

## 하동-산청 회장암질암의 유체-암석 상호반응에 대한 산소와 수소 동위원소 연구

박영록<sup>1,\*</sup> · 고보균<sup>1</sup> · 이광식<sup>2</sup>

강원대학교 지질학과, <sup>2</sup>한국기초과학지원연구원

## Oxygen and Hydrogen Isotope Studies of Fluid-Rock Interaction of the Hadong-Sancheong Anorthositic Rocks

Young-Rok Park<sup>1,\*</sup>, Bokyun Ko<sup>1</sup> and Kwang-Sik Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

<sup>2</sup>Isotope Research Team, Korea Basic Science Institute, Taejeon 305-333, Korea

**요약:** 연구 지역에 분포하는 회장암체는 분포상태와 암상에 의해 북쪽의 산청회장암체와 남쪽의 하동회장암체로 구분된다. 이들 회장암체 내에 발달했던 열수시스템의 특성에 대해 알아보기 위해 산소와 수소 안정 동위원소 조성을 측정해 보았다. 연구 지역에 있는 회장암체의  $\delta^{18}\text{O}_{\text{plagioclase}}$  값은 공간적인 분포에 따라 서로 다른 값을 가지는 특징을 보여준다. 즉 북쪽에 분포하는 산청회장암체 사장석의  $\delta^{18}\text{O}$  값은 맨틀기원의 신선한 회장암의 전형적인 값(6~6.5‰)보다 더 무거운 값인 7.3~8.8‰ 사이의 값으로서, 비교적 좁은 범위의 값을 갖는 특징을 보여준다. 이와는 달리 남쪽에 분포하는 하동회장암체 사장석은 -4.4~8.2‰ 사이의 넓은 범위의  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가지며, 맨틀기원의 신선한 회장암의 전형적인 값보다 낮은  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가진다. 연구 지역의 중간 지역에 분포하는 회장암을 구성하는 사장석은 북쪽 지역의 사장석과 남쪽 지역의 사장석이 갖는  $\delta^{18}\text{O}$  값의 중간 값을 갖는다.  $\delta^{18}\text{O}$  값의 이러한 공간적인 분포는 지역에 따라 서로 다른 열수시스템이 발달되었음을 시사한다. 즉, 연구 지역의 남쪽 지역에서는 천수에 의해 발달된 열수시스템이 우세하게 발달한 반면에, 북쪽 지역에서는 마그마 기원의 유체에 의해 발달된 열수시스템이 우세하였다. 회장암의 수소 안정 동위원소 조성은 이들 전암 내에 들어있는 물의 함량과의 관계는 정의 관계를 보여주며, 이러한 결과는 회장암질암을 형성한 마그마의 분화 작용이 일어나는 동안에 용리작용(exsolution)에 의해서 마그마로부터 분리된 유체가 자생변질작용을 일으킴으로써 초생 보통휘석을 각섬석으로 변화시켰음을 시사해준다. 이러한 자생변질작용이 일어난 이후에, 천수기원의 유체에 의해 형성된 열수시스템이 연구 지역의 남쪽에 발달함으로써 마그마에서 유래한 유체에 의한 열수시스템의 흔적이 지워져버렸다. 그러나 북쪽에 있는 산청회장암체는 이 열수시스템에 의한 영향을 거의 받지 않고 마그마 기원의 유체에 의해 형성되었던 열수시스템의 흔적을 잘 기록하고 있다. 연구 지역의 북쪽에 분포하는 산청암체 보다 남쪽에 분포하는 하동암체에서 견운모, 방해석, 녹니석과 같은 이차 변질광물들이 더 많이 관찰되는 것은 이 지역에서 중첩되어 발달되었던 열수시스템과 관련이 있는 것으로 생각된다.

**핵심어:** 하동-산청 회장암질암, 암석-유체 상호작용, 산소 안정 동위원소, 수소 안정 동위원소, 열수시스템

**Abstract:** The anorthositic rocks of the study area are divided into the northern Sancheong and southern Hadong anorthositic rocks depending on the different distribution patterns and lithologies. In order to evaluate the characteristics of the hydrothermal systems developed in the study area, oxygen and hydrogen isotopic compositions of the anorthositic rocks were measured. Oxygen isotopic values of the plagioclase exhibit an interesting spatial distribution. Plagioclase collected from the Sancheong anorthositic rocks in the northern part tends to have a relatively restricted range of  $\delta^{18}\text{O}$  values between 7.3 and 8.8‰, which are heavier than 'normal'  $\delta^{18}\text{O}$  value (6~6.5‰) typical for plagioclase of the fresh mantle-derived anorthosite, whereas plagioclase from the southern part is characterized by a wide range of  $\delta^{18}\text{O}$  values between -4.4 and 8.2‰ and much lighter values than 'normal' value for plagioclase of the fresh mantle-derived anorthosite. Plagioclase from the middle part has  $\delta^{18}\text{O}$  values heavier than the plagioclase from the

\*Corresponding author: Tel. 82-33-250-8552, E-mail. yrpark@kangwon.ac.kr

southern part, but lighter than that from the northern part. The spatial distribution of  $\delta^{18}\text{O}$  values suggests that the decoupled hydrothermal flow systems might have been developed in the study area. Meteoric water dominated in the hydrothermal flow systems developed in the southern area, whereas magmatic fluid dominated in the northern area. The relationship between water content and hydrogen isotopic composition of anorthosites shows a positive correlation. The positive correlation indicates that fluids exsolved from magma during magmatic differentiation caused deuteric alteration of anorthositic rocks involving replacement of pyroxenes to amphiboles. After the deuteric alteration, hydrothermal system developed by meteoric water dominated the southern area, and erased record of the hydrothermal system developed by magmatic fluid at earlier stage. However, the development of meteoric hydrothermal system has been limited in the southern area only, and could not affect the Sancheong anorthositic rocks in the northern area. The abundant occurrences of secondary alteration minerals such as sericite, calcite, and chlorite in the southern Hadong anorthosite relative to the northern Sancheong anorthosite seem to be related to the overlapping of two distinct hydrothermal systems in the southern area.

**Key words:** Hadong-Sancheong anorthositic rocks, fluid-rock interaction, oxygen stable isotope, hydrogen stable isotope, hydrothermal system

## 서 언

주로 중기 원생대의 제한된 기간 동안에 생성된 매시프형 회장암질암(massif-type anorthositic rocks)은 특이한 조성으로 인해 세계적으로 많은 암석학자와 지구과학자들의 연구 대상이 되어왔다. 우리나라에도 하동과 산청 지역에 이러한 매시프형 회장암 복합체가 분포하고 있다(정지곤 1987; 정지곤 외 1989; 이종만 외, 1999). 이 회장암 복합체에 대해서는 많은 광물학적, 암석학적, 지화학적 연구가 이루어졌으나(e.g., 정지곤, 1987; 정지곤 외, 1989; 김원사, 1992; 이종만 외, 1999), 동위원소를 이용한 연구는 방사성 동위원소를 이용한 연구가 이루어졌을 뿐(Kwon and Jeong, 1990; 박계현 외, 2001), 안정 동위원소 특성에 대한 연구는 전혀 수행되지 않았다. 이 연구에서는 산소와 수소 안정동위원소 분석을 통해 연구 지역의 북쪽에 분포하는 산청회장암체와 남쪽에 분포하는 하동회장암체가 안정 동위원소 조성에 있어서 어떠한 차이를 보이는가를 고찰해보았다. 또한 회장암 복합체와 그 주변에 분포하는 암석들이 결정화 되고 난 이 후에 이 지역에 발달되었던 열수시스템의 특성에 대해 살펴보았다. 이 연구 지역에 분포하는 회장암들이 가지는 특징 중의 하나는 휘석 대신에 OH 성분을 갖는 각섬석이 우세한 유색광물로 정출된다는 점이다. 이러한 각섬석의 대부분은 휘석이 변질되어 생성된 것들로서, 산소와 수소 안정 동위원소 측정을 통해 각섬석의 생성에 관여한 유체의 근원을 살펴보았다.

## 지질개요 및 암석지재

산청 지역의 지질은 김옥준 외(1964)의 1:50,000 도

폭, Jeong(1982), 정지곤 외(1989) 및 이종만 외(1999)의 논문에 자세하게 소개되어있다. 산청 지역은 선캄브리아기의 지리산 편마암 복합체의 암석들과 회장암질암 및 주라기의 심성암류들로 구성되어있다. 연구 지역의 기반암은 소백산 육괴 남서부의 지리산 편마암 복합체로서 변성이질암, 호상편마암, 반상변정질 편마암, 화강암질 편마암으로 구성된다. 이들은 최소 3회의 광역변성작용의 영향을 받았는데, 상부 각섬암상 → 각섬암상 → 녹염석-각섬암상(또는 녹색편암상)으로 후퇴 변성되었다(이상만, 1980; 송용선, 1981; 이상만 외, 1981; 이상만과 김형식, 1984). 이들 3차례의 변성작용 중에서 하동-산청 회장암체는 마지막 변성작용의 영향을 받았으며, 회장암체에 나타나는 변성광물조합을 통해 녹염석-각섬암상과 녹색편암상 및 양자의 점이상에 해당됨을 알 수 있다(정지곤과 이상만, 1986). 그러나 최근의 연구(송용선과 류호정, 1993; 김동연, 1999; 송용선, 1999)에서 백립암상의 변성광물군이 보고되었으며, 이번 연구에서도 이를 확인하였다. Kwon and Jeong (1990)에 의해 측정된 회장암질암의 Sm-Nd 동위원소 연대는  $1678 \pm 90$  Ma, 박계현 외(2001)에 의해 회장암체 내에 배태된 함티타늄 회장암체에서 분리한 광물들에 대해 측정한 Sm-Nd 연대는  $1792 \pm 90$  Ma로 하동-산청 회장암체는 원생대에 형성되었음이 밝혀졌다.

연구 지역의 회장암체는 크게 두 부분으로 나누어진다. 연구 지역의 중앙부에 분포하고 있는 섬강암을 중심으로, 북쪽에 분포하는 마름모내지 원형의 회장암체와, 남쪽에 위치하며 남북방향으로 길게 대상으로 분포하는 회장암체이다. 북쪽에 분포하는 회장암체는 산청암체, 남쪽에 대상으로 분포하는 회장암체는 하동암체로 명명되었다(Jeong, 1982). 산청과 하동회장암체는 산출상태와 암석내부의 광물조직을 근거로 섬강암이

관입하기 이전에는 서로 연결된 하나의 암체였을 것으로 추정되었다(Jeong, 1982).

이중만 외(1999)는 하동암체를 엽상형, 괴상형 및 간극누적형의 세 가지 암상으로 구분하였으며, 가운데 분포하는 괴상형 회장암을 중심으로 바깥쪽에 간극누적형 회장암이, 가장 바깥쪽에 엽상형 회장암이 좌우 대칭적으로 분포한다고 보고하였다. 산청암체는 괴상형 회장암이 대부분을 차지하며 동쪽과 서쪽 연변부를 따라서 우백질 반려암이 분포한다고 보고되었다(Jeong, 1982). 이 연구에서는 산청암체의 동쪽 연변부에 분포하는 우백질 반려암을 간극누적형 회장암에, 서쪽 연변부에 분포하는 우백질 반려암을 엽상형 회장암에 대비하여 분류하였다. 연구 지역의 회장암질암은 유형별로 분포양상이 다르게 나타난다. 엽상형 회장암과 간극누적형 회장암은 산청암체보다 하동암체에서 우세하게 나타난다. 엽상형 회장암의 경우 산청암체에서는 암체의 서부에 소규모로 분포하며, 하동암체에서는 암체의 가장 바깥쪽에 기반암과 접촉하며 분포하고 양쪽으로 대칭적인 분포를 한다. 간극누적형 회장암의 경우 산청암체에서는 암체의 동부에 분포하고, 하동암체에서는 엽상형 회장암과 마찬가지로 대칭 분포를 하며 엽상형 회장암의 안쪽에 분포한다. 괴상형 회장암은 산청암체의 대부분을 차지하는 넓은 분포를 보이며, 하동암체에서는 중심부에 남북 방향으로 대상 분포한다.

엽상형 회장암은 유색광물이 특징적으로 방향성을 가지는 조직을 보이며 야외 노두에서 무색광물대와 유색광물대가 뚜렷하게 잘 구분된다. 사장석과 각섬석류가 주구성광물이며 녹니석, 녹염석, 견운모, 방해석, 불투명광물, 흑운모, 스펀이 부구성광물로 나타난다. 사장석은 대부분 중립질이며 기계적인 변형에 의해 내부에 미세단층(microfault)이 많이 발달하였으며, 알바이트 쌍정이 여긋나 있거나 휘어져 나타나는 경우가 잘 관찰된다. 또한 미세단층에 의해 형성된 균열을 uralite와 녹니석, 녹염석 등이 충전한 경우도 있다. 각섬석은 거의 대부분 휘석의 변질에 의해 2차적으로 형성된 것으로 추정되며, 침상 또는 세립의 각섬석이 녹니석, 녹염석과 함께 집합체(aggregate)를 이루는 경우가 관찰된다. 중심부에 휘석의 흔적이 약하게 남아 있는 경우도 있으며, 2차적으로 형성된 각섬석이 다시 녹니석으로 변질된 것을 관찰할 수 있다. 미세단층을 따라 형성된 균열면에 방해석 맥이 형성되어 있으며 방해석 맥 주변에 세립의 방해석이 흩어져 분포하기도 한다. 또한 방해석 맥이 형성되지 않은 암석에서도 세립의 방해석이 흩어져서 소량 분포하기도 한다. 흑운모와 세립의 스펀이 부구성광물로 나타나기도 하는데, 심한 변

질의 영향으로 흑운모 고유의 광학적 특징은 관찰되지 않으며 벽개면과 결정면을 따라서 불투명광물과 타형의 스펀이 소량 관찰된다.

간극누적형 회장암은 엽상형 회장암과 구성광물은 거의 동일하나 뚜렷한 방향성이 관찰되지 않는 경우가 많다. 대부분의 유색광물이 불규칙하게 집중된 경우가 잘 관찰되며, 이와는 반대로 유색광물이 암석전체에 골고루 분포하여 암석의 색이 전체적으로 엽상형 회장암보다 어두운 색을 띠기도 한다. 유색광물이 집중된 것은 각섬석과 불투명광물의 집합체이며 각섬석의 크기가 커서 라멜라 쌍정을 보이기도 한다. 방해석을 소량 함유한 시료가 있긴 하지만, 엽상형 회장암에 비해 방해석을 함유하는 시료의 개수가 적고 그 양도 적다. 소량의 녹염석이 각섬석, 불투명광물과 함께 집합체를 형성하기도 한다.

괴상형 회장암은 중립 내지 조립의 사장석이 95% 이상을 차지하며 유색광물은 소량 분포하기 때문에 아주 밝은 색을 띠며, 소량의 각섬석, 녹니석, 견운모, 녹염석, 방해석, 불투명광물이 부구성광물로 나타난다. 다른 유형의 회장암과 마찬가지로 사장석 내에 미세단층이 많으며 이를 녹니석, 녹염석 등이 충전한다. 각섬석의 함량이 매우 적어서 특징적인 조직은 관찰되지 않으며 간극누적형으로 갈수록 각섬석의 함량이 점이적으로 많아진다.

괴상형 회장암의 경우에 하동암체의 남쪽에서 매우 밝은 색을 띠며 북쪽으로 갈수록 점차 어두운 색으로 바뀌어 웅석봉 부근에서는 담회색을 띠고 산청암체의 괴상형 회장암은 웅석봉 부근의 암석과 유사한 색을 띤다. 그리고 현미경 관찰에 의하면 하동암체의 남쪽에 분포하는 괴상형 회장암은 산청암체에 분포하는 괴상형 회장암에 비해 견운모화 정도가 매우 심한 것을 알 수 있으며 일정한 방향성을 가지고 배열한 것을 볼 수 있다. 연구 지역의 북쪽에 분포하는 산청암체나 연구 지역의 중앙부인 웅석봉 부근에 분포하는 하동회장암체를 구성하는 사장석은 회색을 띠는 반면에, 연구 지역의 남쪽, 즉 덕산 부근에 분포하는 하동암체를 구성하는 사장석은 매우 밝은 색을 보인다. 하동암체의 경우, 특히 엽상형과 간극누적형 회장암에서 방해석과 녹니석 맥이 사장석의 균열면이나 결정면을 따라서 분포하는 것이 다수 관찰되며 세립의 방해석이 불규칙하게 흩어져서 나타나는 경우가 많은 반면에 산청암체에서는 방해석이나 녹니석 맥이 거의 관찰되지 않는 특징을 가진다.

회장암질암에 나타나는 고철질 광물은 주로 휘석이며, 각섬석은 2차적으로 생성된 광물로서 아주 소량 나

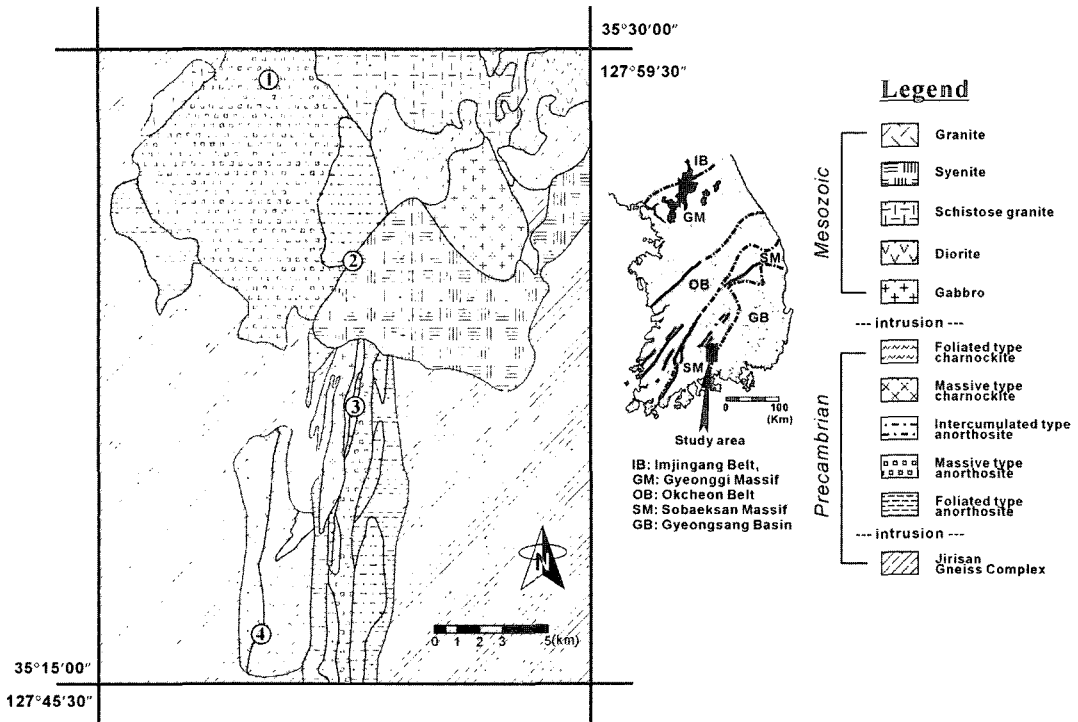


Fig. 1. Geological map of the study area (modified after Jeong (1982) and Lee *et al.* (1999)).  
 ①: Saengcho, ②: Sancheong, ③: Woongseokbong (Mt.), ④: Deoksan

타나는 것이 일반적이는데(Ashwal, 1993), 연구 지역의 회장암질암을 구성하는 고철질 광물은 대부분이 각섬석이며, 휘석이 나타나는 회장암질암은 그 분포가 아주 좁으며 연결성도 없다. 전 세계적으로 분포하는 매시프형 회장암 중에서 각섬석이 주된 고철질 광물로 나타나는 회장암체가 몇몇 분포하는데(e.g., Rousell, 1978), 이 각섬석의 성인에 대해서 변성작용이나 열수 변질작용의 영향으로 해석하는 경우가 대부분이다. 그러나 변성작용의 영향을 받지 않은 회장암에서도 각섬석이나 흑운모가 보고되었는데(Wiebe, 1978, 1979; Emsile, 1980; Ranson, 1981), 이것들은 휘석이나 Fe-Ti 산화물 주변에 얇은 테두리로 나타난다. 이것들은 마그마 분화과정의 최후기에 물이 부화된 잔류용액으로부터 결정화된 것으로 해석되었다.

연구 지역의 중앙부에 분포하는 시대미상의 반려암은 세립 내지 중립의 입자들로 구성되어 있으며 사장석과 유색광물이 거의 반반씩 들어있다. 사장석은 알바이트 쌍정과 페리클라인 쌍정을 잘 보이며 유색광물은 휘석과 각섬석 그리고 소량의 불투명광물로 구성된다. 휘석의 주위에 침상의 각섬석이 반응연으로 나타

나며 중심부의 휘석은 두 방향의 벽개를 보이기도 하지만, 휘석의 약 70% 정도는 완전히 각섬석으로 바뀌었다. 각섬석의 주변부에 변질에 의해 형성된 녹니석이 나타나기도 한다. 타형의 흑운모가 소량 분포하며 약한 방향성을 보이기도 하는데, 이것들은 심한 변질에 의해 전형적인 광화적인 특징을 보이지 않으며 내부에 2차적으로 생성된 불투명광물이 다량 존재한다. 유색 광물 중에서 각섬석과 휘석의 비율은 약 7:3 정도이며, 각섬석 중에서 일부는 녹니석으로 변질되었다.

산청 지역에 분포하고 있는 회장암체의 동측으로 분포하는 반려암, 섬록암, 섬장암에 대해 K/Ar 법으로 측정된 연대는 각각  $169.58 \pm 2.57$  Ma,  $162.1 \pm 0.35$  Ma,  $182.5 \pm 1.46$  Ma로 중생대 쥐라기에 형성되었음을 알 수 있다(정지곤 외, 1991).

### 분석방법

시료는 산청과 하동 지역에 분포하는 회장암질암과 그 주변에 분포하는 변성암, 화강암, 섬장암 및 반려암으로부터 채취하였으며, 시료를 채취한 위치는 Fig. 2

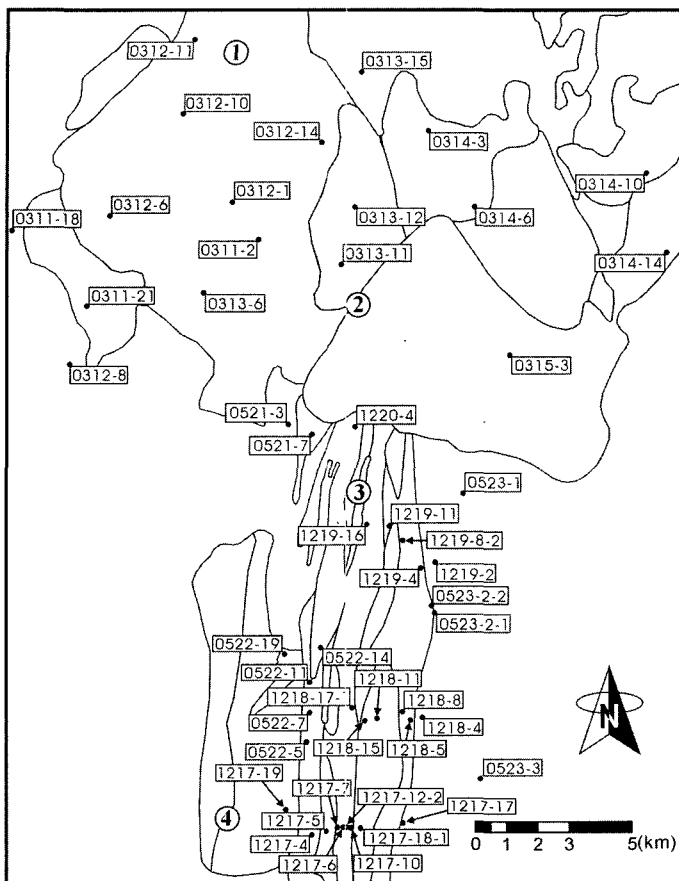


Fig. 2. Map showing the sample locations.

①: Saengcho, ②: Sancheong, ③: Woongseokbong (Mt.), ④: Deoksan

에 도시되었다. 전암 시료는 산소와 수소 안정 동위원소 분석을 위해 다이아몬드 톱날을 이용하여 신선한 면을 얻었다. 사장석, 각섬석 및 석영 광물은 다이아몬드 톱날을 이용하여 평평하게 자른 암석 슬랩으로부터 다이아몬드 드릴을 이용하여 분리하거나 실체현미경 하에서 분리하였다. 산소 안정동위원소 분석을 위한 시료는 Clayton and Mayeda(1963)의  $\text{BrF}_5$  방법을 이용하여 준비하였으며, 준비된 가스시료( $\text{CO}_2$ )의 산소 동위원소 비는 미국 인디애나 대학교의 안정동위원소 실험실에 있는 Finnigan Mat 252 질량분석기를 이용하여 측정하였다. 전암과 분리된 광물들의 수소 동위원소 분석을 위한 물의 방출은 Vennemann and O'Neil(1993)의 방법을 약간 변화시킨 방법을 이용하여 Vycor 튜브에서 용융시킴으로써 분리하였다. 방출된 물을 아연과 함께 봉합된 튜브 안에 넣고 가열함으로써 수소를

분리하였다. 수소 동위원소 비와 물 함량은 대전에 있는 기초과학연구원 연구원에 있는 VG Prism II 안정 동위원소 질량분석기를 이용하여 측정하였다. 물의 함량은 물 표준시료를 가지고 보정된 질량분석기의 인렛(inlet)시스템의 이온 게이지를 이용하여 측정하였다. 산소와 수소 안정동위원소 분석을 실시하기 이전에 분말 표면에 묻어있는 수분을 제거하기 위하여 모든 시료 분말을 진공오븐에 넣고  $250^\circ\text{C}$ 에서 약 12시간 동안 가열하였다. 산소와 수소 안정 동위원소 조성은 V-SMOW에 대한 상대적인 값을  $\delta$ -표기법으로 나타내었다. NBS-28 석영(NIST Reference Material 8546)과 NCSU 석영(B. Showers, North Carolina State University)은 인디애나 대학교 안정동위원소 연구실에서 각각  $9.6 \pm 0.1$ 와  $11.5 \pm 0.1\%$ 의 값을 보인다. 분석정밀도는  $\delta^{18}\text{O}$ 가 0.1%이며  $\delta\text{D}$ 가 0.5%이다.

**Table 1. Oxygen and hydrogen isotopic compositions (‰, V-SMOW) and water content of igneous and metamorphic rocks in Hadong and Sancheong.**

Sample No.	rock type	$\delta^{18}\text{O}_{\text{Pl}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{Am}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{Qtz}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{W.R.}}$	$\delta\text{D}_{\text{Am}}$	$\delta\text{D}_{\text{W.R.}}$	H <sub>2</sub> O (wt.%)	Remark
0311-2	Anths	10.7					-89	0.37	N.A.
0311-21	Anths	8.6					-87	0.54	N.A.
0312-1	Anths	8.0	5.8				-94	0.43	N.A.
0312-6	Anths	8.7					-99	0.34	N.A.
0312-10	Anths						-93	0.38	N.A.
0312-11	Anths	7.5					-98	0.48	N.A.
0312-14	Anths						-97	0.44	N.A.
0313-6	Anths	8.8					-95	0.46	N.A.
0313-11	Anths						-82	0.81	N.A.
0313-12	Anths	7.3					-72	1.50	N.A.
1219-4	Anths	8.4	7.5			-94			M.A.
1219-8-2	Anths	5.3	3.8			-83			M.A.
1219-11	Anths	8.3	6.4			-76			M.A.
1219-16	Anths	7.3	7.4				-82	1.33	M.A.
0521-7	Anths					-84			M.A.
0522-14	Anths						-77	1.78	M.A.
1217-4	Anths	1.7	2.4			-101			S.A.
1217-5	Anths	3.2	4.5			-106			S.A.
1217-6	Anths	1.8	3.9				-98	0.86	S.A.
1217-7	Anths	-3.7							S.A.
1217-10	Anths	1.1							S.A.
1217-12-2	Anths	3.6							S.A.
1217-18-1	Anths	8.2	7.5			-94			S.A.
1218-5	Anths	2.2	2.0				-79	1.70	S.A.
1218-8	Anths	-0.7	2.2			-101			S.A.
1218-11	Anths	6.5	5.5				-80	2.01	S.A.
1218-15	Anths	-4.4							S.A.
1218-17-1	Anths	-2.4					-97	0.63	S.A.
0522-5	Anths					-109			S.A.
0522-7	Anths					-101			S.A.
0522-11	Anths						-95	1.60	S.A.
0313-15	Gb				6.8		-100	2.71	N.A.
0314-3	Di				7.1		-64	1.37	N.A.
0314-6	Gr						-64	0.88	N.A.
0314-10	Gr	9.5	10.2						N.A.
0314-14	Sy	8.9				-116			N.A.
0315-3	Sy					-59			N.A.
1220-4	Gb				7.5		-71	1.88	M.A.
0311-18	Pgn	8.7					-73	0.74	N.A.
1219-2	Pgn	9.4							M.A.
0312-8	Gggn				11.5		-72	1.00	M.A.
0521-3	Bgn						-99	0.86	M.A.
0523-1	Ggn						-91	0.33	M.A.
0523-2-1	Bgn						-83	2.22	M.A.
0523-2-2	Bgn						-96	3.51	M.A.
1217-17	Bgn				10.1		-78	2.01	S.A.
1217-19	Bgn				5.9		-92	1.35	S.A.
1218-4	Bgn						-99	1.28	S.A.
0522-19	Bgn						-100	0.66	S.A.
0523-3	Bgn						-80	0.92	S.A.

Anths: anorthosite, Gr: granite, Sy: syenite, Di: diorite, Gb: gabbro, Bgn: banded gneiss, Pgn: porphyroblastic gneiss, Gggn: garnet-bearing granitic gneiss, Ggn: granitic gneiss, Pl: plagioclase, Am: amphibole, Qtz: quartz, W.R.: whole rock, S.A.: southern area, M.A.: middle area, N.A.: northern area

## 산소와 수소 동위원소 조성 분석 결과

### 산소 동위원소 조성

하동과 산청 지역에 분포하는 회장암과 그 주변에 분포하는 화성암과 변성암 및 이들 암석으로부터 분리된 사장석, 각섬석 및 석영에 대한 산소와 수소 안정 동위원소 값은 Table 1에 제시되었다. 회장암에 대한 전암, 사장석 및 각섬석에 대한  $\delta^{18}\text{O}$  값은 각각 1.9에서 8.1%, -4.4에서 10.7% 및 2.0에서 7.5%까지의 범위를 가진다. 연구 지역의 중앙부인 웅석봉 부근에서 회장암과 함께 나타나는 시대미상의 반력암 두 개의 시료는 각각 6.8과 7.5%의  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가진다. 산청 회장암체의 동쪽 가장자리를 따라 분포하며 중생대에 관입한 섬록암, 섬장암 및 화강암의 일부 시료들에 대해서도 산소 안정 동위원소 조성을 측정하였다. 하나의 화강암 시료로부터 분리한 사장석과 석영의  $\delta^{18}\text{O}$  값은 각각 9.5와 10.2%이며, 하나의 섬장암으로부터 분리된 사장석의  $\delta^{18}\text{O}$  값은 8.9%이다. 섬록암 전암 시료 하나에 대해 분석한 산소 동위원소 조성은 7.1%이다.

회장암이 관입한 선캠브리아기의 편마암 시료 일부에 대해서도 산소 동위원소 조성을 측정하였다. 연구 지역의 남쪽에 분포하는 호상편마암 두 개의 시료(시료번호 1217-17과 1217-19)는 각각 10.1과 5.9%의 전암  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가지며, 연구 지역의 북쪽에 분포하는 함석류석 화강암질 편마암(시료번호 0312-8)은 11.5%의 전암  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가진다. 연구 지역의 북쪽에 분포하는 반상변정질 편마암(0311-8)과 연구 지역의 중앙부에 분포하는 반상변정질 편마암(시료번호 1219-2)으로부터 분리된 사장석의  $\delta^{18}\text{O}$  값은 각각 8.7과 9.4%의 값을 가진다.

하동과 산청 지역에 분포하는 회장암 복합체가 가지는 산소와 수소 안정 동위원소 조성은 몇 가지 점에서 흥미로운 특징을 보여준다. 첫째, 일반적으로 맨틀기원의 회장암과 고철질 암석들을 구성하는 사장석은 약 6~6.5% 정도의  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가지는 것에 반하여(Peck and Valley, 2000과 그곳의 인용 논문들), 연구 지역에서 산출되는 사장석은 넓은 범위의 조성(-4.4~10.7%)을 가지는 특징을 보여준다(Fig. 3). 연구 지역의 회장암은 사장석 뿐만 아니라 각섬석 또한 넓은 범위의  $\delta^{18}\text{O}$  값(2.0~7.5%)을 가진다. 둘째, 회장암 및 이들 주변에 분포하는 암석 내에 들어있는 사장석의 산소 동위원소 조성은 분포 지역에 따라 서로 다른 특징을 보여준다(Fig. 4). 회장암내의 사장석의 산소 동위원소 값의 공간적인 분포를 살펴보면, 연구 지역의 북쪽에 위치하는 산청과 생초 지역에 분포하는 회장암체인 산청회장

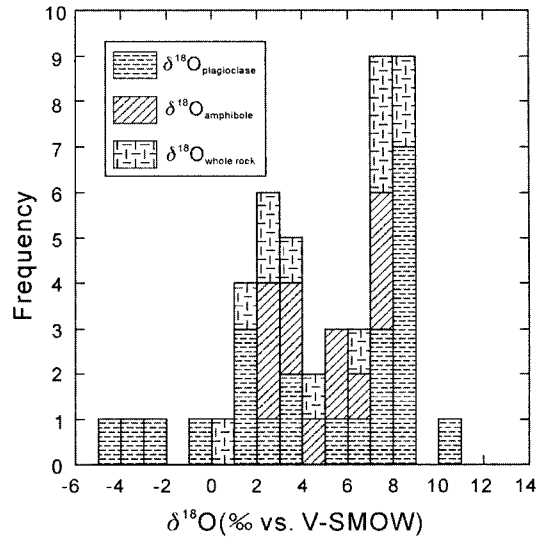


Fig. 3. Range of  $\delta^{18}\text{O}$  values for plagioclase, amphibole and whole rock of the Hadong-Sancheong anorthositic rocks.

암체는 10.7%를 가지는 하나의 시료를 제외하면 모두 7.3에서 8.8% 사이의 비교적 좁은 범위의  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가진다. 이들 값은 맨틀기원의 회장암내에 들어있는 사장석이 전형적으로 가지는  $\delta^{18}\text{O}$  값에 비해 높은 값이다. 반면에 연구 지역의 남쪽에 분포하는 하동 회장암체내의 사장석은 -4.4에서 8.2% 사이의 매우 넓은 범위의  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가지며, 대부분의 시료는 6% 이하의 낮은  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가지는 특징을 보여준다. 지역에 따라 회장암내에 들어있는 사장석의 산소 안정 동위원소 조성 범위가 어떠한 차이를 보여주는지를 알아보기 위해 히스토그램을 이용하여 도시해 보았다(Fig. 5). Fig. 5에서 볼 수 있는 것처럼, 연구 지역의 남쪽에 위치하는 덕산 부근에 분포하는 대부분의 회장암내의 사장석은 3.6% 이하의 아주 낮은  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가진다. 연구 지역의 중앙부에 위치하는 웅석봉 부근에 분포하는 회장암의  $\delta^{18}\text{O}$  값은 5.3에서 8.3% 사이의 범위로서 연구 지역의 북부와 남부에 분포하는 회장암들의 중간 값을 갖는 것을 알 수 있다.

### 수소 동위원소 조성

회장암내에 들어있는 각섬석과 회장암 전암에 대한 수소 동위원소 조성은 각각 -109에서 -76‰과 -99에서 -72‰ 사이의  $\delta\text{D}$  값을 가진다. 연구 지역의 중앙부에 위치하는 웅석봉 근처에서 회장암과 함께 나타나는 시대미상의 반력암은 -100에서 -71% 사이의  $\delta\text{D}$  값을 가

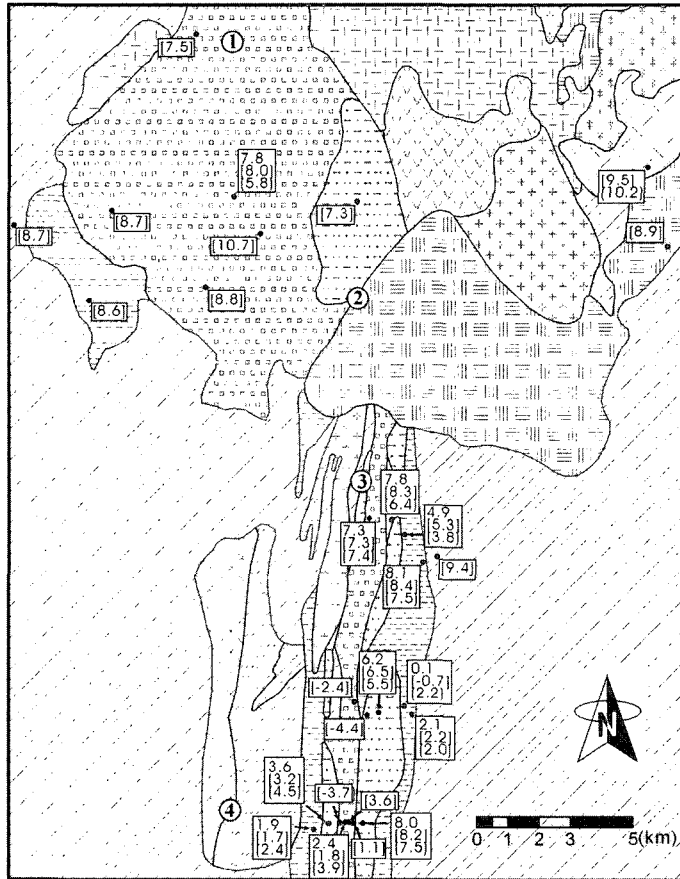


Fig. 4. Distribution map of  $\delta^{18}\text{O}$  values of whole rock, plagioclase(numbers in bracket), and amphibole(numbers in parenthesis) in the study area, respectively.

①: Saengcho, ②: Sancheong, ③: Woongseokbong (Mt.), ④: Deoksan

진다. 산청 회장암체의 동쪽 가장자리를 따라 분포하며 중생대에 관입한 섬록암 전암 시료는 -64%의  $\delta\text{D}$  값을 가지며, 두 개의 섬록암 시료로부터 분리된 각섬석의  $\delta\text{D}$  값은 각각 -116과 -59%이다. 회장암질암이 관입한 선캠브리아기의 편마암과 시대미상의 반력암질암은 각각 -100에서 -72%, -100에서 -71%의  $\delta\text{D}$  값을 가진다.

연구 지역의 북쪽에 분포하는 산청암체가 남쪽에 분포하는 하동암체보다 약간 더 무거운 수소 동위원소 조성을 가지는 경향이 있음을 보여준다.

### 산소 동위원소 조성 변화의 원인들

하동-산청 회장암체가 맨틀기원의 신선한 회장암질암이 전형적으로 가지는 산소 안정동위원소 값에서 크

게 벗어날 뿐만 아니라, 비교적 넓은 범위의 값을 가지는 것은 이들 암석이 마그마로부터 굳어지는 과정이나 혹은 마그마로부터 결정화된 이후에 외부로부터 어떤 지질학적인 작용을 경험했음을 지시하는 것이다. 맨틀에서 유래한 회장암이 전형적으로 가지는 값과 다른 값을 가지는 원인으로서는 다음과 같은 가능성들을 고려해 볼 수 있다. 첫째, 맨틀에서 기원한 마그마가 상승하는 동안이나 지각에서 배태되는 동안에 주변에 있는 지각물질을 부분적으로 용융시킴으로써 이 회장암을 형성한 마그마를 혼염(contamination)시켰을 가능성이 다. 둘째, 맨틀을 구성하고 있던 암석의 부분용융에 의해 생성된 회장암이 지각에서 굳어진 후에 다양한 산소 동위원소 조성을 가지는 유체와의 산소 동위원소 교환반응에 의해 원래의 값이 변질되었을 가능성을 고려해 볼 수 있다. 따라서 지각물질의 혼염과 유체-암



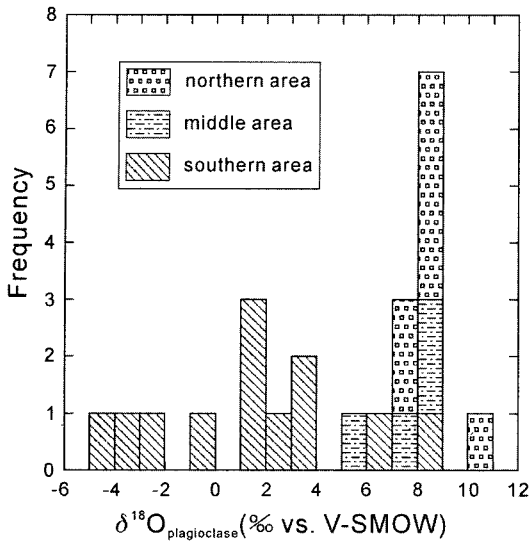


Fig. 5 Variations in  $\delta^{18}\text{O}$  values for plagioclase of the anorthosites in Hadong and Sancheong. Samples collected in the southern area tend to have lighter and wider range of  $\delta^{18}\text{O}$  values than those collected in the northern area.

석 상호작용에 의한 가능성 중에 어떤 지질학적인 작용이 이들 회장암체에서 나타나는 산소동위원소 특성을 갖는데 주요 역할을 하였는지를 고찰해봄으로써 이들 암석들의 성인 및 이들 암석들이 마그마로부터 고화된 이후에 겪은 유체-암석 상호작용의 특성에 대해 살펴보고자 한다.

### 지각물질의 혼염

연구 지역의 회장암체가 가지는 산소동위원소 특성이 맨틀에서 생성된 마그마가 상승하는 동안 또는 지각에 배태되는 동안에 지각물질의 혼염(crustal contamination)에 의해 이루어진 것이라면, 하동회장암체와 산청회장암체는 마그마의 진화에 있어서 서로 다른 경로를 따라 변화해 왔음을 의미하는 것이다. 즉, 연구 지역의 북쪽에 분포하는 산청회장암체는 적어도 9% 이상의 비교적 높은  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가지는 지각물질의 혼염을 경험한 반면에, 남쪽에 분포하는 하동회장암체는 낮은  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가지는 지각물질에 의한 혼염을 겪었을 것이다. 즉 연구 지역의 북쪽과 남쪽 지역의 지각 하부에는 서로 다른 산소 동위원소 조성을 가지는 암석들이 분포하고 있을 가능성을 지시해 준다고 할 수 있을 것이다.

연구 지역의 북쪽에서 비교적 넓은 지역에 걸쳐 분포하고 있는 산청 회장암체 내의 사장석은 10.7% 값

을 가지는 하나의 시료를 제외하면 7.3에서 8.8% 사이의 비교적 좁은 범위의  $\delta^{18}\text{O}$  값을 갖는다. 약 6% 정도의  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가지는 마그마가 맨틀에서 생성된 후에 산청회장암체와 같이 약 8%의  $\delta^{18}\text{O}$  값을 갖도록 변화되기 위해서는 상당한 양의 지각물질의 혼염이 일어나야만 한다. 또한 관찰되는 것과 같이 비교적 균질한 산소 동위원소 조성을 가지기 위해서는 상승하는 마그마에 의해 용융된 지각물질로부터 유래된 산소의 확산이 마그마 내에서 활발하게 일어났어야만 한다. 맨틀에서 기원한 약 6%의 산소 동위원소 조성을 가지는 고철질 마그마가 산청 지역에서 나타나는 회장암들이 가지는 값인 7.3에서 8.8%의  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가지기 위해서는 얼마만큼의 혼염이 이루어져야 하는지를 알아보기 위해 산소 동위원소 모델링을 실시해보았다. 이 모델링에서는 초기의 마그마는 6.3%의  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가진다고 가정하였으며, 이러한 마그마가 지각으로 상승하는 동안에 이를 오염시킨 지각물질의  $\delta^{18}\text{O}$  값은 연구 지역에 분포하는 회장암체 주변암체에서 가장 높은 산소 동위원소 값을 가지는 함석류석 화강암질 편마암의  $\delta^{18}\text{O}$  값인 11.5%를 사용하였다. 따라서 이러한 값을 이용한 산소 동위원소 모델링 결과는 회장암을 형성한 마그마에 의해 동화된 지각물질의 최소량을 나타낸다고 할 수 있다. 이러한 모델링은 다음과 같은 혼합방정식을 사용하여 실시하였다:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{anorthosite}}(\text{‰}) = \frac{(C_{O,IM})(1-f)\delta^{18}\text{O}_{IM}}{(C_{O,IM})(1-f) + (C_{O,CR})(f)} + \frac{(C_{O,CR})(f)\delta^{18}\text{O}_{CR}}{(C_{O,IM})(1-f) + (C_{O,CR})(f)}$$

여기에서  $C_{O,IM}$ 과  $C_{O,CR}$ 은 각각 시초마그마(initial melt)와 주변암(country rock)에 들어있는 산소의 농도를 나타낸다. 모델링 결과는 Fig. 6에서 보여주는 것처럼, 약 6.3%의  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가지는 마그마가 11.5%의  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가지는 지각물질에 의해 오염되어서 산청 회장암체가 가지는 값인 약 8%의  $\delta^{18}\text{O}$  값을 갖기 위해서는 혼염된 지각물질의 질량비(mass fraction)가 약 20에서 35% 정도가 되어야만 한다는 것을 지시해준다. Kwon and Jeong(1990)과 박계현 외(2001)는 연구 지역에 분포하는 회장암질암에 대한 Rb-Sr과 Sm-Nd 방사성 동위원소 연구를 통해 회장암을 형성한 맨틀기원의 마그마가 지각물질에 의해 오염되었을 가능성이 있음을 제안한 바 있다. 즉, 산청 회장암체에서 채취한 시료들은 비교적 높은  $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$  값(-0.6~-2.4)을 보이고, 그 남쪽에서 대상분포를 하는 하동암체로부터 채취한

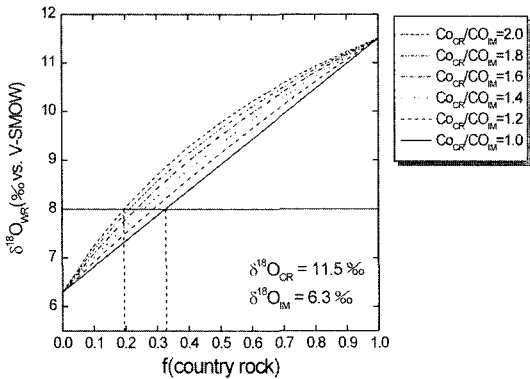


Fig. 6.  $\delta^{18}\text{O}$  values for whole rock of anorthositic rocks as a function of the mass fraction( $f$ ) of country rock assimilated.  $C_{O,IM}$  and  $C_{O,CR}$  represent oxygen concentration in initial melt and country rock, respectively.

시료들은 상대적으로 낮은  $\epsilon_{Nd}(T)$  값(-3.9~ -4.1)을 가지는 것에 근거하여 지각물질에 의한 오염을 경험하였을 가능성이 있음을 보고하였다(박계현 외, 2001). 그러나 연구 지역에 분포하는 회장암이 각섬석, 녹니석, 견운모 및 방해석과 같은 열수변질에 의해 생성된 광물들을 다량 함유하는 것으로 보아 산청암체내의 사장석이 가지는 비교적 높은  $\delta^{18}\text{O}$  값이 전적으로 마그마조성을 반영하는 것이라고 보기는 힘들다. 따라서 연구 지역의 북쪽에 분포하는 산청암체내의 사장석의 산소 동위원소 조성은 지각물질의 오염에 의한 것과 고상선하에서 유체와의 산소 동위원소 반응 결과가 함께 반영되어 나타나는 결과로 보는 것이 더 타당할 것이다. 산청암체내의 사장석에 대한 산소 안정 동위원소 결과가 나타내는 것처럼 20%이상의 지각물질에 의해 오염되었는지를 정확하게 알기 위해서는 이들 암석들에 대한 보다 체계적인 Nd-O와 Sr-O 동위원소 연구가 수행되어야 한다.

북쪽 지역에 분포하는 회장암들과는 달리 남쪽에 분포하는 하동 회장암체는 -4.4‰ 만큼 낮은  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가진다. 약 6.3‰의  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가지는 맨틀 기원의 마그마가 지각물질의 혼입에 의해 -4.4‰ 만큼 낮은  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가지기 위해서는 적어도 -4.4‰ 이하의 낮은  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가지는 물질에 의한 오염이 연구 지역의 남쪽 부근에서 일어났어야만 한다. 그러나 연구 지역에 분포하는 선캠브리아기의 편마암은 모두 이들 보다는 무거운  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가진다. 따라서 연구 지역의 남쪽에 분포하는 하동회장암체는 방사성 동위원소 결과(박계현 외, 2001)가 지시하는 것처럼 지각물질에 의한 혼입을 경험하였을 가능성이 높지만, 이 암체내의 사장석이 갖

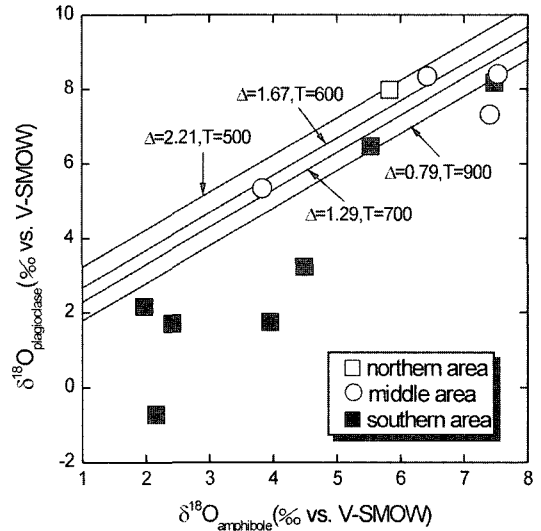


Fig. 7. Plot of the plagioclase vs. amphibole  $\delta^{18}\text{O}$  values in anorthosites. Lines represent mineral pairs in equilibrium at different temperatures ( $T$ , °C).

는 산소 동위원소 조성이 낮은  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가지는 지각물질의 혼입에 의해서 야기되었을 가능성은 높지 않다.

**유체-암석 상호작용**

유체-암석 상호작용 동안에 이루어진 산소 동위원소 교환반응의 특성을 알아보기 위하여 사장석과 각섬석 쌍의 산소 안정 동위원소 조성을 비교하여 도시하였다(Fig. 7). Fig. 7에 있는 등온선들(isotherms)은 Bottinga and Javoy(1975)의 분별인자(fractionation factor)를 이용하여 계산한 것이다. 등온선에 평행하게 도시되는 자료들은 동위원소 조성이 불균질한 심성암체의 결정화작용과 냉각에 의하거나 또는 외부에서 유래한 유체와 평형상태에서 이루어진 상당한 산소 동위원소 교환반응에 의한 것으로 고려된다. 사장석-각섬석 쌍의 일부는 마그마의 온도를 반영하기에는 너무나 부적합하다. 사장석-각섬석 쌍의 값이 0 이하인 값은 외부에서 기원한 유체와 고상선하에서 동위원소 교환반응이 일어났음을 나타내는 것이라 할 수 있다. 회장암에서의 사장석 정출 온도 상한으로 생각되는  $T=900^\circ\text{C}$ 인 등온선의 오른쪽에 도시되는 시료들은 사장석의  $\delta^{18}\text{O}$  값이 각섬석의  $\delta^{18}\text{O}$  값보다 더 낮은 값을 보이며 이는 마그마 과정에 의한 값이라고 볼 수 없다(Criss, 1999). 이것은 낮은  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가지는 외부 유체와의 산소 동위원소 교환반응에 의해 초래된 것을 의미한다. 이러한 것들은 모두 연구 지역의 남쪽 지역으로부터 채취한 시료들이다. 따

라서 연구 지역의 남쪽에서는 천수 기원의 유체에 의해 형성된 열수시스템이 발달되었고, 그 결과 천수와 회장암체 사이에 산소 동위원소 교환반응이 일어났음을 지시해준다. Fig. 7에서  $T=500^{\circ}\text{C}$ 인 등온선과  $T=900^{\circ}\text{C}$ 인 등온선 사이에 도시되는 시료들 중 일부는 맨틀기원의 신선한 회장암들이 가지는 값들보다 더 높은 산소 안정동위원소 값을 가진다. 이러한 높은  $\delta^{18}\text{O}$  값은  $500^{\circ}\text{C}$  이상의 고온의 상태에서 비교적 높은  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가지는 유체와의 반응에 의해 초래될 수 있다.

연구 지역의 북쪽에 분포하는 산청회장암내의 사장석은 7.3% 이상의  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가진다. 이러한 값은 이 시료들이 비교적 무거운 조성을 가지는 유체와 비교적 높은 온도 환경 하에서 산소 동위원소 교환반응을 통해서 생성될 수 있다. Fig. 7에서 보여주는 것처럼 6% 이상의  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가지는 사장석들은 모두  $500^{\circ}\text{C}$  이상의 온도에서 산소동위원소 교환반응을 하였음을 알 수 있다. 이러한 비교적 높은 산소 안정동위원소 조성을 가지는 유체의 기원으로는 마그마에서 유래한 유체와 회장암질 주변에 분포하는 변성암에서 유래한 변성유체 등을 고려해 볼 수 있다. 따라서 연구 지역의 북쪽에서는 남쪽 지역에 발달되었던 시스템과는 다른 열수 시스템이 우세하게 발달되었을 가능성이 있다. 즉 연구 지역의 남쪽에서는 천수 기원의 유체가 수반된 열수시스템이 우세하게 발달된 반면에, 북쪽에서는 변성기원의 유체나 마그마의 잔류용액에 의해 발달된 열수시스템이 우세하였을 가능성이 있다.

서로 다른 동위원소 조성을 가지는 별개의 열수시스템이 연구 지역에 발달되었음은 Fig. 8에 도시된  $\delta\text{D}_{\text{amphibole}}$  vs.  $\delta^{18}\text{O}_{\text{plagioclase}}$  다이어그램에서도 알 수 있다. 높은  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가지는 사장석과 함께 산출하는 각섬석은 낮은  $\delta^{18}\text{O}$  값을 가지는 사장석과 함께 산출하는 각섬석보다 높은  $\delta\text{D}$  값을 가지는 경향을 보여준다. 이러한 경향은 서로 다른 산소와 수소 안정동위원소 조성을 가지는 별개의 유체가 회장암과 유체의 상호반응에 관여했을 가능성을 지시하는 것이다. 또한 연구 지역의 북쪽에 분포하는 산청회장암체가 남쪽에 분포하는 하동회장암체보다 약간 더 무거운 수소 동위원소 조성을 가지는 경향을 보여준다. 이는 북쪽 지역에 관여한 유체보다는 남쪽 지역에서 일어난 열수변질작용에 수반된 유체의 수소 안정동위원소 조성이 더 낮은 값을 가졌음을 지시하는 것이다.

### 각섬석의 성인

이 회장암 복합암체 내에 존재하는 대부분의 각섬석

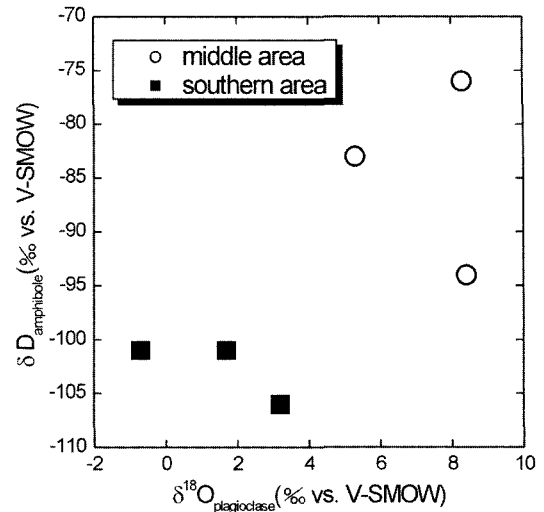


Fig. 8. Relationship between  $\delta\text{D}_{\text{amphibole}}$  vs.  $\delta^{18}\text{O}_{\text{plagioclase}}$  for the anorthositic rocks in Hadong and Sancheong.

류는 초생 보통휘석이 수화작용을 겪음으로써 형성된 것으로 여겨진다(이종만 외, 1999). 초생 보통휘석이 각섬석으로 변하는데 관여한 유체의 기원을 정확하게 규명하기 위해서는 산소와 더불어 수소 안정 동위원소 연구가 필요하다. 마그마의 분화과정 중에 용리(exsolution)가 일어나면, 마그마로부터 분리된 유체는 일반적으로 높은  $\delta\text{D}$  값을 가지게 되며, 이러한 유체에 의해 이루어진 자생변질작용(deuteric alteration)은 변질된 암석들이 무거운  $\delta\text{D}$  값을 가지도록 변화시키는 경향을 나타낸다(Nabelek *et al.*, 1983; Taylor *et al.*, 1983). 따라서 잔류 마그마에 의한 자생변질작용을 겪은 암석들은 일반적으로 전암의 물 함량이 증가함에 따라 전암의 수소 동위원소 조성이 증가하는 정의 관계를 보여주는 경향을 나타낸다(Nabelek *et al.*, 1983; Taylor *et al.*, 1983). 천수 기원의 유체에 의해 열수변질작용을 경험한 결과를 보여주는 시료들을 제외한 회장암질암에 대한 수소 안정 동위원소 조성과의 관계를 살펴보았다(Fig. 9). 이 시료들은 각각  $\text{H}_2\text{O}$  양이 증가함에 따라 회장암의 수소 동위원소 값이 증가하는 경향을 보여준다. 이러한 경향은 회장암질암을 형성한 마그마의 분화작용이 일어나는 동안에 마그마에서 유래한 유체가 자생변질작용을 일으킨 결과임을 지시한다. 즉, 이 연구 지역에 있는 회장암 복합체 내에 존재하는 각섬석류들은 회장암질 마그마의 분화작용 후기에 생성된 잔류용액에 의해 초생 휘석이 수화작용을 겪음으로써 형성되었을 가능성이 있다.

연구 지역의 남쪽에 분포하는 회장암들 역시 북쪽에

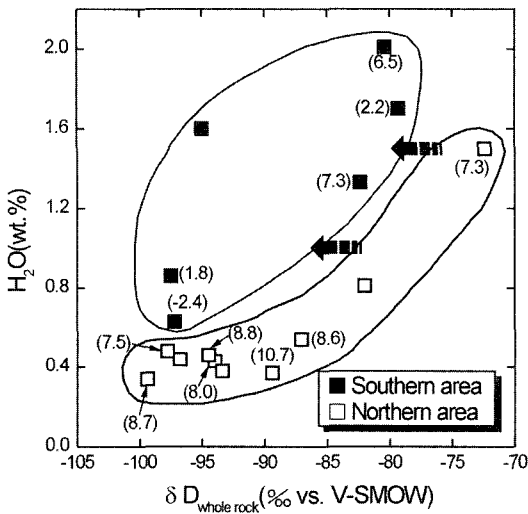


Fig. 9.  $\delta D_{\text{whole rock}}$  vs. water content (wt.%) diagram for anorthosites. The numbers in parentheses are  $\delta^{18}\text{O}$  values of plagioclase.

분포하는 회장암의 경우와 마찬가지로 마그마의 분화 작용 후기에 생성된 잔류용액에 의해 초생 보통휘석이 각섬석으로 변화하는 수화작용을 경험하였을 가능성이 높다. 그러나 자생변질작용에 의해 각섬석이 생성된 이후에 연구 지역의 남쪽에서는 후기에 다른 화성암체가 이 지역으로 관입함에 따라 천수 기원의 유체에 의해 발달된 열수 시스템이 형성되었으며, 이 열수시스템은 연구 지역의 남쪽에 국한되어 발달되었을 가능성이 있다. 따라서 연구 지역의 남쪽에 분포하는 회장암들의  $\delta D$  값들은 Fig. 9에서 보여주는 것처럼 낮은 값으로 변화된 것으로 추정된다. 연구 지역의 남쪽에서는 마그마 기원 유체와의 동위원소 교환반응에 의해 기록되었던 결과들이 지워지고 천수에 의해 발달된 열수시스템의 특성을 기록하고 있는 것으로 여겨진다. 연구 지역의 남쪽에 분포하는 회장암체의 주변에는 이를 후기에 관입한 것으로 보이는 관입암이 관찰되지 않는다. 따라서 이 지역에서 천수 기원의 유체에 의해 형성된 열수 시스템은 현재 지표에 들어나지 않은 심성암체가 연구 지역의 남부일대에 배태되어 있을 가능성을 시사해준다.

### 열수변질작용

회장암의 경우 암석의 색이 회색이나 녹회색 또는 검은색을 띠기도 하며 암적색, 분홍색 및 보라색을 띠는데, 이는 미립(보통 1 m 또는 그 이하)의 Fe-Ti 산화 광물 포유물(oxide inclusion)들이 사장석에 나타나기 때

문이다(Ashwal, 1993). Fe-Ti 산화광물 포유물은 변성 작용이나 변질의 영향을 받으면 사장석에서 제거되는 특징이 있다. 연구 지역의 남쪽에 위치하는 덕산 부근에 분포하는 회장암은 매우 밝은 회색을 보이는 반면에, 중앙부에 위치하는 응석봉 부근에 분포하는 회장암은 회색을 띠는데, 이는 남쪽에서 증첩되어 일어난 열수변질 작용의 결과 사장석 내에 들어있던 Fe-Ti 포유물이 제거됨에 따라 결과된 것으로 여겨진다. 또한 하동암체의 남부에 분포하는 괴상형 회장암은 산청암체에 분포하는 괴상형 회장암에 비해 견운도화 정도가 매우 심한 것을 관찰할 수 있다. 하동암체에서는 방해석과 녹니석 맥이 다수 관찰되며 방해석이 불규칙하게 흩어져서 나타나는 경우가 많은 반면에, 산청암체에서는 방해석이나 녹니석 맥이 거의 관찰되지 않는 특징을 보여준다. 이는 연구 지역의 남쪽에서 증첩되어 일어난 열수시스템에 수반되어 일어난 열수변질작용의 산물일 것으로 생각된다.

### 결론

원생대 중기에 생성된 매시프형의 하동-산청 회장암 질암은 일반적으로 맨틀기원의 신선한 회장암질암이 가지는 산소 동위원소 조성에 비해 넓은 범위의  $\delta^{18}\text{O}$  와  $\delta D$  값을 가지는 특징을 보여줄 뿐만 아니라, 회장암체 내의 사장석의  $\delta^{18}\text{O}$  값은 공간에 따라 서로 다른 값을 가지는 분포양상을 보여준다. 즉 북쪽에 분포하는 산청회장암체의 사장석은 대부분이 신선한 회장암이 전형적으로 가지는  $\delta^{18}\text{O}$  값(6~6.5%)보다 더 무거운 값인 7.3~8.8%의 값을 가진다. 반면에 남쪽에 분포하는 하동회장암체 내 사장석의  $\delta^{18}\text{O}$  값은 -4.4~8.2%의 넓은 범위의 값을 가지며, 대부분이 맨틀기원의 신선한 회장암이 갖는 전형적인  $\delta^{18}\text{O}$  값보다 낮은 값을 가진다. 연구 지역의 중간 지역에 분포하는 회장암내의 사장석은 북쪽과 남쪽 지역의 사장석이 갖는  $\delta^{18}\text{O}$  값의 중간 값을 갖는다. 연구 지역 회장암체 내의 사장석이 가지는 이러한  $\delta^{18}\text{O}$  값은 주로 고상선 하에서 이루어진 유체와의 동위원소 교환반응에 의한 결과일 것으로 추정된다.  $\delta^{18}\text{O}$  값의 이러한 공간적인 분포는 연구 지역에서 지역에 따라 서로 다른 열수시스템이 발달했음을 시사한다.

산청회장암체와 하동회장암체 모두 마그마의 분화작용이 일어나는 동안 마그마에서 유래한 유체에 의해 자생변질작용을 겪는 동안 초생 보통휘석이 각섬석으로 변화되는 열수변질작용을 경험하였다. 이러한 자생변질작용이 일어난 이후에, 천수기원의 유체에 의해 형

성된 열수시스템이 연구 지역의 남쪽에 발달함으로써 마그마에서 유래한 유체에 의한 열수시스템의 흔적이 지워져버렸다. 그러나 천수기원의 유체에 의한 열수시스템은 남쪽에 국한되어 발달하였기 때문에 북쪽에 있는 산청회장암체는 이 열수시스템에 의한 영향을 거의 받지 않고 마그마 기원의 유체에 의해 형성되었던 열수시스템의 흔적을 기록하고 있다. 따라서 연구 지역의 북쪽이나 중앙부에 비해 남쪽에 분포하는 회장암이 열수변질의 영향을 더 강하게 받았을 가능성이 높다. 그 결과 연구 지역의 남쪽에 분포하는 회장암체 내에서 보다 많은 열수변질 광물들이 산출된다.

연구 지역의 남쪽에 분포하는 회장암체의 주변에는 이를 후기에 관입한 것으로 보이는 관입암이 관찰되지 않는다. 따라서 이 지역에서 천수 기원의 유체에 의해 형성된 열수시스템은 현재 지표에 드러나지 않은 심성암체가 연구 지역의 남부일대에 배태되어 있을 가능성을 지시해준다.

## 감사의 글

이 논문을 읽고 여러 가지 유익한 조언을 해주신 박계현 교수님과 익명의 심사위원께 진심으로 감사드립니다. 또한 한국기초과학 지원연구원에서 수소 안정 동위원소 분석 시 도움을 준 신동복 박사님께도 사의를 표한다. 이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원(과제번호: KRF-2002-C00287)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김동연, 1999, 지리산 동부 지역에 분포하는 차노카이트의 암석학, 지구화학 및 지구연대학. 부경대학교 석사학위논문, 79 p.
- 김옥준, 홍만섭, 박희인, 박양대, 김기태, 윤선, 1964, 한국 지질도(1:50,000) 산청도폭, 경상남도
- 김원사, 1992, 하동-산청 지역 회장암체에 배태된 희유금속 자원에 관한 연구. 한국광물학회지, 5, 14-21.
- 박계현, 김동연, 송용선, 2001, 지리산 지역 차노카이트와 합티탄철석 회장암질암의 Sm-Nd 광물연대 및 성인적 관계. 암석학회지, 10, 27-35.
- 송용선, 1981, 하동-산청 지역에 분포하는 변성암류의 변성 작용에 관한 연구. 서울대학교 이학석사 학위논문, 44 p.
- 송용선, 1999, 소백산육괴 서남부 지리산 지역의 반상변정질 편마암에서 산출되는 백립암질 포획암. 암석학회지, 8, 34-45.
- 송용선, 류호정, 1993, 지리산 일대 소백산 편마암체의 다 변성작용. 한국암석학회 제2차 학술발표회 요약집
- 이상만, 1980, 지리산(하동-산청) 지역의 변성이질암의 변성 작용에 관한 연구. 지질학회지, 16, 1-15.
- 이상만, 김형식, 1984, 소위 울리층군 및 원남층군의 변성 암석학적 연구-태백산 일대를 중심으로. 지질학회지, 20, 195-214.
- 이상만, 나기창, 이상현, 박배영, 이상원, 1981, 소백산육괴(동남부)의 변성암복합체에 대한변성작용에 관한 연구. 지질학회지, 17, 169-188.
- 이종만, 정지곤, 김원사, 1999, 하동 지역 회장암질암의 진화 및 티타늄광체와 성인적 관련성에 대한 예비연구. 지질학회지, 35, 321-336.
- 정지곤, 1987, 하동-산청 지역의 회장암질암의 분화. 지질학회지, 23, 216-228.
- 정지곤, 이상만, 1986, 하동-산청 지역 회장암질암의 변성 작용에 관한 연구. 이상만 교수 송수기념 논문집, 87-106.
- 정지곤, 김원사, David H. Watkinson, 1989, 하동 지역에 분포한 회장암질암의 구조와 티타늄광체의 산출상태. 지질학회지, 25, 98-111.
- 정지곤, 김원사, 서병민, 1991, 경상분지 서부 인접 지역에 위치한 염기성 및 초염기성암의 성인에 관한 연구, 대한 지질학회지 제 46차 정기학술대회 발표논문 요약, 지질학회지, 27, 530-531.
- Ashwal, L.D., 1993, Anorthosites. Springer-Verlag, Berlin, 422 pp.
- Bottinga, Y. and Javoy, M., 1975, Oxygen isotope partitioning among the minerals in igneous and metamorphic rocks. Rev. Geophys. Space Phys., 13, 402-418.
- Clayton, R. N. and Mayeda, T. K., 1963, The use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxides and silicates for isotopic analysis. Geochim. Cosmochim. Acta, 72, 43-52.
- Criss, R.E., 1999, Principles of stable isotope distribution, Oxford University Press, 254 p.
- Emslie, R.F., 1980, Geology and petrology of the Harp Lake Complex, central Labrador: an example of Elsonian magmatism. Geological Survey of Canada Bulletins, 293, 136 p.
- Jeong, J. G., 1982, Petrologic studies on anorthositic rocks in Hadong-Sancheong district, Korea. J. Geol. Soc. Korea, 18, 83-108.
- Kwon, S.-T. and Jeong, J.G., 1990, Preliminary Sr-Nd isotope study of the Hadong-Sancheong anorthositic rocks in Korea: Implication for their origin and for the Precambrian tectonics. J. Geol. Soc. Korea, 26, 341-349.
- Nabelek P.I., O'Neil J.R. and Papike J.J., 1983, Vapor phase exsolution as a controlling factor in hydrogen isotope variation in granitic rocks: the Notch Peak granitic stock, Utah. Earth Planet Sci. Lett., 66, 137-150.
- Peck W.H. and Valley J.W., 2000, Large crustal input to high  $\delta^{18}\text{O}$  anorthosite massifs of the southern Grenville Province: new evidence from the Morin Complex, Quebec. Contrib. Mineral. Petrol., 139, 402-417.
- Ranson, W.A., 1981, Anorthosites of diverse magma types

- in the Puttuaaluk Lake area, Nain complex, Labrador. Canadian Journal of Earth Sciences, 18, 26-41.
- Rousell, D.H., 1978 Geology of the anorthositic sill at St. Charles, Ontario. In: Current Research, Part A. Geological Survey of Canada Paper 78-1A, Ottawa, 163-168.
- Taylor, B.E., Eichelberger, J.C. and Westrich, H. R., 1983, Hydrogen isotopic evidence of rhyolitic magma degassing during shallow intrusion and eruption. Nature, 306, 541-545.
- Vennemann, T. W. and O'Neil, J. R., 1993, A simple and inexpensive method of hydrogen isotope and water analyses of minerals and rocks based on zinc reagent. Chem. Geol. (Isotope Geosci. Sec.), 103, 227-234.
- Wiebe, R.A., 1978, Anorthosite and related plutons, southern Nain complex, Labrador. Canadian Journal of Earth Science, 15, 1326-1340.
- Wiebe, R.A., 1979, Anorthosite dikes, southern Nain complex, Labrador. American Journal of Sciences, 279, 394-410.
- 
- (2004년 9월 25일 접수; 2004년 10월 21일 채택)