

## 청송 부남암주와 무포산응회암의 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대측정과 층서관계

황상구<sup>1,‡</sup> · 조인화<sup>1</sup> · 이기욱<sup>2</sup>

<sup>1</sup>안동대학교 지구환경과학과

<sup>2</sup>한국기초과학지원연구원 환경과학연구부

### 요 약

부남암주는 하양층군을 관입하고 무포산응회암과 부정합으로 만나지만 암맥들의 주입으로 층서관계가 명확하지 않은 채로 통상적으로 화산암류를 관입하는 것으로 여겨져 왔다. 본 연구에서는 4개 암상으로 구분되는 부남암주 심성암류와 무포산응회암의 정치시기를 규명하고 층서관계를 정립하기 위해 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연령측정을 실시하였다. 연대측정 결과, 조립질 화강암은 연변부에서  $77.1 \pm 1.3$  Ma,  $77.21 \pm 0.78$  Ma, 중앙부에서  $75.75 \pm 0.72$  Ma이고, 석영몬조섬록암이  $76.64 \pm 0.75$  Ma, 화강섬록암이  $76.20 \pm 0.94$  Ma를 가진다. 또한 무포산응회암은  $67.08 \pm 0.96$  Ma을 나타낸다. 따라서 부남암주의 정치시기는  $75.75 \sim 77.21$  Ma이고 무포산응회암의 분출시기는  $67.08$  Ma이며, 모두 백악기 후기의 화성활동 산물이다. 이 자료에 의하면 화강암질 마그마는 챔버의 연변부에서 중심부로 결정화되는 도중에 석영몬조섬록암질 마그마가 관입하여 혼합작용을 일으킴으로서 중간부에 화강섬록암이 만들어졌다는 것을 시사해준다. 그리고 부남암주의 최후기 연령과 무포산응회암의 연령 간의 차이는  $8.67$  Ma의 시간적 간격을 보이는 부정합 관계를 지시해주며, 이 기간에 두꺼운 퇴적층의 침식은 약  $0.42$  mm/yr이라는 침식률을 나타낸다. 따라서 층서적으로 부남암주는 불국사관입암군에 속하지만, 이 때문에 무포산응회암은 유천층군의 범위를 벗어나게 된다.

**주요어:** 부남암주, 무포산응회암, 연령측정, 정치시기, 혼합작용, 부정합 관계

**Sang Koo Hwang, In Hwa Jo and Keewook Yi, 2016, SHRIMP zircon U-Pb dating and stratigraphic relationship of the Bunam stock and Muposan tuff, Cheongsong, Journal of the Geological Society of Korea. v. 52, no. 4, p. 405-419**

**ABSTRACT:** It has commonly been thought that the Bunam Stock intruded the Hayang Group and Muposan Tuff, although their contacts show ambiguous relation because of injections of some dikes in tuffs, and the Bunam Stock is in an unconformable contact with Muposan Tuff. We carried out zircon SHRIMP U-Pb age dating from the Bunam Stock and Muposan Tuff to examine their emplacement times and stratigraphic relationship. The analyzed U-Pb zircon ages reveal Cretaceous of  $77.1 \pm 1.3$  Ma and  $77.21 \pm 0.78$  Ma in the marginal part, and  $75.75 \pm 0.72$  Ma in the central part of coarse-grained granite,  $76.64 \pm 0.75$  Ma in quartz monzodiorite,  $76.20 \pm 0.94$  Ma in granodiorite, and  $67.08$  Ma in the Muposan Tuff. The data suggest that granodiorite magma resulted from mixing of quartz monzodiorite magma which injected into the granitic magma chamber during crystallization of the granitic magma from the margins toward the central part of the chamber. An unconformable relation is constrained by the time gap of  $8.67$  Ma between Muposan Tuff and the youngest age of Bunam Stock. During the gap, high erosion rate of  $0.42$  mm/yr is estimated for the removal of thick sedimentary strata of the Hayang Group. Accordingly, the Bunam Stock could stratigraphically belong to the Bulguksa Group, but the Muposan Tuff must be removed from the Yucheon Group.

**Key words:** Bunam Stock, Muposan Tuff, Age dating, Emplacement times, Magma mixing, Unconformable relation

(Sang Koo Hwang and In Hwa Jo, Department of Earth and Environmental Science, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea; Keewook Yi, Korea Basic Science Institute, Ochang 28819, Republic of Korea)

<sup>‡</sup> Corresponding author: +82-54-820-5469, E-mail: [hwangsk@anu.ac.kr](mailto:hwangsk@anu.ac.kr)

## 1. 서 언

한반도는 고생대 말부터 신생대 동안에 활발하게 화성활동이 일어남으로써 심성암체들이 여러 곳에 넓게 분포한다. 이들은 최근 연대측정 자료에 의하면 페름기, 쥐라기, 백악기, 제3기에 화성활동이 집중적으로 발생하였으며(Park, 2012), 이들은 섭입대 또는 충돌대에 관련된 화성활동의 산물에 해당된다. 이 중에서 백악기 화성활동은 섭입대에 가까운 경상분지에서 가장 집중적으로 일어났다.

한반도 남동부는 백악기에 이나자기판의 섭입작용에 의해 경상분지가 발달하여 퇴적작용과 화성활동이 활발하게 일어났던 곳으로 백악기 퇴적암류와 화산암류가 넓게 분포하고 심성암체가 여러 곳에 노출된다. 이 퇴적암류는 화산물질의 함유 여부에 따라 하부의 신동층군과 상부의 하양층군으로 구분하였고 상부에 놓이는 대규모 화산암류는 대개 유천층군으로 묶였으며 심성암류는 불국사관입암군으로 묶어 놓았다(Chang, 1975, 1977, 1985). 불국사관입암군의 심성암체는 유천층군이 지표에 정치했던 것에 비하여 지하에 정치했던 관계로 아직 지표에 크게 드러나지 못하고 비교적 작은 암체로 노출되어있는 상태이다.

경상분지의 심성암체에 대한 광역적인 화성활동 및 암석학적 연구는 여러 차례 수행되었으며(Lee *et al.*, 1987; Jwa, 1996), 경상분지 북동부의 백악기 단일 심성암체에 대한 연구도 가끔 이루어졌다(Jwa and Kim, 2000; Hwang and Choi, 2001).

경상분지 북동부에 위치한 청송 남부에는 부남면을 중심으로 하여 심성암체가 분포한다. 이 심성암체는 길이 9.4 km, 너비 4.8 km의 크기를 갖고 그 면적이 100 km<sup>2</sup> 이하로서 크지 않은 암주에 해당되며 여러 암상으로 혼합되어있기 때문에 앞으로 기재의 편의를 위해 부남암주(Bunam Stock)로 부르코자 한다. 이 부남암주는 주변 퇴적암류를 관입하여 혼펠스화시켰으며 동쪽에서 화산암류와 접하지만 암맥들에 의해 관계를 알아내기가 쉽지 않다. 부남암주는 도평도폭에서 백악기 흑운모 화강암으로 기재되었고(Kwon and Lee, 1973), 청송도폭에서도 백악기 흑운모 화강암으로 기재되었으며 불국사통으로 보았다(Lee and Hong, 1973). 한편 1/25만 안동지질도폭에서는 각섬석 화강암으로 불국사관입암군

으로 분류하였다(Hwang *et al.*, 1996).

불국사관입암군의 심성암체는 여러 곳에서 K-Ar 연령과 피선티랙 연령이 측정된 바 있고 고지자기에 의한 연대 추정이 있었지만, 부남암주는 어떤 방법으로도 연령측정이 수행된 바가 없다. 그래서 부남암주는 통상적으로 퇴적암류와 화산암류를 관입하는 백악기 불국사관입암군으로 대비해왔으며(Lee and Hong, 1973), 최근에는 주변에 분포하는 무포산응회암이 전암 Rb-Sr 연령측정에 의해  $63.6 \pm 3.4$  Ma로 보고됨(Hwang and Kim, 2006)으로써 자연스럽게 제3기 심성암으로 분류되기도 하였다.

따라서 우리는 이 지역의 층서를 정확하게 정립하고 백악기 말의 화성활동을 한층 더 체계화하기 위해 고분해능 이차이온 질량분석기(SHRIMP: Sensitive High Resolution Ion Micro Probe)를 이용한 저어콘의 연령측정을 실시하였다. 이를 위해 부남암주의 4개 암상 중에서 조립질 화강암(3개), 석영문조섬록암(1개), 화강섬록암(1개), 주변의 무포산응회암(1개)을 선정해서 SHRIMP를 이용하여 저어콘 U-Pb 연령측정을 실시함으로써 이들의 상호 시간적 관계뿐만 아니라 정치시기를 정량적으로 한정하고 층서관계를 확실하게 하고자 한다.

## 2. 지질개요와 야외관계

청송 지역은 지체구조상 영남육괴와 백악기 경상분지에 위치한다. 영남육괴는 남서부의 지리산 지구와 북동부의 소백산 지구로 나뉘지며 소백산 지구는 대부분 변성암류로 구성되며 삼첩기 심성암류에 의해 관입된다. 경상분지는 분지발달사적 및 층서적 차이에 근거하여 서쪽의 낙동곡분(Nakdong Trough), 다시 북쪽으로부터 영양소분지, 의성소분지, 유천소분지로 세분되고, 하위로부터 신동층군, 하양층군, 유천층군 그리고 이들을 관입한 불국사관입암군 순서로 정립되어 있다(Chang, 1975, 1977, 1985). 청송 남부지역은 의성소분지의 북동부에 포함되며, 하양층군에 해당되는 퇴적암류, 불국사관입암군에 해당되는 심성암류, 그리고 백악기 내지 제3기 화산암류 및 심성암류가 주로 분포한다.

연구지역의 지질은 하위로부터 삼첩기 심성암류, 백악기 하양층군의 퇴적암류, 백악기 불국사관입암군의 심성암류, 백악기 화산암류, 제3기 암맥류, 그리

고 제4기 층적층으로 구성된다(Lee and Hong, 1973; Chang *et al.*, 1977, 1978; Hwang, 2002; Hwang *et al.*, 2002, 2007).

이 지역에서 하양층군 퇴적암류는 하부로부터 후평동층, 점곡층, 사곡층과 춘산층으로 구분된다. 청송도폭에서는 신라통-낙동통의 아코스질 사암층, 적색 사암층과 녹색 사암층으로 구분하였는데(Lee and Hong, 1973), 아코스질 사암층과 적색 사암층은 대체로 후평동층에 대비되고 녹색 사암층은 점곡층에 대비된다. 도평도폭(Kwon and Lee, 1973)에서는 사곡층과 춘산층을 구분하지 않고, 이들 모두를 신라통-낙동통의 대구층이라 기재하였으며 이는 점곡층, 사곡층과 춘산층으로 구분된다.

불국사관입암군은 부남암주의 심성암류로서 조립질 화강암, 석영몬조섬록암, 화강섬록암과 세립질 화강암으로 구분된다. 그러나 부남암주는 도평도폭과 청송도폭에서 흑운모 화강암으로 기재되었고(Kwon and Lee, 1973; Lee and Hong, 1973). 1/25만 안동지질도폭에서는 각섬석 화강암으로 보았다(Hwang *et al.*, 1996).

백악기 화산암류는 안산암과 무포산응회암으로 분류되며, 도평도폭에서 안산암질암과 산성 화산암류로 기재하였고(Kwon and Lee, 1973) 청송도폭에서 각력질 안산암과 규장암으로 기재하였다(Lee and Hong, 1973).

## 2.1 청송 심성암류

청송 심성암류는 이 지역에서 북동부에 분포하며 청송도폭에서 청송화강암(Lee and Hong, 1973)으로 불려져 왔다. 청송 심성암류는 지금까지 주라기로 알려져 왔지만 최근 연대측정 결과에서 삼첩기로 보고되었으며(Cheong *et al.*, 2002, 2014; Sagong *et al.*, 2005), 섬록암에서 화강섬록암, 화강암과 알칼리장석 화강암까지 다양한 암질을 나타내는 매우 불균질한 암체이다(Jwa *et al.*, 2005).

## 2.2 후평동층

후평동층은 이 지역의 북부에서 청송 심성암류의 경계부를 따라 북서-남동 방향으로 대상 분포를 한다. 층리는 대체로 북서-남동 주향에 남서 방향으로 경사된다. 대개 적갈색 내지 저색을 띠고, 천지도폭에서 적색 처어트편을 함유한 역암층을 기준으로 그

하부를 구미동층원과 그 상부를 구계동층원으로 구분하고 있다(Chang *et al.*, 1978). 그러나 이 지역에서는 잡색 역암층이 발견되지 않으며 적갈색 내지 저색 사암과 이암으로 구성된다. 이 층의 두께는 천지도폭에서 650 m이며 측방으로 가면서 100 m 정도로 얇아진다(Chang *et al.*, 1978).

특히 이 층의 최하부에서는 역암층이 발달되고 역들은 화강암, 사암, 규암 및 편암 등으로 구성되며 변성암과 화성암으로 이루어진 기반암에서 유래되었음을 의미한다. 이러한 증거는 청송 심성암류 위에 놓이는 기저 역암을 지시하며 청송 심성암류와 부정합적 관계를 의미한다.

## 2.3 점곡층

점곡층은 이 지역의 북서부에서 대규모로 후평동층을 정합적으로 피복하며, 사암과 셰일로 구성되고 역암과 응회암을 협재한다. 암색은 회색 내지 녹회색이 위주이나 약간의 자갈색 층도 협재된다. 점곡층에는 층리가 잘 발달되고 흔히 엽층리를 관찰할 수 있다. 층리는 대체로 북서-남동 주향에 남서 방향으로 경사된다. 이 층은 상부에서 사곡층에 의해 정합적으로 덮이고, 적갈색 이암 및 사암을 가끔 협재하며, 두께는 천지도폭에서 약 950 m에 달한다(Chang *et al.*, 1978).

이 층은 부남암주의 북부와 북서부에서 이 암주와 부조화적으로 접하며 층리의 연속성을 보여주지 않는 관입 관계를 나타낸다. 그리고 이 층의 접촉부에서는 접촉변성작용에 의한 혼펠스화로 강한 면모를 나타내며 부남암주보다 높은 지형을 보여준다.

## 2.4 사곡층

사곡층은 이 지역 서부에서 소규모 분포하지만 서쪽으로 넓게 연장된다. 이 층은 주로 적갈색 셰일, 이암 및 사암으로 구성되며, 하부에서 녹회색 셰일 및 사암을 자주 협재한다. 사곡층은 구산동도폭에서 두께가 약 2,000 m에 달하며, 하부 적갈색대, 중부 회색대와 상부 자갈색대로 구분된다(Chang *et al.*, 1977). 사암과 셰일은 층리를 발달시키며 다소 불량한 분급과 아각상 내지 아원상 원마도를 보여준다. 층리는 북부에서 대체로 북서-남동 주향에 남서 방향으로 경사를 가지지만 남부에서 거의 수평이거나 동서 주향에 북쪽으로 경사된다.

이 층은 북부에서 녹회색층과 교호하면서 점곡층과 정합적으로 놓이며, 북서-남서 방향의 단층에 의해 북동쪽 블록이 약간 상승하는 좌수향 단층으로 점곡층과 단층 접촉을 이룬다. 한편 부남암주의 서부에서 이 층의 접촉부에서는 접촉변성에 의한 환원작용으로 회색을 띠는 혼펠스를 만들었으며 풍화와 침식에 강한 저항력으로 부남암주보다 높은 지형을 나타낸다.

2.5 춘산층

춘산층은 이 지역의 남부와 남서부에 분포하며 구산동도폭에서 이 층의 기저부에는 얇은 응회암층이 협재되어 있으며 남서쪽으로 크게 연장된다(Chang et al., 1977). 따라서 이 응회암층은 춘산층과 그 아래의 사곡층과의 경계를 결정짓는데 열쇠층으로 이용된다. 춘산층은 두께가 약 700 m로 추산되고(Chang et al., 1977) 녹회색 내지 회색의 사암, 암회색 셰일로 구성된다. 사암과 셰일은 교호하면서 층리를 잘 발달시키며 셰일에서 흔히 엽층리를 이룬다. 층리는 남서부에서 대체로 거의 수평이거나 동서 주향에 남쪽으로 완만한 경사를 가지지만 중남부에서

거의 수평이거나 북서-남동 주향에 남서 방향으로 경사된다. 이 층은 하부에서 사곡층과 정합적으로 놓이며, 하부에서는 적갈색 이암 및 사암을 가끔 협재한다.

이 층은 부남암주의 남부에서 층리가 연속되지 않고 이 암주와 부조화적으로 접하며 관입관계를 나타낸다. 따라서 이 층의 접촉부에서는 접촉변성작용에 의한 혼펠스화로 부남암주보다 높은 지형을 보여준다.

2.6 부남암주

부남암주는 풍화와 침식에 약해서 상대적으로 낮은 구릉을 이루지만 중앙부에 최고 642 m 높이의 매봉산을 중심으로 다소 높은 산릉을 형성하고 있다. 이 암주는 주변에서 여러 퇴적암층들과 부조화적으로 접촉관계를 보이며, 동부에서는 안산암과 무포산응회암과 정확한 접촉관계를 관찰하기가 어렵다. 그러나 주변의 퇴적암층들은 열변성에 의한 확실한 혼펠스를 나타내기 때문에 부남암주의 관입에 의한 접촉관계로 해석되며, 동부의 무포산응회암은 아마도 부조화적인 접촉관계로 인식되지만 혼펠스를 나타

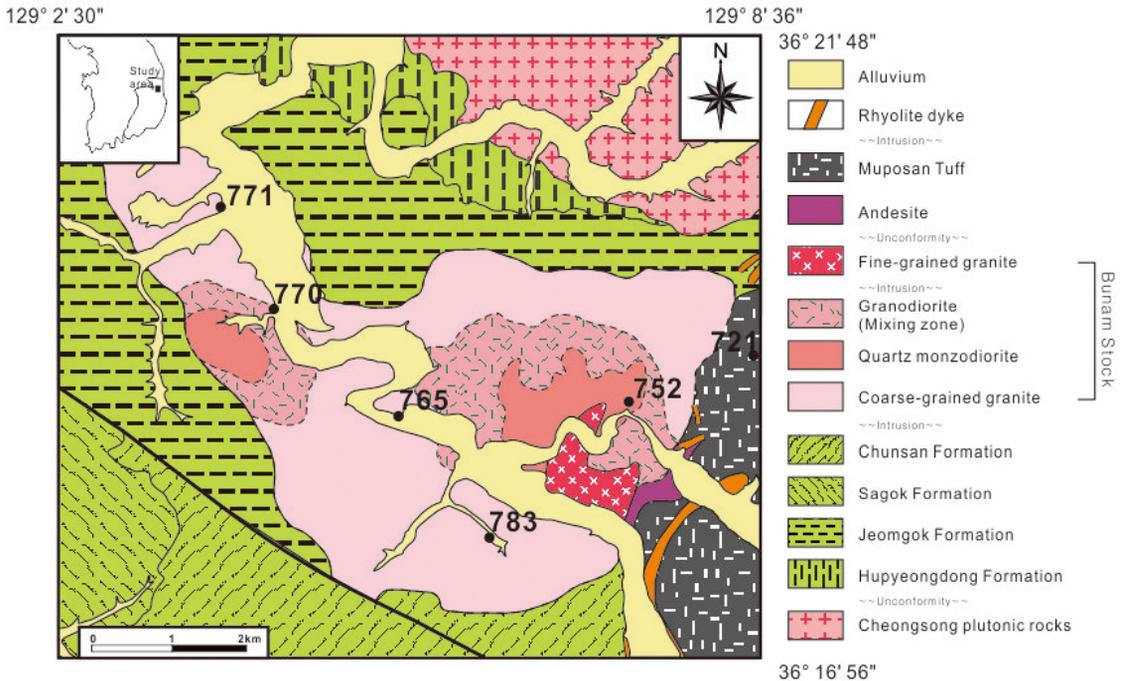


Fig. 1. Geological map around the Bunam Stock, showing sample locations of the present study together.

내는 증거를 찾을 수 없다.

부남암주는 암주의 크기에 비해 조립질 화강암, 석영몬조섬록암, 화강섬록암, 세립질 화강암 등의 다양한 암상으로 구성되는 심성암 복합체이다.

### 2.6.1 조립질 화강암

조립질 화강암은 암주 전역에 걸쳐 평지에 주로 분포하며 소규모로 고지대를 이루기도 한다. 화강섬록암 경계는 매우 점이적인 조성 변화를 나타내기 때문에 설정하기가 어렵다. 암상은 담회색 내지 담홍색을 띠며, 조립질 내지 중립질이고 가끔 반상 조직을 나타낸다. 이 암상은 석영, 사장석, 알칼리장석, 흑운모, 각섬석, 불투명광물로 구성되며, 소량의 각섬석, 저어콘과 인회석이 관찰된다.

### 2.6.2 석영몬조섬록암

석영몬조섬록암은 서부와 중동부에 소규모로 분포한다. 이 암석은 암녹색에서 암회색을 띠며 대부분 중립질이고 부분적으로 세립질을 나타낸다. 화강섬록암과의 경계는 매우 불규칙한 변화를 나타낸다. 이 암상은 사장석, 각섬석, 흑운모가 우세하고 소량의 알칼리장석, 석영, 휘석, 불투명광물로 구성되며 인회석, 저어콘이 수반된다.

### 2.6.3 화강섬록암

화강섬록암은 대체로 석영몬조섬록암의 외곽부에 환상으로 분포하며 대개 산릉을 형성한다. 화강암, 석영몬조섬록암과의 경계부는 매우 점이적인 조성 변화를 보여주거나 매우 불규칙한 경계를 형성한다. 또한 석영몬조섬록암과의 인접부에서는 고철질 미립상 내포체(mafic microgranular enclave)가 흔하게 관찰된다. 이 암상은 회색 내지 녹회색을 띠며 중립질이고 각섬석과 사장석에 의한 반상 조직을 가진다. 이 암상은 사장석, 석영, 알칼리장석, 각섬석, 흑운모 등으로 구성되며, 인회석, 저어콘 등을 수반한다.

### 2.6.4 세립질 화강암

세립질 화강암은 남동부에서 주변 암석을 관입하며 매우 작은 규모로 분포한다. 이 암상은 회백색 내지 황백색을 띠며, 세립질이고 등립상을 나타내며, 주변의 석영몬조섬록암과 화강섬록암에 얇은 암맥

으로 나타나기도 한다. 이 암상은 석영, 알칼리장석, 사장석, 흑운모 그리고 불투명광물로 구성되며, 소량의 저어콘과 인회석을 가진다.

## 2.7 안산암

안산암은 부남암주의 동측부에서 매우 좁게 소규모로 산출된다. 이의 암질은 녹회색 내지 암록회색을 띠고 흔히 1mm 내외의 사장석 반정에 의한 반상 조직을 현저히 나타낸다. 따라서 이 암석은 암상으로 볼 때 아마도 무포산응회암 아래에 놓이는 너구동층(Hwang, 1998)의 상부에 협재하는 안산암질 용암에 대비된다. 부남암주와 접촉부는 확실하지 않지만 대체로 부정합적 관계를 나타낸다.

## 2.8 무포산응회암

무포산응회암은 부남암주의 동부에 분포하고 남동부로 넓게 연장되며, 두께는 대략 500 m를 넘는 것으로 알려져 있다(Hwang and Kim, 2006). 이 암석은 구성원에 의하면 파리질 응회암에 속하며 결정이 상당히 풍부한 것을 고려한다면 결정풍부 파리질 응회암(crystal-rich vitric tuff)으로 분류된다(Ahn and Hwang, 2007). 화학적인 분류에 의하면 칼크-알칼리 계열에 해당하는 유문데이사이트질 내지 유문암질 응회암에 속한다(Hwang and Kim, 2006).

이 암층은 부석배열(pumice alignment)로부터 측정된 유상선구조(flow lineation)에 의하면 공급지가 남동부에서 대체로 북북서-남남동 방향을 나타낸다(Ahn and Hwang, 2007). 이 암층은 북동부에서 점곡층 하부를 덮고 남동부에서 직접 춘산층을 덮고 있기 때문에 하양층군과 부정합 관계를 나타낸다. 그러나 부남암주와 부조화적인 접촉관계를 나타내지만 암맥들의 관입으로 부정합 혹은 관입접촉인지 확실하게 나타나지 않는다.

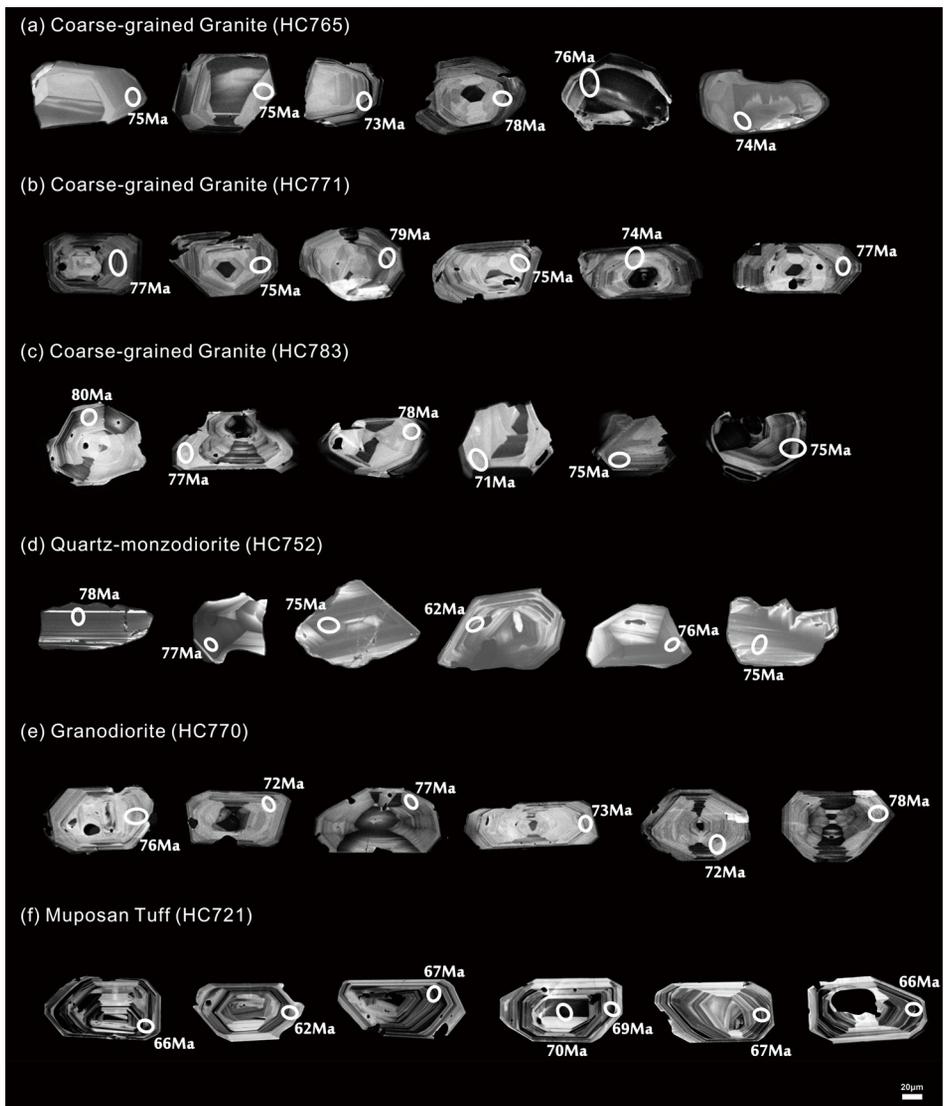
## 3. 시료채취와 분석방법

부남암주의 4개 암상 중에서 분포가 넓은 조립질 화강암에서 3개(HC 771, 783, 765), 분포가 작은 석영몬조섬록암에서 1개(HC 752)와 화강섬록암에서 1개(HC 770)의 암석시료를 선택하여 저어콘 분리에 사용하였다. 그리고 부남암주와 접하는 무포산응회암에서 1개(HC 721)의 암석시료를 선정해서

저어콘을 분리하는데 사용하였다. 이들 암석시료들의 채취 지점은 지질도에 표시하였다(그림 1). 조립질 화강암은 2개(HC 771, 783)를 암주의 연변부에서 채취하였고 1개(HC 765)를 중앙부에서 채취하였다.

암석시료들은 작은 입자들로 파쇄하고 저어콘을 분리하여 회수하였다. 먼저 암석시료는 실험실에서 1차로 파쇄기(Jaw crusher)로 파쇄하고 2차로 분쇄기로 더 잘게 분쇄한 후, 표준 망체를 이용하여 심성암들은

#80~#120 사이의 입자, 응회암은 #180~#230 사이의 입자를 회수하였다. 회수된 입자는 비커에 넣어 물을 이용해 팬닝(panning)하고 자석으로 자성광물을 제거하여 중광물을 농집시켰다. 농집된 중광물 입자들은 실체현미경 하에서 핀셋으로 비교적 깨끗한 저어콘 입자만을 골라냈다. 선별한 저어콘 입자들은 저어콘 표준물질과 함께 에폭시 몰드에 심어 마운트를 제작하였다. 저어콘 마운트는 입자가 반쯤 드러날 때까지 사포로 갈아낸 후 다이아몬드 연마제로 광택



**Fig. 2.** 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 Coarse-grained granite (HC 771, 783, 765), Quartz monzodiorite (HC 752), Granodiorite (HC 770) and Muposan Tuff (HC 721).

이 나도록 표면을 연마하였으며, 마지막으로 금으로 코팅하였다.

코팅한 마운트는 한국기초과학지원연구원에서 음극선발광(CL; Cathodoluminescence) 장치를 부착한 주사전자현미경(JEOL JSM-6610LV 모델)을 이용하여 음극선발광 영상과 후방산란전자(BSE; Backscattered Electron) 영상을 촬영한 후 저어콘의 형태와 내부 구조를 관찰하고 분석 위치를 선정하였다.

연령측정은 먼저 한국기초과학지원연구원의 SHRIMP IIe를 이용하여 저어콘의 U-Pb 분석을 실시하였다. U-Pb 분석은 일차 이온빔으로 산소 음이온( $O_2^-$ )을 이용하였으며, 이때 이온빔의 직경은 25  $\mu m$ 이고 세기는 4-6 nA이었다. 분석에 사용한 저어콘 표준물질로는 FC-1과 SL13을 사용하여 U 함량측정과 U/Pb 연령보정을 실시하였다. 연령측정 절차는 Ireland and Williams (2003)과 Williams (1998)의 방법을 적용하였다. 측정된 분석자료는 SQUID 2.5 및 Ex v. 3.6 프로그램(Ludwig, 2008)을 이용하여 연령계산을 하였다. 여기서 각각의 분석치와 겹보기연령의 오차는 1 $\sigma$ 이고, 가중평균 및 일치곡선(concordia) 연령계산은 95% (2 $\sigma$ )의 신뢰도를 나타낸다.

#### 4. 분석결과

선별한 저어콘 입자들은 모든 시료에서 모두 투명하고 연황색 내지 연녹황색을 띤다. 저어콘 입자들은 대부분 자형의 작은 주상(prismatic) 결정을 이루고 있지만(그림 2), 파편상(fragmental)을 이루는 것도 있다. 이에 반해 가끔 장주상(long prismatic) 결정을 보여주고 단주상(short prismatic) 결정을 나타내거나 찢어진 모양을 보여주는 것도 있다. 저어콘 입자들은 내부에 상속핵을 가지고 진동누대 구조를 나타낸다. 이들의  $^{232}Th/^{238}U$  비는 조립질 화강암이 0.53~1.09 범위이고 석영몬조섬록암이 0.39~1.36 범위이며 화강섬록암이 0.53~1.13 범위이다(표 1). 그리고 무포산응회암은 0.53~1.05 범위를 나타낸다. 즉 Th/U 비가 대체로 0.5선과 1선 사이를 따라 직선상 분포를 보여준다(그림 3). 그러므로 이 비는 마그마에서 성장한 저어콘의 특징을 나타낼 수 있다.

SHRIMP 저어콘 U-Pb 분석결과, 부남암주 시료들은 대부분 백악기 후기에 밀집되며 매우 좁은 범위

의 연령분포를 나타낸다(표 1). 그러나 무포산응회암 시료는 백악기 말에 밀집되고 제3기 초에 해당하는 것도 있지만 비교적 좁은 연령분포를 보여준다.

조립질 화강암의 HC 771 시료는 15개 저어콘 입자에서 각 1점씩 점분석을 실시하였는데 74.2~83.8 Ma 범위로서 상당히 좁은 분포를 보인다(표 1). 이 분석치들은 일치곡선 상에 놓이거나 근처에 놓이며 의미있는 연령을 얻을 수 있다. 통계적으로 처리한  $^{206}Pb/^{238}U$  가중평균연령으로  $77.21 \pm 0.78$  Ma ( $n=15$ , MSWD=0.56)을 얻었다(그림 4a). 이 연령은 아마도 부남암주에서 조립질 화강암의 정치 직후에 북서쪽 연변부에서 초기 결정작용 시기를 나타내는 것으로 해석된다.

조립질 화강암에서 HC 783 시료는 13개 저어콘 입자에서 각 1점씩 점분석을 실시한 것이며 73.3~78.9 Ma 범위로서 매우 좁은 분포를 나타낸다(표 1). 이 분석치들은 일치곡선 상에 놓이며 의미있는 연령을 얻을 수 있다. 통계적으로 계산한  $^{206}Pb/^{238}U$  가중평균연령으로  $77.1 \pm 1.3$  Ma ( $n=12$ , MSWD=2.2)을 얻었다(그림 4b). 이 연령은 북서쪽의 동일 암체에서 채취한 HC 771의 SHRIMP U-Pb 연대  $77.21 \pm 0.78$  Ma와 일치하며, 마찬가지로 조립질 화강암의 정치 직후에 남서쪽 연변부에서 초기 결정작용 시기를 나타내는 것으로 생각된다.

조립질 화강암에서 HC 765 시료는 12개 저어콘 입

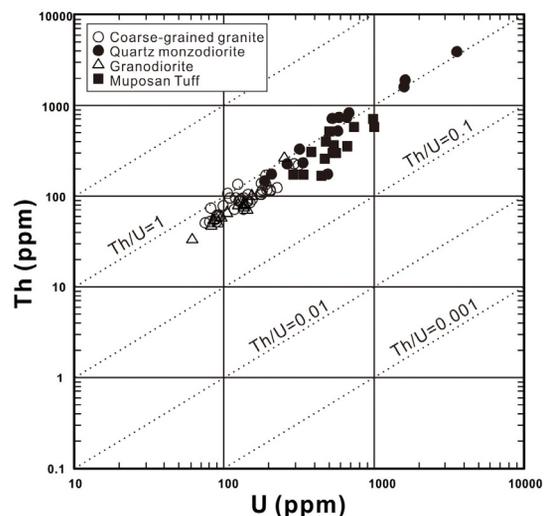


Fig. 3. Correlation diagram showing the proportions of Th to U concentrations (ppm) of the zircons analyzed by SHRIMP.

**Table 1.** Summary of SHRIMP U-Pb isotopic data of the analytical zircons from the Bunam Stock and Muposan Tuff.

Spot no.	<sup>206</sup> Pb <sub>c</sub> (%)	U (ppm)	Th (ppm)	<sup>232</sup> Th/ <sup>238</sup> U	±%	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±%	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±%	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U Age (Ma)	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb Age (Ma)	Discordancy (%)
Sample HC-771 (Coarse-grained granite)												
HC771_1.1	0.34	176	104	0.611	0.35	0.0503	5.2	0.0385	1.6	77.5 ±2	699 ±226	+89
HC771_2.1	0.43	145	86	0.614	0.38	0.0510	10.6	0.0384	1.8	75.8 ±2	239 ±245	+69
HC771_3.1	0.52	146	104	0.735	0.37	0.0517	5.7	0.0378	1.8	79.7 ±3	716 ±245	+89
HC771_4.1	0.64	180	104	0.595	0.35	0.0526	5.0	0.0404	1.6	75.3 ±2		
HC771_5.1	0.75	127	86	0.699	0.40	0.0535	5.8	0.0399	2.1	75.4 ±2	-1150 ±1146	+107
HC771_6.1	--	195	117	0.620	0.34	0.0437	5.4	0.0387	1.5	78.5 ±1	549 ±257	+86
HC771_7.1	0.61	143	87	0.626	0.39	0.0523	5.7	0.0386	1.8	75.1 ±2	-336 ±494	+123
HC771_8.1	0.35	204	112	0.566	0.33	0.0503	4.7	0.0401	2.4	77.8 ±1	326 ±151	+77
HC771_9.1	2.73	155	91	0.608	0.39	0.0692	5.3	0.0386	1.8	76.8 ±2	-475 ±838	+117
HC771_10.1	--	151	85	0.581	0.38	0.0470	5.7	0.0384	1.7	77.8 ±2	225 ±207	+66
HC771_11.1	1.30	183	115	0.646	0.34	0.0578	4.7	0.0399	1.6	74.2 ±2	-60 ±386	+225
HC771_12.1	--	117	70	0.621	0.45	0.0437	7.0	0.0389	2.1	74.3 ±2		
HC771_13.1	0.14	178	109	0.634	0.35	0.0487	5.2	0.0396	1.6	77.5 ±1	-417 ±417	+119
HC771_14.1	0.10	136	70	0.533	0.42	0.0483	5.9	0.0394	1.8	75.2 ±2	-658 ±617	+112
HC771_15.1	--	90	60	0.694	0.49	0.0443	7.0	0.0395	2.0	83.8 ±3	1181 ±325	+93
Sample HC-783 (Coarse-grained granite)												
HC783_1.1	1.04	83	73	0.912	0.35	0.0558	5.6	0.0377	1.9	75.2 ±2	-177 ±479	+143
HC783_2.1	0.03	314	219	0.719	0.20	0.0479	3.2	0.0373	1.0	79.6 ±1	93.1 ±76	+15
HC783_3.1	--	178	136	0.789	0.26	0.0468	4.1	0.0401	1.4	80.3 ±1	39.4 ±99	-105
HC783_4.1	--	204	116	0.587	0.30	0.0436	4.7	0.0391	2.4	77.3 ±0.9	315 ±212	+76
HC783_5.1	--	89	55	0.637	0.45	0.0467	7.0	0.0396	2.3	77.2 ±2	505 ±312	+85
HC783_6.1	0.20	93	59	0.653	0.44	0.0491	6.8	0.0394	2.1	78.1 ±2	763 ±306	+90
HC783_7.1	0.40	90	52	0.600	0.49	0.0507	7.0	0.0392	2.2	76.3 ±2		
HC783_8.1	0.85	100	77	0.801	0.42	0.0542	6.7	0.0380	4.2	71.3 ±4	-546 ±775	+114
HC783_9.1	0.01	135	95	0.729	0.38	0.0476	4.5	0.0378	1.5	75.8 ±2	617 ±271	+88
HC783_10.1	0.69	120	93	0.799	0.37	0.0530	4.0	0.0402	1.4	71.6 ±2		
HC783_11.1	0.67	76	50	0.685	0.48	0.0529	5.1	0.0407	1.7	82.6 ±3	1270 ±311	+94
HC783_12.1	0.86	129	86	0.686	0.37	0.0543	4.0	0.0388	2.3	75.0 ±2	540 ±168	+87
HC783_13.1	0.34	192	170	0.916	0.28	0.0503	7.2	0.0397	1.1	75.4 ±1	-804 ±654	+110
Sample HC-765 (Coarse-grained granite)												
HC765_1.1	0.18	230	122	0.55	0.31	0.0489	4.1	0.0366	1.3	75.7 ±2	-318 ±299	+125
HC765_2.1	--	110	96	0.90	0.37	0.0459	6.2	0.0387	1.8	76.8 ±2	200 ±234	+62
HC765_3.1	0.48	130	93	0.73	0.38	0.0513	5.6	0.0383	1.7	75.3 ±2	-966 ±858	+108
HC765_4.1	0.72	191	132	0.72	0.31	0.0532	4.4	0.0369	1.4	73.7 ±1	-308 ±390	+125
HC765_5.1	--	95	58	0.63	0.44	0.0458	6.8	0.0375	2.0	78.9 ±1	923 ±320	+92
HC765_6.1	1.05	107	107	1.03	0.36	0.0559	11.9	0.0383	1.9	75.5 ±2	-805 ±1026	+110
HC765_7.1	0.28	90	61	0.69	0.42	0.0497	6.3	0.0377	2.0	75.0 ±2	183 ±147	+59
HC765_8.1	0.22	293	223	0.78	0.25	0.0493	3.6	0.0380	1.1	76.1 ±2	477 ±145	+85
HC765_9.1	0.31	125	132	1.09	0.33	0.0500	5.5	0.0381	1.7	74.9 ±1		
HC765_10.1	--	81	52	0.66	0.47	0.0470	7.3	0.0374	2.1	73.3 ±2		
HC765_11.1	0.75	93	59	0.66	0.47	0.0534	7.0	0.0344	2.2	76.9 ±1	949 ±302	+92
HC765_12.1	0.45	129	89	0.71	2.07	0.0511	5.6	0.0342	1.8	74.1 ±2	-161 ±367	+147

Table 1. continued.

Spot no.	<sup>206</sup> Pb <sub>c</sub> (%)	U (ppm)	Th (ppm)	<sup>232</sup> Th/ <sup>238</sup> U	±%	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±%	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±%	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U Age (Ma)	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb Age (Ma)	Discordancy (%)
Sample HC-752 (Quartz monzodiorite)												
HC752_1.1	0.45	189	144	0.79	0.35	0.0511	5.3	0.0359	1.7	76.9 ±1	655 ±226	+89
HC752_2.1	--	575	522	0.94	0.21	0.0469	3.2	0.0368	1.0	78.0 ±2	158 ±105	+51
HC752_3.1	--	593	721	1.26	0.22	0.0436	3.3	0.0358	1.0	77.2 ±0.9	-697 ±280	+112
HC752_4.1	0.01	3589	3865	1.11	0.12	0.0476	1.2	0.0386	0.9	78.4 ±1	23.3 ±39	-238
HC752_5.1	0.26	492	172	0.36	0.64	0.0496	3.5	0.0338	2.1	75.5 ±0.9	24.0 ±144	-216
HC752_6.1	0.40	661	722	1.13	0.41	0.0507	3.0	0.0338	3.3	75.5 ±0.8	-115 ±180	+167
HC752_7.1	0.39	689	829	1.24	0.19	0.0506	2.8	0.0372	0.9	77.3 ±1	477 ±110	+84
HC752_8.1	0.12	323	326	1.04	0.26	0.0484	4.4	0.0333	1.5	75.4 ±2	429 ±180	+83
HC752_9.1	--	340	229	0.70	0.78	0.0460	4.9	0.0281	3.1	62.0 ±2	293 ±202	+79
HC752_10.1	0.06	535	704	1.36	0.20	0.0480	3.4	0.0335	1.0	76.2 ±1	441 ±142	+83
HC752_11.1	--	1618	1885	1.20	0.33	0.0472	1.9	0.0355	1.1	78.1 ±1	97.9 ±53	+20
HC752_12.1	--	1608	1569	1.01	0.32	0.0466	2.0	0.0358	1.6	76.9 ±1	14.3 ±51	-440
HC752_13.1	--	265	225	0.88	0.30	0.0469	5.0	0.0349	1.5	75.2 ±2	-886 ±603	+109
HC752_14.1	0.20	208	171	0.85	0.33	0.0491	5.3	0.0355	1.7	75.6 ±1	-461 ±465	+117
Sample HC-770 (Granodiorite)												
HC770_1.1	0.04	92	53	0.592	0.52	0.0478	7.7	0.0371	2.4	70.7 ±3		
HC770_2.1	0.03	125	84	0.692	0.41	0.0479	6.5	0.0384	2.0	76.2 ±2		
HC770_3.1	--	95	61	0.657	0.49	0.0427	8.1	0.0372	3.9	73.4 ±2		
HC770_4.1	--	154	105	0.704	0.38	0.0447	6.5	0.0369	1.9	73.0 ±1	-657 ±548	+112
HC770_5.1	--	143	74	0.533	0.43	0.0439	6.8	0.0388	4.0	77.4 ±3	897 ±309	+92
HC770_6.1	0.47	62	34	0.578	0.65	0.0513	9.7	0.0372	2.9	72.4 ±2		
HC770_7.1	--	135	77	0.590	1.81	0.0447	15.0	0.0399	2.6	77.5 ±1	-73 ±367	+208
HC770_8.1	--	104	68	0.672	0.41	0.0461	6.6	0.0368	2.0	76.7 ±2	-1017 ±867	+108
HC770_9.1	0.19	251	274	1.126	0.22	0.0491	4.1	0.0366	2.1	77.9 ±1	-52 ±189	+250
HC770_10.1	0.32	137	83	0.622	0.37	0.0501	5.6	0.0356	1.8	73.0 ±3	-1121 ±951	+107
HC770_11.1	--	136	86	0.652	0.37	0.0448	6.0	0.0378	1.8	76.9 ±1	304 ±261	+75
HC770_12.1	--	86	56	0.675	0.48	0.0420	8.2	0.0368	2.3	72.1 ±2		
HC770_13.1	--	82	50	0.625	0.50	0.0448	14.5	0.0355	2.4	78.2 ±2	1294 ±381	+95
Sample HC-721 (Muposan Tuff)												
HC721_1.1	--	985	710	0.74	0.24	0.0457	3.9	0.0335	1.9	64.9 ±0.8	-688 ±367	+110
HC721_2.1	0.02	289	171	0.61	0.43	0.0475	6.7	0.0356	2.0	64.0 ±1	-991 ±917	+107
HC721_3.1	--	481	399	0.86	1.04	0.0440	4.9	0.0385	1.5	66.2 ±1	-112 ±121	+160
HC721_4.1	0.26	662	358	0.56	0.99	0.0494	4.6	0.0328	3.1	66.9 ±2	-471 ±405	+115
HC721_5.1	--	556	298	0.55	0.66	0.0451	4.7	0.0362	3.7	68.7 ±1	77.4 ±160	+11
HC721_6.1	--	444	167	0.39	1.31	0.0465	5.3	0.0352	3.8	65.5 ±3	-148 ±228	+145
HC721_7.1	--	467	258	0.57	0.36	0.0465	5.7	0.0308	1.9	68.4 ±1	26.2 ±136	-162
HC721_8.1	0.29	342	174	0.53	1.62	0.0496	5.5	0.0391	1.7	62.3 ±2	175 ±129	+65
HC721_9.1	0.21	1004	578	0.59	1.57	0.0490	3.4	0.0359	3.5	67.9 ±0.7	273 ±112	+76
HC721_10.1	0.72	384	309	0.83	0.34	0.0530	5.8	0.0324	7.2	61.3 ±4	-936 ±903	+107
HC721_11.1	--	535	296	0.57	0.85	0.0461	4.6	0.0410	2.3	68.7 ±2	-435 ±326	+116
HC721_11.2	--	503	511	1.05	2.03	0.0466	9.2	0.0379	1.5	70.1 ±1	26.9 ±220	-162
HC721_12.1	--	539	368	0.70	0.44	0.0446	3.2	0.0323	2.1	67.1 ±0.7	41.3 ±108	-63
HC721_13.1	0.45	735	576	0.81	1.53	0.0509	2.6	0.0330	3.7	66.7 ±2	342 ±83	+81

자에서 각 1점씩 점분석을 실시하였는데 71.3~82.6 Ma 범위로서 비교적 좁은 분포를 보인다(표 1). 이 분석치들도 일치곡선 상에 놓이며 의미있는 연령을 나타낸다. 통계적으로 처리하면  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  가중평균연령은  $75.75 \pm 0.72$  Ma ( $n=12$ ,  $\text{MSWD}=0.78$ )을 나타낸다(그림 4c). 이 연령은 조립질 화강암 연변부에서 채취한 HC 771 및 783의 연령보다 1.35~1.46 Ma 정도 젊은 연대를 보이는데, 이는 조립질 화강암의 중심부에서 결정작용이 더 늦게 진행되었다는 것을 암시한다고 판단된다.

석영몬조섬록암의 HC 752 시료도 14개 저어콘 입자에서 각 1점씩 점분석을 실시하였는데 62.0~78.4

Ma 범위를 나타낸다(표 1). 이 분석치들은 젊은 연령을 보이는 1점이 비교적 오차가 커서 군집에서 벗어나지만 대부분 매우 좁은 분포를 보인다. 따라서 군집에서 벗어난 62.0 Ma를 제외하면 나머지 분석치들은 일치곡선 상에 놓이는데, 13점을 통계적으로 계산하면  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  가중평균연령은  $76.64 \pm 0.75$  Ma ( $n=13$  of 14,  $\text{MSWD}=1.3$ )을 나타낸다(그림 5). 이 연령은 화강암질 마그마 속으로 주입된 석영몬조섬록암질 마그마의 정치와 결정작용 시기를 나타내는 것으로 판단된다.

화강섬록암의 HC 770 시료는 13개 저어콘 입자에서 각 1점씩 점분석을 실시하였는데 70.7~77.9 Ma

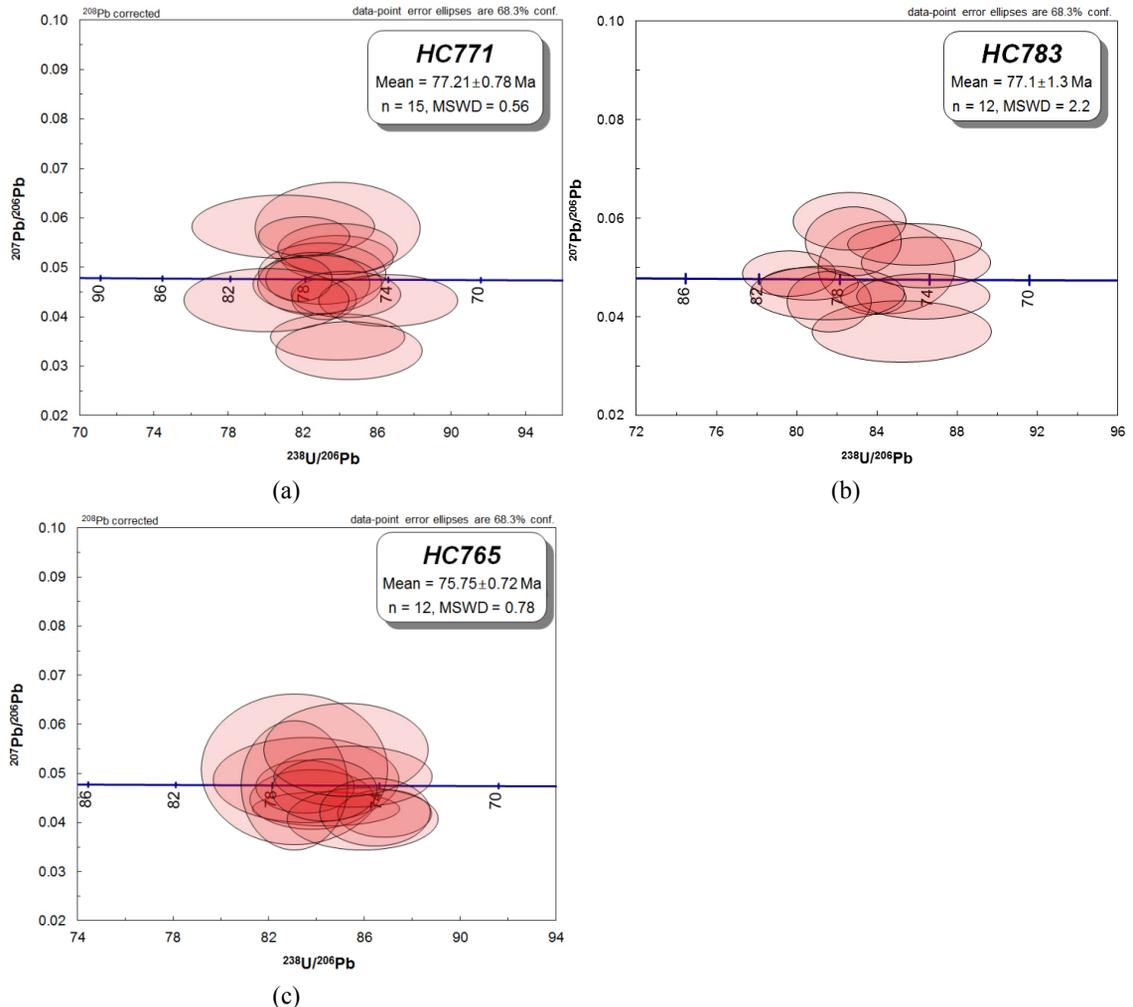


Fig. 4. Concordia diagrams for SHRIMP U-Pb ages of zircons separated from (a) sample HC 771, (b) HC 783 and (c) HC 765 in the Coarse-grained granite.

범위로서 비교적 좁은 분포를 보인다(표 1). 이 분석치들은 대개 일치곡선 상에 놓이며 의미있는 연령을 얻을 수 있다. 통계적으로 계산한  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  가중평균연령은  $76.20 \pm 0.94$  Ma ( $n=13$ ,  $\text{MSWD}=1.3$ )을 나타낸다(그림 6). 이 연령은 석영몬조섬록암에서 채취한 HC 752의 SHRIMP U-Pb 연대  $76.64 \pm 0.75$  Ma와 오차범위 내에서 일치하며, 두 연령의 일치 는 아마도 화강암질 마그마와 석영몬조섬록암질 마그마가 혼합작용으로 발생한 화강섬록암의 결정작용 시기를 나타내는 것으로 해석된다.

무포산응회암의 하부에서 채취한 HC 721 시료는 13개 저어콘 입자에서 각 1점씩, 1개 입자에서 2점

분석을 실시하였는데 61.3~78.7 Ma 범위로서 비교적 좁은 분포를 보인다(표 1). 이 분석치들도 대체로 일치곡선 상에 놓이며 의미있는 연령을 나타낸다. 통계적으로 처리하면  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  가중평균연령은  $67.08 \pm 0.96$  Ma ( $n=13$ ,  $\text{MSWD}=2.1$ )을 나타낸다(그림 7). 이 연령은 아마도 무포산응회암의 분출작용 시기를 나타내는 것으로 생각된다.

### 5. 토 의

이 연구는 부남암주 심성암류의 활동시기를 검증해보기 위하여 시작되었기 때문에 심성작용 시기에 대하여 먼저 토의하며, 그 다음에 무포산응회암의 분출시기에 대해 논의하고 층서관계를 알아보기로 한다.

#### 5.1 부남암주의 활동시기

부남암주에서 심성작용의 시작은 조립질 화강암이 그 열쇠를 가지고 있다. 조립질 화강암에서 회수한 저어콘들로부터 구한 연령은 북서쪽 연변부에서  $77.21 \pm 0.78$  Ma이고 남서쪽 연변부에서  $77.1 \pm 1.3$  Ma이며 중앙부에서  $75.75 \pm 0.72$  Ma이다. 부남암주 연변부에서의 두 연령은 서로 일치하며 화강암질 마그마가 현재의 위치로 올라와 퇴적암류 모암을 관입하면서 암주상으로 자리잡는 초기 정치시기를 암시하고 또한 이 암주의 연변부에서 초기 결정작용 시기를 가리키는 것으로 판단된다. 왜냐하면 연변부에

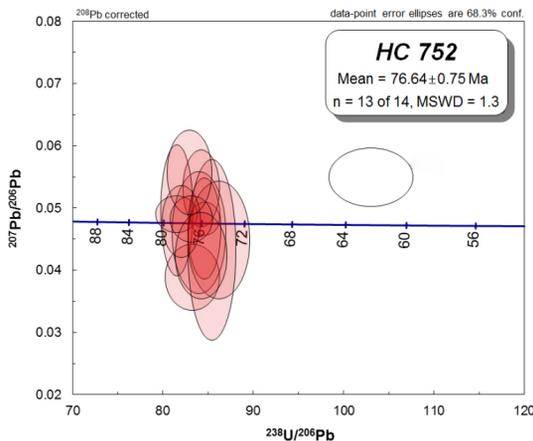


Fig. 5. Concordia diagram for SHRIMP U-Pb ages of zircons separated from sample HC 752 in the Quartz monzodiorite.

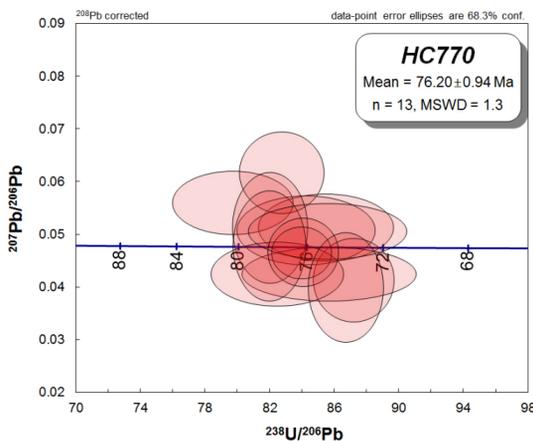


Fig. 6. Concordia diagram for SHRIMP U-Pb ages of zircons separated from sample HC 770 in the Granodiorite.

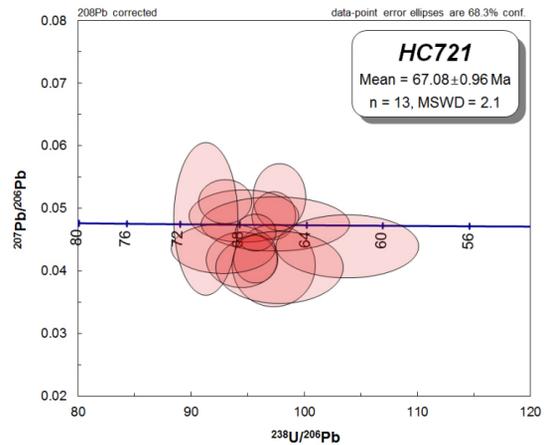


Fig. 7. Concordia diagram for SHRIMP U-Pb ages of zircons separated from sample HC 721 in the Muposan Tuff.

서 두 연령은 부남암주에서 가장 오래된 연령을 가리키고 있기 때문이다. 중앙부에서  $75.75 \pm 0.72$  Ma 연령은 연변부보다 후기 결정작용 시기를 지지하는 것으로 해석된다. 그러므로 세 연령을 제공한 시료의 채취위치가 북서부, 남서부와 중앙부로 멀리 떨어져 있기 때문에(그림 1) 공간적으로 생각하면 화강암질 마그마의 심성작용은 전체적으로 연변부에서 먼저 일어났고 점차 중심부로 진행되었던 것으로 짐작된다. 왜냐하면 암주와 같은 큰 심성암체는 대체로 차가운 퇴적암류 모암과 접촉하는 연변부에서부터 초기 결정작용이 발생하고 중심부로 향하는 점진적인 냉각에 따라 차츰 중심부에서 후기 결정작용이 일어나기 때문이다.

일반적으로 약 8 km 두께의 화강암질 저반과 같이 큰 마그마 덩어리가 결정화되는데 필요한 시간은 열전도율에 근거하면 100만년 이상 걸리는 것으로 계산되었다(Hyndman, 1985). 더 작은 관입체는 훨씬 더 짧은 시간에 결정화될 것이다. 예를 들면 350 m 아래에 관입한 700 m 두께의 휘록암 암상(sill)이 고화하는데 9천년이 걸린다. 반면에 200 m 두께의 암상은 단지 7백년 걸려 고화한다. 그러나 부남암주와 같이 큰 심성암체는 고화에 요구되는 시간이 이보다 훨씬 더 오래 걸릴 것이다. 거대한 화강암질 저반은 더욱 더 오래 걸릴 것이며, 이는 아마도 화강암질 저반의 정치시간에 관련되는 것으로 판단된다.

부남암주에서 측정된 연령치에서 가장 오래된 연령은  $77.1 \pm 1.3$  Ma이고 가장 젊은 연령은  $75.75 \pm 0.72$  Ma이다. 그러므로  $77.1 \pm 1.3$  Ma는 아마도 부남암주에서 심성작용이 시작하는 잠정적 시기를 가리키며,  $75.75 \pm 0.72$  Ma는 아마도 부남암주에서 심성작용이 거의 끝나는 잠정적 시기를 가리키는 것으로 생각된다. 이 두 연령 간의 차이 1.46 Ma는 부남암주의 심성암류가 결정화하여 고화하는데 요구되는 전기간이며, 아마도 부남암주가 자리잡는데 걸린 정치시간을 나타낸다. 일례로서 여러 개의 관입상으로 구성된 복합 Boulder 저반은, 모든 관입상의 결정화 시간의 전기간으로 추론할 때, 정치하는데 약 1천만년 걸린다고 한다(Hyndman, 1985).

부남암주에서 석영몬조섬록암과 화강섬록암의 연령은 혼합작용에 대한 실마리를 내포하고 있다. 석영몬조섬록암에서 회수한 저어콘들로부터 구한

연령은  $76.64 \pm 0.75$  Ma이며 화강섬록암의 저어콘들로부터 구한 연령은  $76.20 \pm 0.94$  Ma이다. 이 두 연령은 오차범위 내에서 일치하는 값을 가지는데, 두 연령의 일치하는 고화의 선후를 나타내지 않는다. 그러므로 화강섬록암이 석영몬조섬록암 속으로 관입했다고 할 수 없으며 차라리 석영몬조섬록암이 조립질 화강암 속으로 정치했다고 하는 것이 타당할 것이다. 다시 말하면 화강암질 마그마 속으로 석영몬조섬록암질 마그마가 올라와 거의 액체 상태에서 혼합작용을 일으켰다고 해야만 한다. 따라서 두 마그마 간에 혼합작용으로 인한 중간 조성의 혼성암(hybrid)이 양자의 중간부에 화강섬록암으로 존재하는 것으로 판단된다. 왜냐하면 조립질 화강암은 석영몬조섬록암보다 먼저 정치하였지만 중심부가  $75.75 \pm 0.72$  Ma 연령으로서 아직도 액체 상태로 남아있었기 때문에 이러한 혼합작용이 가능했던 것이다. 따라서 두 암석 간의 경계는 매우 불규칙한 관계를 보여주게 되는 것이고 화강섬록암 혼합대에 고철질 미립상 내포체가 기계적인 혼합의 흔적으로 남아 있는 것이다. 이때 더 고온의 석영몬조섬록암질 마그마가 더 저온의 화강암질 마그마 속으로 올라와 정치했기 때문에 약간 더 빨리 결정화되고 고화되었던 것이다.

## 5.2 무포산응회암의 분출시기

무포산응회암은 기존 연구에 의하면 전암 Rb-Sr 연대측정에 의해  $63.6 \pm 3.4$  Ma로 보고되었다(Hwang *et al.*, 2006). 이에 따라 부남암주는 제3기 전기에 해당 하는 것으로 생각하게 되었다. SHRIMP 저어콘 U-Pb 분석법에 의한 연령은  $67.08 \pm 0.96$  Ma를 나타낸다. 이 연령은 아마도 무포산응회암의 분출작용의 시기를 나타내는 것으로 생각된다. 따라서 무포산응회암도 백악기 말기에 속하고 부남암주보다 후기의 층서관계를 가진다는 것이 밝혀졌다.

무포산응회암의 연령  $67.08 \pm 0.96$  Ma는 이의 시료가 하부에서 채취된 것을 감안하면 부남암주에서 가장 젊은 연령  $75.75 \pm 0.72$  Ma보다 매우 젊은 나이를 나타낸다. 두 연령 간의 시간적 차이는 8.67 Ma로 상당히 큰 시간적 간격을 보이고 있다. 이 시간적 간격은 부남암주가 하양층군의 점곡층(950 m), 사곡층(2000 m)과 춘산층(700 m)과의 관입 관계를 가지면서 하부층인 점곡층과의 접촉부를 지표에 노출시

키고 무포산응회암이 그 위에 직접 놓이는 부정합 관계를 가지기 때문에 3개 층의 두께 3600 m 만큼의 최대 침식작용 기간을 말해준다. 따라서 8.67 Ma의 기간에 최대 약 3600 m의 두꺼운 퇴적층의 침식은 최대 약 0.42 mm/yr 침식률로 계산되는데, 이는 짧은 기간에 매우 심한 침식작용을 말해준다. 또한 이러한 침식률은 백악기 말기에 이 지역을 포함하는 동해안 지역의 용기가 비교적 심하게 일어났다는 것을 암시해준다.

### 5.3 층서관계

부남암주는 하양층군을 관입하고 동쪽에서 무포산응회암과 만나지만 암맥들의 관입으로 층서관계가 명확하지 않기 때문에 통상적으로 화산암류(무포산응회암)를 관입하는 것으로 여겨져 왔다(Kwon and Lee, 1973; Lee and Hong, 1973). 더군다나 지금까지 부남암주에 대한 정확한 연령이 밝혀진 바도 없었다. 따라서 이 부남암주는 기존의 불국사통 혹은 불국사관입암군으로 대비시켰으며 신라통 혹은 하양층군과 유천층군을 관입하는 것으로 보았다(Lee and Hong, 1973; Hwang *et al.*, 1996).

위에서 말한 시간적 간격은 부남암주 심성암류와 무포산응회암과의 관계가 난정합(nonconformity)이라고 할 수 있는 부정합 관계를 의미해준다. 이 부정합 관계는 지하 심부에 자리잡고 있던 부남암주 심성암류가 지표에 들어날 만큼 침식으로 삭박되었다는 것을 의미한다. 이러한 관계는 부남암주와 무포산응회암이 공간적으로 서로 접하지만 시간적으로 백악기 후기에 상당히 큰 시간적 차이를 가지며 층서적으로 무포산응회암이 부남암주 심성암류 위에 놓인다는 점에서 이 지역에서의 층서를 재정립할 필요가 있다고 생각된다. 즉 부남암주 심성암류는 층서적으로 불국사관입암군에 속하지만, 이 때문에 무포산응회암은 유천층군의 범위를 벗어나게 되는 것이다.

무포산응회암을 포함하여 주왕산 화산지역의 화산암류는 암층 구성원에 의하여 통상적으로 경상분지의 유천층군에 대비하였지만(Hwang and Kim, 2006), 위의 층서관계에 의하면 적어도 경상분지 유천층군 범주를 벗어나기 때문에 일반적인 기대와는 크게 상충되는 결과를 나타낸다. 왜냐하면 구암산응회암, 무포산응회암과 주왕산응회암은 Rb-Sr 전암

연령이 56~63.4 Ma로 측정되어 모두 제3기 전기에 해당되며(Hwang, 2002; Hwang and Kim, 2006; Hwang *et al.*, 2007), 한편 지품화산암층, 면봉산응회암 등의 여러 화산암층들도 무포산응회암과 유사한 저어콘 U-Pb 연령으로 측정되었기 때문이다(미발표 자료).

그러나 이 분석자료는 주왕산 화산지역으로 확대시켜 광역적인 화산작용과 심성작용의 여러 단계를 정확히 해석하기에는 부족한 면이 상당히 있기 때문에 연구지역을 단계적으로 인접 지역으로 확장하여 여러 암층별로 보다 정확한 연령과 층서관계를 알아내기 위해 앞으로 추가적인 작업이 요구된다.

## 6. 결 론

부남암주는 하양층군을 관입하고 동쪽에서 무포산응회암과 만나지만 암맥들의 관입으로 층서관계가 명확하지 않기 때문에 통상적으로 무포산응회암도 관입하는 것으로 여겨져 왔다. 따라서 이 부남암주는 기존의 불국사관입암군으로 대비시켰으며 하양층군과 유천층군을 관입하는 것으로 보았다.

부남암주 심성암류와 무포산응회암은 고분해능 이차이온 질량분석기(SHRIMP)를 이용하여 저어콘 U-Pb 연령측정을 실시함으로써 이들의 정치시기와 층서관계를 확실하게 하였다. SHRIMP 저어콘 연대 측정의 결과는 조립질 화강암이 연변부에서  $77.1 \pm 1.3$  Ma,  $77.21 \pm 0.78$  Ma, 중앙부에서  $75.75 \pm 0.72$  Ma이고, 화강섬록암이  $76.20 \pm 0.94$  Ma, 석영몬조섬록암이  $76.64 \pm 0.75$  Ma를 가진다. 또한 무포산응회암은  $67.08 \pm 0.96$  Ma의 연령을 얻었다.

이 자료는 화강암질 마그마가 연변부에서 중심부로 결정화 도중에 석영몬조섬록암질 마그마가 관입하여 혼합됨으로서 중간부에 화강섬록암이 만들어졌다는 것을 사사해준다. 그리고 부남암주와 무포산응회암은 백악기 후기에 속하지만 8.67 Ma의 시간적 간격을 가지기 때문에 무포산응회암이 부남암주보다 후기라는 부정합적 층서관계를 지시해준다. 또한 이 시간 간격에 두꺼운 퇴적층의 침식으로 인해 약 0.42 mm/yr 침식률을 나타낸다. 그러므로 부남암주는 불국사관입암군에 속하기 때문에 무포산응회암은 유천층군의 범위를 벗어나는 층서를 나타낸다.

## 사 사

이 논문은 2015학년도 안동대학교 연구비에 의하여 수행된 연구이다. SHRIMP U-Pb 분석에 도움을 준 한국기초과학지원연구원 관계자에게 감사를 드린다. 심사과정을 통하여 원고를 꼼꼼하게 읽고 건설적인 지적을 하여 논문의 질을 향상시켜준 두 익명의 심사위원께도 사의를 표한다. 그림은 암석학 실험실 이소진의 도움으로 제작되었다.

## REFERENCES

- Ahn, U.S. and Hwang, S.K., 2007, Determination of flow direction from indicators in the Muposan Tuff, southern and eastern Cheongsong, Korea. *Journal of the Economic and Environmental Geology of Korea*, 42, 253-271 (in Korean with English abstract).
- Chang, K.H., 1975, Cretaceous stratigraphy of southeast Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 11, 1-23.
- Chang, K.H., 1977, Late Mesozoic stratigraphy, sedimentation and tectonics of southeastern Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 13, 76-90 (in Korean with English abstract).
- Chang, K.H., 1985, *Geology of Korea*. Mineumsa Publishing Co., 270 p.
- Chang, K.H., Ko, I.S., Lee, J.Y. and Kim, S.W., 1977, Explanatory text of the geological map of Gusandong Sheet. Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources, 25 p.
- Chang, K.H., Ko, I.S., Park, H.I., Chi, J.M. and Kim, H.M., 1978, Explanatory text of the geological map of Cheonji Sheet. Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources, 20 p.
- Cheong, C.-S., Kim, N., Kim, J., Yi, K., Jeong, Y.-J., Park, C.-S., Li, H.-K. and Cho, M., 2014, Petrogenesis of Late Permian sodic metagranitoids in southeastern Korea: SHRIMP zircon geochronology and elemental and Nd-Hf isotope geochemistry. *Journal of Asian Earth Sciences* 95, 228-242.
- Cheong, C.-S., Kwon, S.-T. and Sagong, H., 2002, Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic investigation of Triassic granitoids and basement rocks in the northern Gyeongsang Basin, Korea: Implications for the young basement in the East Asian continental margin. *The Island Arc*, 11, 25-44.
- Hwang, J.H., Kim, D.H., Jo, D.R. and Song, K.Y., 1996, Explanatory note of the geological map of Andong Sheet (1:250,000). Ministry of Science and Technology of Korea, 61 p.
- Hwang, S.K., 1998, Volcanic geology in the Cheongsong area. '98 Spring Geological Field Excursion of the Geological Society of Korea, 40 p.
- Hwang, S.K., 2002, Magmatic evolution of volcanic rocks related with the Guamsan caldera, southeastern Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 38, 341-359 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K. and Choi, B.Y., 2001, Lithofacies and igneous processes of plutonic rocks in Bohyeonsan area, northern Yeongcheon. *Journal of the Geological Society of Korea*, 37, 1-20 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K. and Kim, S.H., 2006, Magmatic processes of the Muposan Tuff, southern and eastern Cheongsong, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 42, 253-271 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Lee, B.J. and Reedman, A.J., 2007, Magmatic processes of the Juwangsan Tuff, southeastern Cheongsong, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 43, 65-81 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Son, J.D., Lee, B.J. and Reedman, A.J., 2002, Eruptive phases and volcanic processes of the Guamsan caldera, southeastern Cheongsong, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 11, 74-89 (in Korean with English abstract).
- Hyndman, D.W., 1985, *Petrology of igneous and metamorphic rocks*. McGraw-Hill, New York, 2nd ed. 786 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.
- Jwa, Y.-J., 1996, Chemical Composition of Korean Cretaceous Granites in the Gyeongsang Basin I. Major Element Variation Trends. *Journal of Korean Earth Science Society*, 17, 318-325.
- Jwa, Y.-J., Kim, J.-S. and Kim, K.-K., 2005, Granite suite and supersuite for the Triassic granites in South Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 14, 226-236 (in Korean with English abstract).
- Jwa, Y.-J. and Kim, K.-K., 2000, Petrology of host granites and enclaves from the Bohyeonsan area, Euisong basin, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 9, 187-203 (in Korean with English abstract).
- Kwon, Y.I. and Lee, I.K., 1973, Explanatory text of the geological map of Dopyeong Sheet. Geological and Mineral Institute of Korea, 9 p.
- Lee, H.K. and Hong, S.H., 1973, Explanatory text of the geological map of Cheongsong Sheet. Geological and Mineral Institute of Korea, 23 p.

- Lee, S.-M., Kim, S.-W. and Jin, M.-S., 1987, Igneous activities of the Cretaceous to the Early Tertiary and their tectonic implications in South Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 23, 338-359 (in Korean with English abstract).
- Ludwig, K.R., 2008, SQUID 2: A User's Manual. Berkeley, CA, Berkeley Geochronology Center Special Publication, No 2, 100 p.
- Park, K.-H., 2012, Cyclic igneous activities during the Late Paleozoic to Early Cenozoic period over the Korean peninsula. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 21, 193-202 (in Korean with English abstract).
- Sagong, H., Kwon, S.-T. and Ree, J.-H., 2005, Mesozoic episodic magmatism in South Korea and its tectonic implication. *Tectonics*, 24.
- 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, Society of Economic Geologists, 1-35.

---

Received : July 29, 2016

Revised : August 21, 2016

Accepted : August 23, 2016