선 연대를 나타내며, 갈도옹회암은 80.43 ± 0.53 Ma ($n=15, 2\sigma$)에 집중되는 일치곡선 연대를 나타낸다. 이들 자료는 옥지도 주변에서 일어났던 각 응회암의 분출시기를 확실하게 하며 운문사아층군의 연대층서를 나타낸다. 그리고 이들 연대는 유천소분지 중앙부의 운문사아층군 연대 범위에 속하므로 이 소분지에서 시간층서 뼈대를 세우는데 중요한 역할을 할 것이고 먼 지역 간의 층서대비를 가능하게 한다.

주요어: 유천소분지, 운문사아층군, SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대측정, 분출시기, 연대층서

Sang Koo Hwang, So-Jin Lee, Kyo-Young Song and Keewook Yi, 2018, SHRIMP Zircon U-Pb dating and stratigraphical implication of the volcanic rocks around Yokjido Island, Tongyeong, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 54, no. 3, p. 269-280

ABSTRACT: Volcanic rocks around the Yokjido Island, southern Tongyeong, are divided into the lower andesitic rocks (Jusasan Subgroup), middle rhyolitic rocks (Unmunsa Subgroup) and upper andesitic rocks (Yokji Subgroup). We ensured the eruption ages and stratigraphic relationships of the Unmunsa Subgroup based on SHRIMP zircon U-Pb datings for zircons from volcanic rocks of the Subgroup. The Subgroup can be classified into the Yapo Breccia, Jabupo Tuff, Saido Formation, Nodaedo Tuff and Galdo Tuff. The SHRIMP zircon U-Pb dating yield the concordia ages of 82.06 ± 0.55 Ma for the Jabupo Tuff, 81.30 ± 0.54 Ma for the Nodaedo Tuff and 80.43 ± 0.53 Ma for the Galdo Tuff. These data confirm the emplacement ages of each unit and display a chronosequence of the Unmunsa Subgroup around the Yokjido Island. Because the ages have a range of the Unmunsa Subgroup in the Yucheon subbasin, they might have a significant role to establish a chronostratigraphic framework and could make a stratigraphic correlation among far regions in the subbasin.

Key words: Yucheon subbasin, Unmunsa Subgroup, SHRIMP zircon U-Pb dating, eruption age, chronosequence

(Sang Koo Hwang and So-Jin Lee, Department of Earth and Environmental Science, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea; Kyo-Young Song, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea; Keewook Yi, Korea Basic Science Institute, Ochang 28819, Republic of Korea)

1. 서 언

경상분지에서 백악기 후엽으로부터 고신기(Paleogene)

초엽까지의 마그마성 에피소드는 강력한 화산작용으로 특징지어지고 심성작용이 결부되어있다(Kim, 1996; Hwang, 2012). 경상분지의 화산암류와 심성암

* Corresponding author: +82-42-868-3046, E-mail: kysong@kigam.re.kr

류는 광역적으로 아시아대륙 동변부를 따라 마그마 벨트로서 경상호를 형성하고 있다(Hwang and Kim, 1994a; Chough and Sohn, 2010).

이들 화산암류와 심성암류는 대부분 유천소분지에서 집중적으로 산출되고 지역적으로 복합체를 형성하며, 특히 화산암류는 매우 복잡한 화산층서를 나타낸다. 이 화산암류는 비록 많은 연구가 수행되었지만(예, Hwang and Kim, 1994a, 1994b; Hwang, 1996; Hwang and Cheong, 1998; Chough and Sohn, 2010; Hwang, 2012), 그 화산층서와 마찬가지로 분출시기와 같은 많은 미해결 문제들이 남아있다. 중요한 이슈 중의 하나는 암질에 의한 지역적 층서를 광역적으로 대비하기 위해 많은 어려움이 있기 때문에 화산암의 정확한 분출 연대를 측정하는 것이다.

화산작용은 간헐적으로 측정된 K-Ar, Rb-Sr과 소량의 U-Pb 연대에 기초하여, 110~50 Ma로 평가되어 있다(Shin and Jin, 1995; Kim *et al.*, 2005). 그러나 이들 연대의 얼마는 신뢰성이 의심되는 것으로 생각된다. 예를 들면, K-Ar의 낮은 폐쇄온도는 화산암류의 경우 냉각속도가 빠른 점을 감안하더라도 화산작용 시기를 나타낸다고 보기 어렵고, Rb/Sr 동위원소비의 좁은 범위는 Rb-Sr 동위원소 연대에서 큰 오차를 내포하고 있다. 그러므로 경상분지에서 산출되는 화산암류의 층서대비는 신뢰성있는 저어콘 U-Pb 연대측정에 따라 체계적 시간층서 연구가 가장 중요한 과제이다.

유천소분지 화산암류는 최근에 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대측정 결과에 의하면 밀양지역에서 백악기 후엽 94.4±0.8 Ma에서 78.4±1.5 Ma 시기에 순차적으로 분출한 것으로 밝혀지면서(Zhang *et al.*, 2012), 백악기 후엽 화산암류의 분출시기 뿐만 아니라 이들의 층서대비는 주요 연구대상이 되었다.

유천소분지 남부의 옥지도 주변은 경상분지의 최남단에 위치하며, 백악기 후엽의 화산암류가 집중적으로 분출한 후에 심성암류가 관입하고 있는 양상을 보이는 지역이다. 옥지도 주변의 화산암류는 하부로 부터 백악기 후엽의 화산암류인 안산암질 및 유문암질의 화성쇄설암과 용암이 주로 분포하고 중간에 퇴적층을 얇게 협재한다(Hwang *et al.*, 2016).

통역 옥지도 주변은 옥지도, 하노대도, 상노대도와 같도를 중심으로 수많은 섬들로 이루어진 도서지역으로서(그림 1), 주로 다양한 화산암으로 구성되지만

외해에 멀리 떨어져 있고 층서가 구분되지 않은 관계로 암석학, 화산학, 연대측정 연구가 거의 이루어지지 않았다. 그러나 최근에 도폭지질조사로 복잡한 지질에 대한 화산층서가 확립되었지만 이를 뒷받침할 수 있는 연대자료가 거의 없었다.

따라서 이 연구에서는 옥지도 주변의 화산암류에 대하여 다른 연구의 선결 과제로서 먼저 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대측정을 바탕으로 분출시기를 정확하게 밝히고 유천소분지에서 다른 지역의 화산암류와 층서대비를 하는데 목적을 두었다.

2. 연구방법

옥지도 주변의 화산암류에 대한 층서정립을 위해 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대측정을 실시하였다. 이를 위해 분석용 시료는 야외에서 채취한 각 암층을 대표할 수 있는 신선한 시료를 기준으로 선택되었다. SHRIMP U-Pb 연대측정을 위해 대표 암석을 파쇄하여 실체현미경에서 저어콘을 분리하였다. 유문암질암류는 저어콘 분리가 가능했고 안산암질암류는 여러 차례 시도하였지만 저어콘을 분리하지 못했다.

저어콘 분리는 파쇄작업, 수세식 팬닝, 중액법과 자성분리법의 절차에 따라 수행되었다. 먼저 대표시료는 실험실에서 1차로 파쇄기로 파쇄하고 2차로 분쇄기로 더 잘게 분쇄한 후, 표준 망체를 이용하여 120~180 메쉬 사이의 입자를 회수하였다. 회수된 입자는 비커에 넣어 물을 이용해 팬닝하고 자석으로 자성광물을 제거하여 중광물을 농집시켰다. 실체현미경에서 잔류 중광물 입자들 중에 핀셋으로 저어콘 입자만을 골라냈다. 분리한 저어콘들은 표준물질과 함께 에폭시몰드에 심어 마운트를 만들었다. 저어콘 마운트는 입자가 반쯤 드러날 때까지 사포로 갈아낸 후 다이아몬드 연마제로 광택이 나도록 표면을 연마하였으며, 마지막으로 금으로 코팅하였다.

마운트는 한국기초과학지원연구원 오창본원에서 음극선발광(CL; Cathodoluminescence) 장치를 부착한 주사전자현미경(JEOL JSM-6610LV 모델)을 이용하여 개별 저어콘 입자에 대해 음극선발광과 후방산란전자(BSE; Backscattered Electron) 영상을 촬영하였고 분석 위치를 선정하였다.

저어콘의 연대측정은 오창본원에서 SHRIMP IIe를 이용하였다. U-Pb 분석은 일차 이온빔으로 산소

음이온(O₂)을 이용하였으며, 이때 이온빔의 직경은 25 μm이고 세기는 4-6 nA이었다. 저어콘 표준물질 FC-1과 SL13과 비교하여 U 함량측정과 U/Pb 연대 보정을 실시하였다. 기기작동과 자료처리절차는 Williams (1998)과 Ireland and Williams (2003)의 방법을 적용하였다. 측정된 분석자료는 SQUID version 2.5 및 Isoplot/Ex v. 3.6 (Ludwig, 2008, 2009)을 이용하여 연대계산을 하였다.

3. 지질개요

옥지도 주변의 화산암류는 경상분지 남부의 유천소분지 최남단 경계부에 위치한다. 이 지역은 한반도에서 백악기에 발달하는 북동-남서 방향의 여러 화산호들 중에서 경상분지 남동부에 발달하는 경상호의 전면부에 해당하는 곳이다(Hwang, 2012).

이 지역의 화산암류는 백악기 후엽의 유천층군 화

산암류로서 안산암질 각력암, 용결응회암과 용암이 주로 분포하고 그 중간에 유문암질 내지 유문데사이트질 용결응회암을 협재하고 있다.

이 화산암류의 층서는 하부로부터 크게 하부 안산암질암류(주사산아층군), 중부 유문암질암류(운문사아층군)와 이를 부정합으로 덮는 상부 안산암질암류(옥지아층군)로 구분되며, 이를 불국사 관입암군의 심성암류와 암맥류가 관입하고 있다(Hwang *et al.*, 2016).

옥지도 북동부에서 주사산아층군의 상부층들은 북서-남동 방향으로 놓이고 남서쪽으로 경사지며, 옥지도 동부를 지나는 운문사아층군은 대체로 옥지도 북쪽을 지나 서쪽으로 연결되는 환상분포를 이루며, 대체로 옥지도 천황산을 중심으로 향심 구조를 나타낸다. 이는 후기 유문암질 화산작용과 안산암질 화산작용의 중심분출로 인해 화산체가 높게 형성됨으로써 하중에 의해 나타나는 소규모의 얇은 분상구조로 해

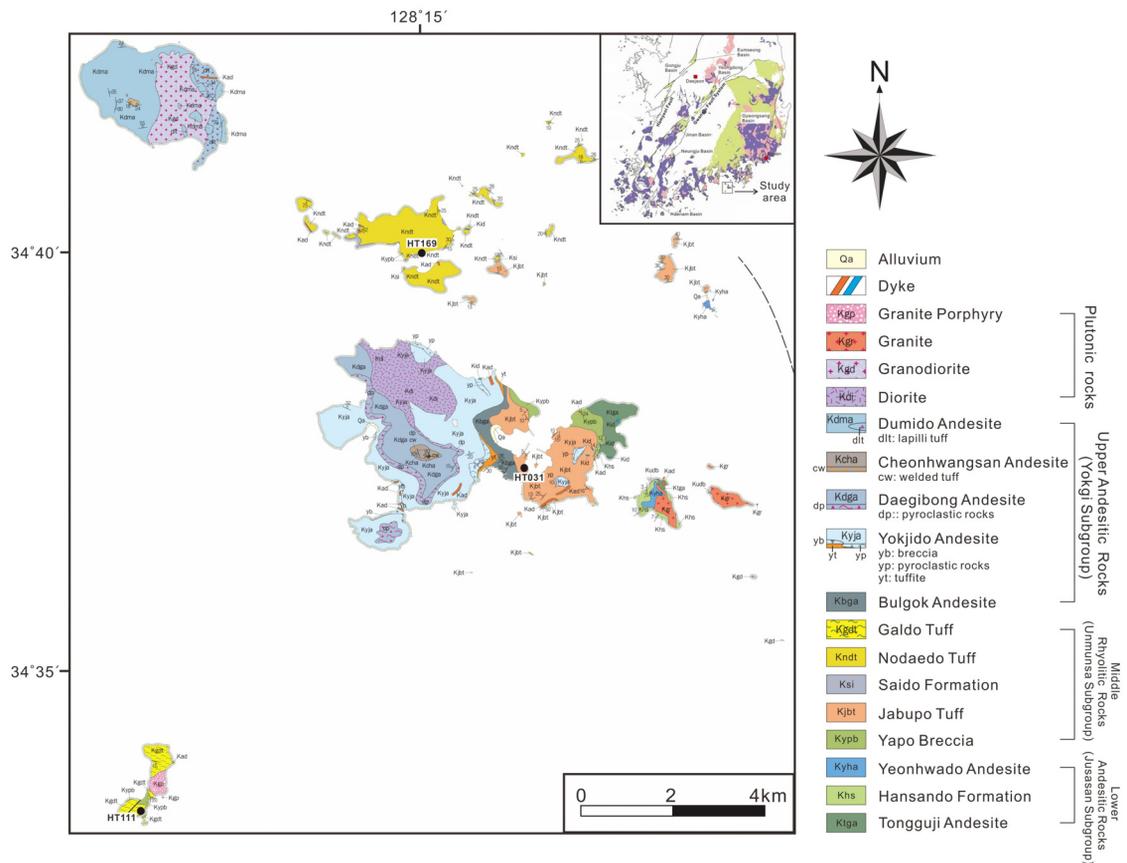


Fig. 1. Geological map around the Yokjido, showing sample locations of the present study together.

석된다(Hwang *et al.*, 2016). 결과적으로 육지도 주변에서 화산층서가 남서쪽을 향해 주사산아층군, 운문사아층군과 육지도 남서부에서 육지아층군 순으로 놓인다.

각 아층군을 암상에 따라 더 분류하면, 주사산아층군은 통구지안산암, 한산도층과 연화도안산암으로 구분되고, 운문사아층군은 야포각력암, 자부포응회암, 사이도층, 노대도응회암과 갈도응회암으로 구분되며, 육지아층군은 불곡안산암, 육지도안산암, 대기봉안산암, 천황산안산암과 두미도안산암으로 구분된다(그림 1; Hwang *et al.*, 2016).

4. 운문사아층군 화산암류

4.1 야포각력암

야포각력암은 육지도 북부와 북동부에 주로 분포한다. 이 층서단위는 주사산아층군과 운문사아층군 사이에 존재하는 화산각력암을 통칭한다.

이 암층은 대개 각력암과 응회각력암에 해당하는 경우가 많으며 상부로 갈수록 라필리응회암을 이루는 것도 있다. 암편은 대부분 녹회색 비반상 및 반상안산암질이고 간혹 암갈색 안산암이며 크기가 2~20 cm로서 라필리에서 암괴에 해당되고 최고 35 cm 암괴를 가진다(Hwang *et al.*, 2016). 또한 부석을 함유하고 화산회 기질로 채워진다. 상부에서 라필리응회암은 괴상을 나타내며, 암편, 부석편, 결정립들이 세립질 화산회 기질에 지지되어 있고 불량한 분급을 보여준다. 부석편은 암회색을 띠고 측방으로 편평화되어 있으며 부분적으로 용결엽리를 나타낸다(Hwang *et al.*, 2016).

4.2 자부포응회암

자부포응회암은 주로 육지도 북부와 북동부에 분포하고 북쪽의 여러 섬들에도 분포한다. 이 암층은 야포각력암 위에 놓이고 불곡안산암에 의해 덮이며, 최고 약 250 m 두께를 가진다.

이 응회암은 대부분 사장석 반정을 다량 함유하고 석영반정을 소량 함유하며 화학적으로 유문암질에 속한다(Hwang *et al.*, 2016). 이 암층은 대개 녹회색 내지 암회색을 나타내고 입도에 의하면 응회암에서 라필리응회암으로 구성된다. 구성원은 결정립과 부석편이 풍부하고 드물게 안산암편을 함유한다. 결정

립은 파편상이며 대부분 유백색 사장석 반정이지만 소량의 석영 반정과 드물게 각섬석이 포함된다. 부석편은 암회색 내지 암녹색을 나타내며 심하게 압착 신장되어 뚜렷한 완배열상 석리(eutaxitic fabric)를 나타내고 용결엽리를 보여준다(그림 2a).

현미경하에서 부석들은 대부분 기공이 거의 관찰되지 않고 대개 용결작용으로 인해 렌즈 모양의 피아메로 압착되어 있으며 암회색 내지 흑색을 나타낸다. 또한 이 부석들은 결정이나 암편 주위로 비껴가며, 간혹 그 끝부분이 기공이 심하게 편평화되고 신장되어 들쭉날쭉한 끝을 남긴다(그림 2b). 기질은 샤아드들이 편평화되어 뚜렷한 완배열상 석리를 나타내며, 부석보다 반정 함량이 대체로 더 많다. 관찰되는 광물군은 사장석, 석영, 알칼리장석, 자철석, 각섬석, 흑운모, 저어콘, 인회석 순으로 함유된다.

4.3 사이도층

사이도층은 사이도 북부와 하노대도 북서부 해안에 소규모로 노출된다. 이 층은 자부포응회암 위에 놓이고 노대도응회암에 의해 덮이며, 약 30 m 정도의 두께를 가진다(Hwang *et al.*, 2016).

하부는 회백색 내지 담청색 응회질사암 및 회색 세일층으로 구성되고 중부는 벌카니언(vulcanian) 각력암과 충상 써지(surge)응회암층으로 구성되며, 상부는 암회색 내지 담회색 세일 및 사암층으로 구성된다. 이들은 평행층리를 발달시키며 측방으로 연장이 좋다. 벌카니언층은 기저부에 흔히 봄색(bomb-sag) 구조를 발달시키고 하부에는 무장라필리(armored lapilli)층을 협재한다(Hwang *et al.*, 2016).

4.4 노대도응회암

노대도응회암은 하노대도와 상노대도에 분포한다. 이 암층은 사이도층 위에 놓이고 아마도 갈도응회암에 의해 덮이며, 100 m 이상의 두께로 추정된다. 노대도응회암은 대부분 갈회색 내지 회색을 띠며, 대부분 응회암과 라필리응회암으로 구성되고 하부에 소량으로 응회각력암을 가지며 기저에 국지적으로 각력암을 가진다(Hwang *et al.*, 2016).

이들은 부석편, 결정립과 암편들이 세립질 화산회 기질에 지지되어 있으며 매우 불량한 분급을 나타낸다. 부석편은 대부분 용결작용으로 압착된 피아메를 이루고 있다. 결정립은 대부분 사장석 반정으

로 구성되고 소량으로 석영을 함유한다. 피아메들은 샤아드와 함께 심한 용결작용과 편평화로 인해 완배열상 석리를 보여준다(그림 2c).

경하에서 이 응회암은 파리질 기질에 결정립, 부석편과 암편을 관찰할 수 있다. 결정립들은 주로 사장석, 석영, 알칼리장석, 각섬석, 흑운모와 자철석 순

으로 구성되며, 매우 드물게 저어콘과 인회석을 포함한다. 부석편은 종종 그 내부가 탈파리화작용에 의해 석영과 알칼리장석 미정으로 불구칙하게 결정화되어 있다(그림 2d). 기질은 주로 파리질 샤아드(vitric shard)로 구성되며 용결되어 희미한 완배열상 석리를 나타낸다.

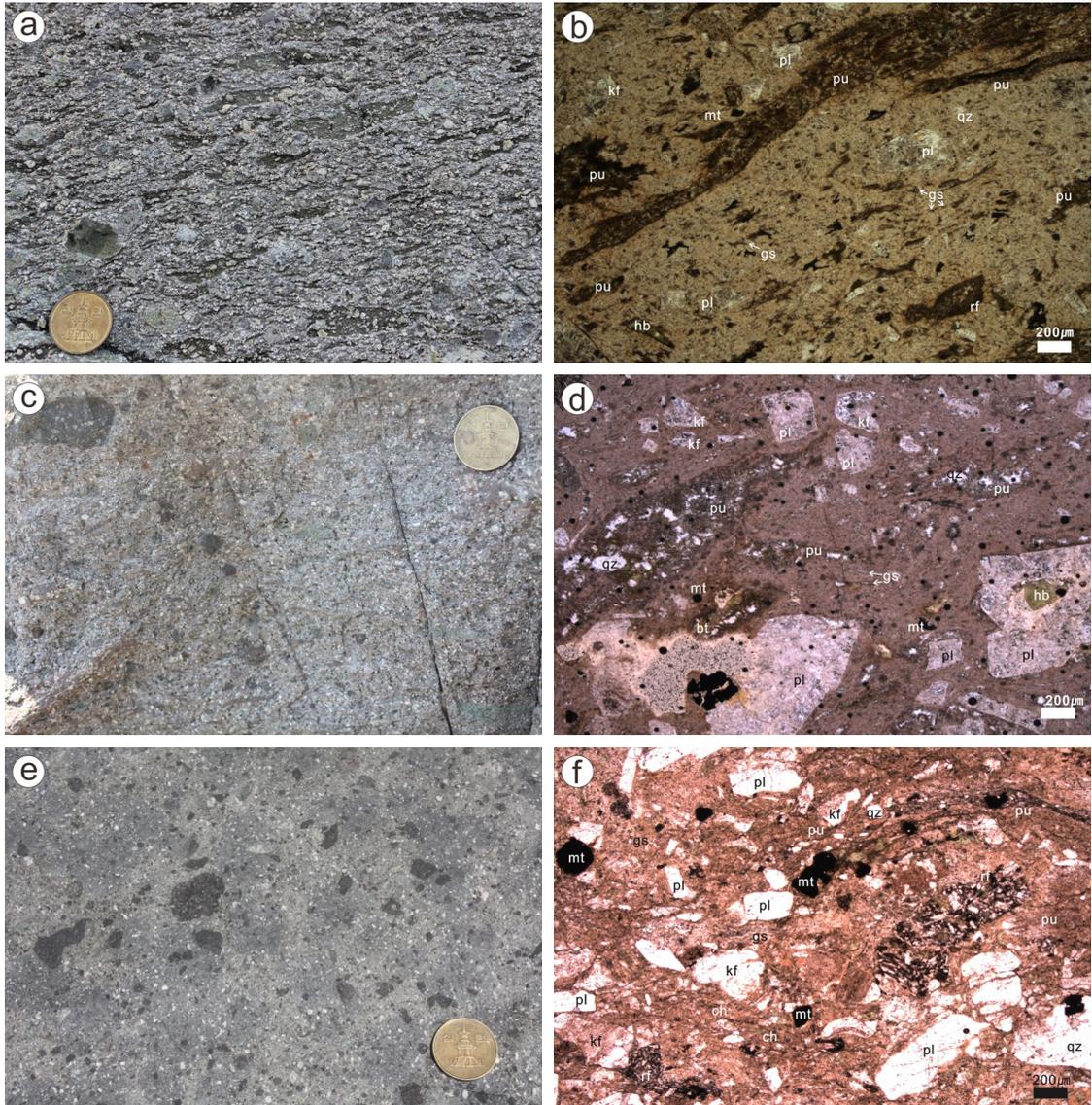


Fig. 2. Outcrop photographs and photomicrographs showing representative lithology and petrography of the volcanic rocks around the Yokjido. (a) Outcrop photograph and (b) photomicrograph of the Jabupo Tuff, (c) Outcrop photograph and (d) photomicrograph of the Nodaedo Tuff, (e) Outcrop photograph and (f) photomicrograph of the Galdo Tuff. Abbreviations are as follows: pl, plagioclase; kf, alkali feldspar; qz, quartz; hb, hornblende; bt, biotite; mt, magnetite; ch, chlorite; pu, pumice; gs, vitric shard.

4.5 갈도응회암

갈도응회암은 오로지 갈도에만 분포하며, 안산암질 각력암 위에 놓이고 두께가 약 120 m에 달한다. 이 응회암은 유문데사이트질에 속하며 대부분 유백색에서 회색으로서 입도가 응회암에서 라필리응회암에 속한다. 부석편이 드물고 암편이 풍부하며 화쇄류 단위의 하부에 암편이 밀집되어 암편질 각력암을 형성한다(Hwang *et al.*, 2016).

갈도응회암은 용결도에 따라 하부로부터 비용결대(nonwelding zone), 부분용결대, 치밀용결대로 구분된다. 용결도는 용결대 간에 매우 점이적이며 앞의 두 응회암층에 비해 가장 약하여 부분용결대가 우세한 편이다. 부분용결대는 비용결대 위에 산출되며 담회색, 회색, 녹회색 등으로 불규칙한 색깔을 나타내며, 유리질 샤아드와 부석이 약간 편평화된 것이 특징이다(그림 2e).

치밀용결대는 경하에서 파리질 기질에 결정립, 부석편과 암편들의 종류와 조직을 더 자세하게 알 수 있다(그림 2f). 결정립은 주로 사장석, 석영, 알칼리장석, 자철석과 흑운모 순으로 구성되고, 매우 드물게 저어콘과 인회석이 포함된다. 부석편은 심하게 압

착되어 있고 외연부가 탈파리화작용으로 석영과 알칼리장석 미정으로 생성되어 있다. 기질은 주로 파리질 샤아드로 구성되며 이들은 용결작용으로 심하게 압착되고 미세한 석영 및 알칼리장석으로 탈파리화되어 있다. 한편 기질은 부분적으로 녹니석으로 변질되어 있다(그림 2f).

5. 연대측정 결과

연대측정은 자부포응회암, 노대도응회암과 갈도응회암을 대상으로 수행하였다. 각 저어콘은 형태와 내부구조가 약간씩 다른 특징을 보여주며, 저어콘 입자의 진동누대 부분에서 각 1점씩 점분석으로 연대측정이 실시되었다(그림 2).

자부포응회암 시료(HT031)에서 분리한 저어콘들은 자형 주상으로 산출되며, 음극선발광(Cathodoluminescence, CL) 영상에서 진동누대를 발달시키고 내부에 상속핵을 가지지 않는다(그림 3). 14개 저어콘 입자에 대한 U과 Th 농도는 각각 197~710 ppm과 93~733 ppm이고, Th/U 비는 0.43~1.13 범위이며, Th/U 비가 1인 선을 따라 직선상 분포를 보여준다(그림

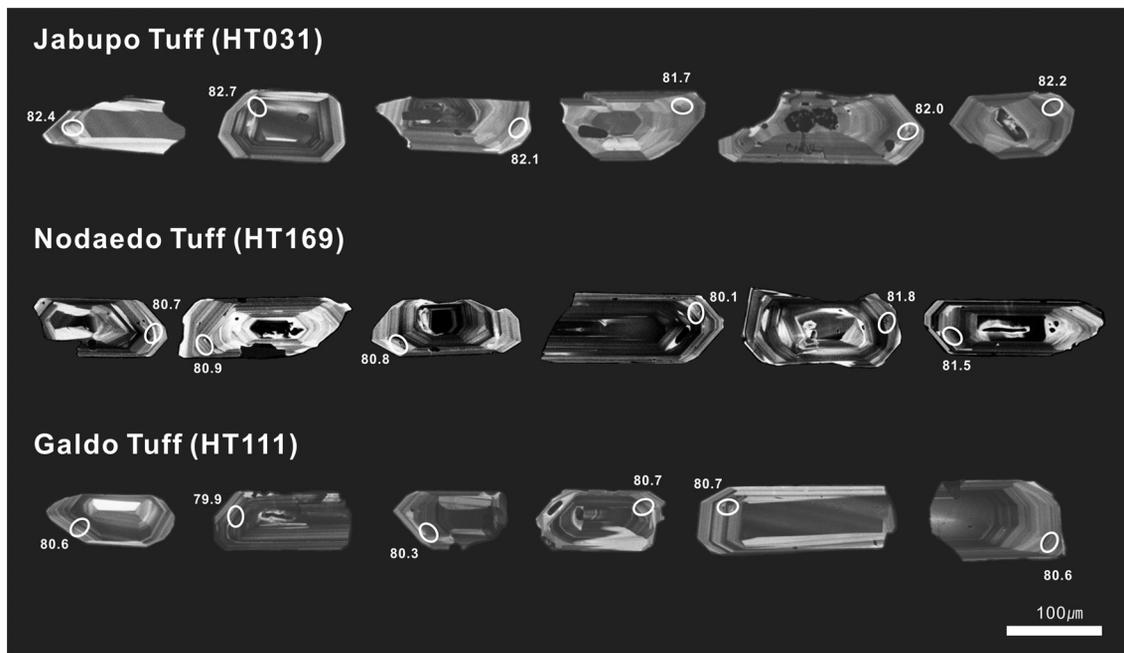


Fig. 3. Representative Cathodoluminescence images of the analysed zircon grains, showing the location of analytical spots and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages in Ma, separated from the Jabupo Tuff (HT031), Nodaedo Tuff (HT169) and Galdo Tuff (HT111).

4). 높은 Th/U 비는 형태 및 내부구조와 함께 마그마에서 성장한 저어콘의 특징을 나타낸다(Vavra *et al.*, 1999; Hartman *et al.*, 2000). SHRIMP U-Pb 연대측정 결과 14개 분석치는 80.3 Ma에서 84.0 Ma로 매우 좁은 범위의 겹보기 연대를 나타내며(표 1), 모두 일치곡선(concordia) 상에서 의미있는 연대군을 보여준다(그림 5a). 이들을 통계적으로 처리하면 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 가중평균연대는 82.06 ± 0.55 Ma (MSWD=1.5)로 각각의 저어콘 입자들이 비교적 일정한 연대군을 갖는데(그림 5a), 이는 이 응회암의 정치연대로 해석된다.

노대도응회암 시료(HT169)에서 나온 저어콘은 자형의 주상 내지 장주상이며, CL 영상에서 심한 진동누대를 발달시키고 덧성장을 나타내는 상속핵을 가지지 않는다(그림 3). 15개 저어콘 입자의 U 농도는 각각 233~564 ppm로 높고, Th 농도는 90~435 ppm로 비교적 높은 편이며 Th/U 비는 0.39~0.95 범위이다(표 1). 이러한 비는 대체로 Th/U 비가 1인 선을 따라 직선상 분포를 보여주는데(그림 4), 이는 외형 및 내부구조와 함께 일반적인 화성기원을 나타낸다. 15개 분석치는 78.3 Ma에서 83.0 Ma 겹보기 연대 범위를 낳으며(표 1), 가장 젊은 연대치를 제외한 14개 분석치는 모두 일치곡선 상에서 의미있는 연대를 나타낸다. 이 14개 분석치를 통계적으로 처리하면 가중평균 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 연대는 81.30 ± 0.54 Ma (MSWD=1.8)를 갖는 연대군을 형성하는데(그림 5b), 이는 이 노대도응회암의 정치연대로 해석된다.

갈도응회암 시료(HT111)에서 분리한 저어콘들은 모두 자형 장주상을 나타내며, 음극선발광 영상에서 대부분 진동누대가 관찰되고 상속핵을 보여주지 않는다(그림 3). 15개 저어콘 입자의 U와 Th 농도는 각각 178~483 ppm과 101~420 ppm이고, Th/U 비는 0.46~0.90 범위이다(표 1). 이 비는 형태와 내부구조와 함께 일반적인 화성기원을 나타낸다(그림 4). 15개의 SHRIMP 분석치는 78.9 Ma에서 83.0 Ma로 매우 좁은 범위의 겹보기 연대를 가지며(표 1), 일치곡선 상에서 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 가중평균연대가 80.43 ± 0.53 Ma (MSWD=1.4)의 연대군을 이루는데(그림 5c), 이는 이 응회암의 정치연대로 해석된다.

6. 토 의

옥지도 주변의 화산암류에 대한 연대측정은 백악

기 후엽의 화산활동 시기범위를 추정하고 경상분지에서 유천층군의 층서를 구분하는데 상당히 중요한 역할을 할 수도 있음을 시사한다. 이 연구는 이 화산암류의 활동시기를 검증해보기 위하여 시작되었기 때문에 이의 분출시기에 대하여 먼저 토의하며, 그 다음에 상하위의 화산암류와의 층서관계에 대해 논의하기로 한다.

6.1 분출시기

옥지도 주변의 운문사아층군은 옥지도 동부에서 주사산아층군을 피복하고 옥지도 남서부에서 옥지아층군에 의해 덮인다. 그러나 이 연구 이전까지 이 화산암류는 통상적으로 안산암질 복합체로 보았고 대부분 관입된 것으로 여겨져 왔다. 이러한 해석은 화산암류가 그 당시 정확한 연대측정이 불가능하였고 인접한 화산암류와 유사하다는 관점에서 비롯되었다.

옥지도 주변 운문사아층군은 지금까지 암석층서적으로 백악기 후엽에 해당하는 것으로 알려져 있다. SHRIMP 저어콘 U-Pb 분석법에 의한 연대는 자부포 응회암이 82.06 ± 0.55 Ma, 노대도응회암이 81.30 ± 0.54 Ma이고 갈도응회암이 80.43 ± 0.53 Ma를 나타낸다. 이 연대는 아마도 3개의 응회암이 순차적인 분출시기를 나타내는 것으로 해석된다. 따라서 이 분출시기는 이 화산암류가 80.43~82.06 Ma 기간에 활동한 분출물로서 백악기 범주에 일치되는 결과를 나타낸다.

6.2 연대층서

연대측정 결과를 정리하면 운문사아층군은 각 층서단위의 U-Pb 저어콘 연대가 82.06~80.43 Ma 범위 내에 있으며, 각 층서단위의 연대치는 그 순서에 따르는 연대층서(chronosequence)를 나타낸다.

Hwang *et al.* (2016)이 측정한 상부 옥지아층군의 K-Ar 전암연대는 72.3~66.6 Ma 범위로, 이 측정치는 각 층서단위의 야외관계와 부합되지 않았다. 이들은 야외관계에 따른 층서를 더 중요하게 보고 이에 따라 표 2와 같이 층서를 설정하였다. 한편 노대도응회암은 저어콘 U-Pb 연대가 81.36 Ma로 측정된데 비해 K-Ar 연대는 65.6 Ma이다(Hwang *et al.*, 2016). 노대도응회암의 K-Ar 전암연대 역시 옥지아층군의 연대범위보다 젊게 나왔다(Hwang *et al.*, 2016). 그러므로 K-Ar 연대 결과는 야외관계에 의한

Table 1. Summary of SHRIMP U-Pb isotopic data of the analytical zircons from the volcanic rocks around the Yokjido.

Spot No.	$^{206}\text{Pb}_c$ (%)	U (ppm)	Th (ppm)	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Age	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Age	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Age	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Age
Sample HT031 (Jabupo Tuff)													
HT031_1.1	0.02	358.19	201.32	0.5806	0.2	0.0478	2.2	0.0262	2.2	81.1	± 1.1	-224	± 480
HT031_2.1	0.04	670.14	733.40	1.1305	0.2	0.0480	1.6	0.0268	1.5	80.7	± 1.0	233	± 189
HT031_3.1	-0.13	265.33	114.47	0.4456	1.0	0.0466	2.6	0.0257	1.4	82.4	± 0.6	-439	± 864
HT031_4.1	-0.18	709.87	575.50	0.8375	1.1	0.0462	3.0	0.0264	0.6	82.7	± 0.5	-666	± 392
HT031_5.1	-0.00	282.53	136.48	0.4990	0.2	0.0476	2.3	0.0274	1.4	82.1	± 0.6	-287	± 585
HT031_6.1	-0.06	223.18	93.07	0.4308	0.3	0.0471	2.8	0.0260	0.9	81.7	± 1.4	-808	± 1196
HT031_7.1	-0.19	284.81	142.11	0.5154	0.2	0.0461	2.4	0.0271	2.2	82.0	± 0.6	-311	± 670
HT031_9.1	-0.12	335.94	165.52	0.5090	0.2	0.0467	4.7	0.0244	1.5	84.0	± 0.6	-187	± 592
HT031_10.1	0.01	196.94	120.32	0.6311	0.7	0.0477	2.9	0.0261	1.0	81.0	± 1.6	--	--
HT031_11.1	-0.11	202.74	127.34	0.6488	0.9	0.0467	3.1	0.0279	1.0	81.9	± 0.6	28	± 756
HT031_12.1	0.01	350.90	179.68	0.5289	0.2	0.0478	2.4	0.0263	1.8	82.2	± 0.9	-781	± 888
HT031_13.1	-0.01	225.69	108.75	0.4978	0.6	0.0475	3.0	0.0264	1.9	80.3	± 0.6	444	± 589
HT031_14.1	-0.12	332.92	229.92	0.7134	0.2	0.0467	2.6	0.0257	0.9	81.1	± 1.2	425	± 422
HT031_15.1	0.07	365.03	209.88	0.5939	0.2	0.0482	3.9	0.0285	1.5	82.3	± 0.6	378	± 344
Sample HT169 (Nodaedo Tuff)													
HT169_1.1	0.09	383.33	248.66	0.6701	0.2	0.0483	2.3	0.0260	1.5	82.0	± 1.2	-13	± 500
HT169_2.1	0.02	277.85	133.73	0.4972	0.3	0.0478	2.7	0.0260	2.2	80.7	± 0.7	-13	± 438
HT169_3.1	-0.05	246.23	95.33	0.3999	0.5	0.0472	2.8	0.0271	1.9	82.1	± 0.7	-13	± 765
HT169_4.1	0.10	303.37	170.41	0.5802	0.3	0.0484	2.5	0.0265	1.6	80.9	± 0.7	-13	± 406
HT169_5.1	0.18	339.34	168.29	0.5123	0.3	0.0490	2.4	0.0250	3.0	80.2	± 0.6	-13	± 518
HT169_6.1	0.04	232.69	90.13	0.4001	1.2	0.0479	2.8	0.0258	2.7	80.8	± 0.6	-13	± 762
HT169_7.1	-0.05	238.98	173.11	0.7483	1.4	0.0472	2.8	0.0271	2.1	82.4	± 1.2	-13	± 1205
HT169_8.1	0.07	437.13	390.57	0.9230	0.6	0.0482	2.1	0.0260	1.7	80.0	± 0.9	-13	± 246
HT169_9.1	0.23	354.50	247.17	0.7202	0.2	0.0494	2.1	0.0281	1.4	80.1	± 0.6	-13	± 525
HT169_10.1	-0.01	336.26	130.24	0.4001	0.3	0.0475	2.3	0.0276	0.8	80.5	± 1.0	-13	± 523
HT169_11.1	-0.02	481.32	355.17	0.7623	1.0	0.0475	2.0	0.0256	2.0	81.8	± 0.6	-13	± 351
HT169_12.1	-0.01	465.59	334.98	0.7432	0.2	0.0476	2.0	0.0265	2.2	82.0	± 0.6	-13	± 303
HT169_13.1	-0.18	344.58	175.01	0.5247	0.4	0.0462	2.3	0.0278	1.2	81.5	± 0.6	-13	± 477
HT169_14.1	-0.09	475.44	435.10	0.9453	0.7	0.0468	2.2	0.0217	1.7	78.3	± 1.9	-13	± 354
HT169_15.1	0.28	563.61	361.11	0.6618	0.2	0.0499	1.7	0.0278	1.4	83.0	± 0.6	-13	± 255
Sample HT111 (Galdo Tuff)													
HT111_1.1	0.02	287.53	128.70	0.4624	0.7	0.0478	2.3	0.0301	0.8	80.6	± 0.8	-332	± 621
HT111_2.1	0.16	243.02	109.08	0.4637	0.3	0.0489	2.7	0.0262	2.5	81.7	± 0.6	-130	± 725
HT111_3.1	-0.06	474.12	308.06	0.6712	0.6	0.0471	2.0	0.0259	2.1	81.1	± 1.1	228	± 300
HT111_4.1	-0.05	483.03	420.00	0.8982	0.2	0.0472	3.0	0.0286	1.5	79.9	± 0.5	96	± 281
HT111_5.1	-0.26	177.64	101.19	0.5884	0.3	0.0455	3.2	0.0270	2.1	78.7	± 0.6	272	± 609
HT111_6.1	0.09	310.44	141.67	0.4714	0.4	0.0483	2.2	0.0280	1.2	81.1	± 0.6	-77	± 496
HT111_7.1	0.07	355.43	183.41	0.5330	0.2	0.0482	2.1	0.0276	2.1	78.9	± 1.0	103	± 377
HT111_8.1	0.07	266.23	140.21	0.5440	2.1	0.0482	2.6	0.0262	2.5	79.4	± 0.8	-431	± 753
HT111_9.1	0.08	364.32	205.62	0.5830	0.2	0.0482	2.1	0.0260	2.6	80.3	± 0.9	-255	± 465
HT111_10.1	-0.06	350.86	233.09	0.6863	0.2	0.0472	2.3	0.0256	2.4	80.7	± 0.6	-70	± 500
HT111_11.1	0.02	231.62	157.44	0.7022	0.3	0.0478	2.8	0.0254	1.0	81.0	± 1.0	462	± 440
HT111_12.1	0.23	313.13	177.15	0.5844	1.7	0.0494	2.1	0.0310	1.5	79.7	± 1.1	-61	± 416
HT111_13.1	0.16	333.18	169.71	0.5262	0.2	0.0489	2.2	0.0279	1.9	80.7	± 0.6	139	± 411
HT111_14.1	-0.07	211.53	106.44	0.5198	0.7	0.0471	5.1	0.0273	3.1	83.0	± 1.4	532	± 472
HT111_15.1	0.14	287.68	140.55	0.5047	1.1	0.0487	2.3	0.0282	0.8	80.6	± 1.4	250	± 405

Errors are 1- σ ; Pb_c and Pb* indicate common and radiogenic portions, respectively.

(1) Common Pb corrected using measured ^{204}Pb .

(2) Common Pb corrected by assuming $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ age-concordance

화산층서와 부합되지 않는 결과를 보여준다.

K-Ar 연대는 저어콘 U-Pb 측정치와 비교하면 전반적으로 더 젊은 연대를 나타낸다(Hwang *et al.*, 2016). 이러한 차이의 원인으로는 여러 가지가 고려되었지만 대기 중에 Ar 보정에서 많은 오차가 발생한 것을 한 원인으로 생각할 수 있다. 한편 이 저어콘 U-Pb 측정치는 자부포응회암과 노대도응회암 간에 0.76 Ma의 연대차이와, 노대도응회암과 갈도응회암 간에 0.87 Ma의 연대차이를 나타내는데, 이 차이는 오차를 감안하면 거의 동일시기라는 한계를 나타낸다. 그러나 자부포응회암과 노대도응회암 사이에는 화산휴지기를 나타내는 사이도층이 협재되기 때문에 전혀 동일시기로 볼 수 없으며 따라서 이 연대치들은 분출시기의 차이를 반영하는 것으로 볼 수 있다. 그러므로 저어콘 U-Pb 연대치는 자부포응회암(82.06 ± 0.55 Ma)에서, 노대도응회암(81.30 ± 0.54 Ma), 그리고 갈도응회암(80.43 ± 0.53 Ma)으로 가면서 야외관계에 따른 층서와 부합되게 상위층으로 가면서 젊어지는 경향을 보여주는 정연한 상관관계를 나타내고 있다.

6.3 층서대비

유천소분지 중앙부의 밀양지역에서 ICP-MS-LA 저어콘 U-Pb 연대측정 자료(Zhang *et al.*, 2012)에 의하면 주사산아층군은 비반상안산암이 94.4 ± 0.8 Ma 이고 밀양안산암이 88.8 ± 1.0 Ma이며 정각산층 내의

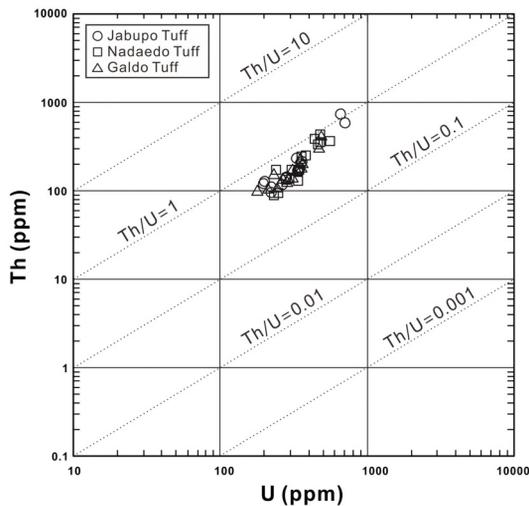


Fig. 4. Correlation diagram showing the proportions of Th to U concentrations (ppm) of the zircons analyzed by SHRIMP.

응회암이 88.7 ± 0.8 Ma이다. 운문사아층군은 삼량진 응회암이 88.0 ± 0.7 Ma, 88.0 ± 0.8 Ma이다(표 2). 그리고 범도리안산암은 주사산아층군의 최상부로 보았지만

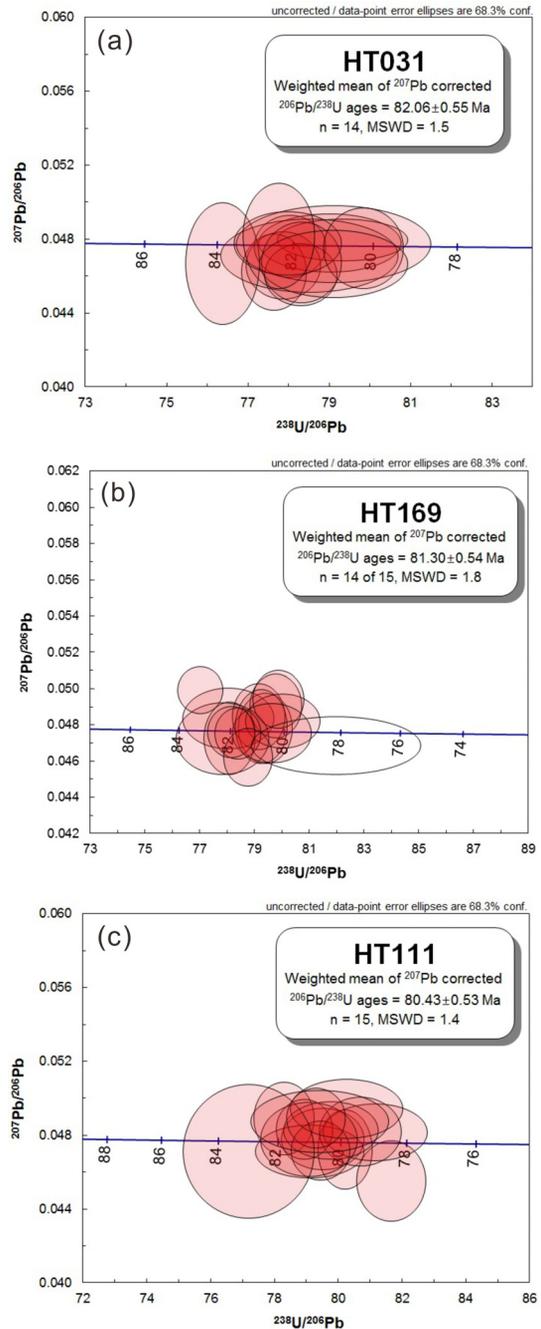


Fig. 5. Concordia diagrams for SHRIMP U-Pb ages of zircons separated from samples (a) HT031, (b) HT169 and (c) HT111.

Table 2. Stratigraphic correlation from zircon ages in three regions of the Yucheon subbasin.

Group	Subgroup	Miryang region		Mireukdo region		Yokjido region	
		Stratigraphic units	U-Pb ages (Zhang <i>et al.</i> , 2012)	Stratigraphic units	U-Pb ages (Hwang <i>et al.</i> , 2016)	Stratigraphic units	U-Pb ages
Yucheon Group	Yokji Subgroup	Beomdori Andesite	78.4±1.5 Ma	Dara Andesite	73.01±0.75 Ma	Dumido Andesite	
		Hwajeri Formation		Madong Daacite		Cheonhwangsan Andesite	
	Unmunsa Subgroup	Samryangjin Tuff	88.0±0.7 Ma 88.0±0.8 Ma	Chudo Tuff	82.56±0.95 Ma	Galdo Tuff	80.43±0.53 Ma
		Wondong Tuff		Jangpyeongri Formation		Nodaedo Tuff	81.30±0.54 Ma
		Yusanri Formation		Punghwari Tuff	88.95±0.44 Ma	Saido Formation	
		Yangsan Tuff				Jabupo Tuff	82.06±0.55 Ma
	Jusasan Subgroup	Jeonggaksan Formation	88.7±0.7 Ma	Yeonhwado Andesite		Yeonhwado Andesite	
		Miryang Andesite	88.8±1.0 Ma	Janggok Tuff			
		Saengcheolri Tuff (andesitic lapilli tuff)		Dueokri Andesite		Hansando Formation	
		Jongnamsan Andesite (aphyric andesite)	94.4±0.8 Ma	Hansando Formation			
	Palyongsan Tuff		Muncopo Andesite		Tongguji Andesite		

78.4 Ma로 측정되었기에 시간층서(chronostratigraphy)로 판단하면 육지아층군으로 분류해야만 한다.

또한 미륵도 주변에서 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대측정 자료(Hwang *et al.*, 2017)에 의하면, 중부의 유문암질암류는 풍화리응회암이 88.95±0.44 Ma이고 추도응회암이 82.56±0.95 Ma이며, 상부의 안산암질암류는 달이안산암이 73.01±0.75 Ma이다(표 2). 이 연대자료는 이 지역의 화산층서를 하부의 주사산아층군, 중부의 운문사아층군과 육지아층군으로 분류하는데 근거로 이용되었다.

이 연구에서 수행된 육지도 주변의 유문암질암류는 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대측정의 결과가 82.06~80.43 Ma 범위로서 밀양지역에서 육지아층군으로 보는 범도리안산암의 78.4 Ma보다 고기이기 때문에 시간층서적으로 운문사아층군으로 분류된다. 따라서 유천소분지의 중앙부와 미륵도 및 육지도 주변에서 세워진 각 암석층서는 수십 km 떨어져 있기 때문에 직접적인 층서대비가 불가능하였지만, 각 지역의 암석층서는 저어콘 U-Pb 연대자료를 바탕으로 한 시간층서와 결부시키면 멀리 떨어진 지역 간에 간접적인 층서대비가 가능해진다.

종합하면 유천소분지의 중앙부와 미륵도 및 육지도 주변에서 화산암류는 저어콘 U-Pb 연대가 94.4 Ma에서 73.0 Ma 범위를 보여준다(Zhang *et al.*, 2012; Hwang *et al.*, 2017; this study). 이 새로운 연대 자료는 복잡한 유천층군에 대한 전통적인 층서구분을 시간층서로 재구성할 수 있게끔 새로운 증거로 활용할 수 있다. 즉 이들 연대는 유천소분지 중앙부에서 유천층군의 화산암류를 암상과 조성에 따라 구분한 3개 아층군(즉 주사산, 운문사, 육지아층군)에 적용시킨다면 육지도 주변에서 유천층군의 화산암류를 시간층서로 구분할 때도 잘 적용되기 때문이다. 그러므로 유천소분지의 중앙부와 통영 주변의 유천층군의 시간층서는 Table 3에서와 같이 하부로부터 주사산아층군, 운문사아층군, 육지아층군 순으로 구분되는 것이며, 앞으로 이러한 기준에 따라 인접지역으로 확장시켜 화산층서를 통일시킬 수 있을 것으로 기대한다.

7. 결론

통영 남부 육지도 주변 화산암류는 하부 안산암

질암류(주사산아층군), 중부 유문암질암류(운문사아층군)와 상부 안산암질암류(옥지아층군)로 구분된다.

주사산아층군은 통구지안산암, 한산도층과 연화도안산암으로 구분되고, 운문사아층군은 야포각력암, 자부포응회암, 사이도층, 노대도응회암과 갈도응회암으로 구분되며, 옥지아층군은 불곡안산암, 옥지도안산암, 대기봉안산암, 천황산안산암과 두미도안산암으로 세분된다.

운문사아층군에 대한 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대측정을 실시함으로써 이들의 분출시기와 층서관계를 확실하게 하였다. 분석결과, 자부포응회암은 82.06 ± 0.55 Ma ($n=14$, 2σ)에 집중되는 일치곡선 연대를 나타내고 노대도응회암은 81.30 ± 0.54 Ma ($n=14$, 2σ)에 집중되는 일치곡선 연대를 나타내며, 갈도응회암은 80.43 ± 0.53 Ma ($n=15$, 2σ)에 집중되는 일치곡선 연대를 나타낸다.

이들 자료는 옥지도 주변에서 일어났던 각 응회암의 분출시기를 확실하게 하며 운문사아층군의 연대층서를 나타낸다. 그리고 이들 연대는 유천소분지 중앙부의 운문사아층군 연대 범위에 속하므로 유천소분지 화산암류에 대한 시간층서의 뼈대를 세우는 데 중요한 역할을 할 것이고 지역 간의 간접적 층서대비를 가능하게 한다.

감사의 글

이 논문은 한국지질자원연구원에서 지원하는 “지질도록 조사연구”에 의해 수행된 결과와 추가 자료로 이루어졌다. 연대측정은 한국기초과학지원연구원의 선도장비 이용자 프로그램에 의한 SHRIMP U-Pb 분석으로 수행되었다. 또한 심사과정에서 유익한 지적으로 논문의 질을 향상시켜 주신 최정현 편집위원과 익명의 두 심사위원께 사의를 표한다.

REFERENCES

- Chough, S.K. and Sohn, Y.K., 2010, Tectonic and sedimentary evolution of a Cretaceous continental arc-backarc system in the Korea peninsula: new view. *Earth-Science Reviews* 101, 225-249.
- Hartman, L.A., Leite, J.A.D., Silva, L.C., Remus, M.V.D., McNaughton, N.J., Groves, D.I., Fletcher, I.R., Santos, J.O.S. and Vasconcellos, M.A.Z., 2000, *Advances in SHRIMP geochronology and their impact on understanding the tectonic and metallogenic evolution of southern Brazil*. *Australian Journal of Earth Sciences*, 47, 829-844.
- Hwang, S.K., 1996, Petrologic evolution of volcanic rocks related with the Yangsan caldera, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 32, 208-222 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., 2012, Tectonic Setting and Arc Volcanisms of the Gyeongsang Arc in the Southeastern Korean Peninsula. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 21, 367-383 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K. and Cheong, C.S., 1998, Magmatic evolution of igneous rocks related with the Samrangjin caldera, southeastern Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 7, 161-176 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K. and Kim, S.W., 1994a, Petrology of Cretaceous volcanic rocks in the Miryang-Yangsan Area, Korea (I): petrotectonic setting. *Journal of the Geological Society of Korea*, 30, 229-241 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K. and Kim, S.W., 1994b, Petrology of Cretaceous volcanic rocks in the Miryang-Yangsan Area, Korea (II): petrogenesis. *Journal of the Geological Society of Korea*, 30, 563-577 (in Korea with English abstract).
- Hwang, S.K., Lee, S.J., Song, K.-Y. and Yi, K., 2017, SHRIMP U-Pb dating and chronostratigraphy of the volcanic rocks around the Mireukdo Island, Tongyeong, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 27, 67-78 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Seo, S.H., Park, S.H. and Song, K.-Y., 2016, Explanatory text of the geological map of Yokjido·Yeonhwado·Maemuldo Sheets. *Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources*, 65 p.
- Ireland, T.R. and Williams, I.S., 2003, Considerations in zircon geochronology by SIMS. In: Hanchar, J.M. and Hoskin, P.W.O. (eds.), *Zircon: Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, Mineralogical Society of America, 53, 215-241.
- Kim, C.S., Park, K.H. and Paik, I.S., 2005, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of the volcanic pebbles within the Silla Conglomerate and the deposition timing of the Hayang Group. *Journal of Petrological Society of Korea*, 14, 38-44 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.H., 1996, Mesozoic tectonics in Korea. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 13, 251-265.
- Ludwig, K.R., 2008, *User's manual for Isoplot 3.6: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4, Berkeley, California, 77 p.
- Ludwig, K.R., 2009, *SQUID 2.50: A User's manual*. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 5, Berkeley, California, 100 p.

- Shin, S.C. and Jin, M.S., 1995, Isotope Age Map of Volcanic Rocks of Korea (1:1000000). Korea Institute of Geology, Mining and Materials, Daejeon, South Korea.
- Vavra, G., Schmid, R. and Gebauer, D., 1999, Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibolite-to-granulite facies zircons: Geochronology of the Ivrea Zone (Southern Alps). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134, 380-404.
- Williams, I.S., 1998, U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: McKibben, M.A., Shanks, W.C.P., and Ridley, W.I. (eds.), *Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes*. *Reviews in Economic Geology*, 7, 1-35.
- Zhang, Y.-B., Zhai, M., Hou, Q.-L., Li, T.-S., Liu, F. and Hu, B., 2012, Late Cretaceous volcanic rocks and associated granites in Gyeongsang Basin, SE Korea: Their chronological ages and tectonic implications for cratonic destruction of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47, 252-264.

Received : January 25, 2018

Revised : April 1, 2018

Accepted : June 7, 2018