

# 울릉도 산출 암석의 열물성 자료를 이용한 울릉도 지열 성인에 대한 열전도 수치모델링 연구

이창열\*, 김기석, 연관희

## Numerical Heat-conduction Modeling to Understand the Genesis of the Observed Geothermal Gradient in Ulleung Island using Experimentally Determined Thermal Properties of the Rocks

Changyeol Lee\*, Kiseog Kim, Kwanhee Yun

**Abstract** We have numerically modeled thermal evolution of Ulleung Island after an emplacement of magma chamber. The disk-shape magma chamber is assumed to locate at 2.9 km beneath the island and has a diameter and a thickness of 10 km and 300 (or 600) m, respectively. The geothermal gradients evaluated from the numerical modeling coincide well with the range of the geotherms ( $\sim 95^\circ\text{C}/\text{km}$ ) observed from the well logging. Although there are limitations in the application of the numerical results directly to the interpretation of the observed geotherms, we believe that an existence of a hot magma chamber in molten or in solidified state is the most plausible explanation for the observed geotherms.

**Key words** Ulleung Island, Geotherm, Thermal properties, Magma chamber, Numerical modeling

**초 록** 본 연구는 울릉도 화산체 하부에 있는 마그마 방이 냉각될 때 주변에 발생하는 열전달을 컴퓨터 수치모델링을 이용하여 계산하였다. 마그마 방은 울릉도 화산체 중앙의 정상부에서 2.9 km 깊이에 위치하며, 지름 10 km, 두께 300 m 혹은 600 m의 디스크 형태로 가정되었다. 본 연구의 수치모델링을 이용하여 계산된 화산체의 지온증가율은 시추공 검층으로 관찰된 지온증가율인  $95^\circ\text{C}/\text{km}$ 와 유사하다. 본 연구에서 사용된 수치모델링에는 많은 가정이 적용되었기 때문에 연구 결과를 울릉도의 지열 해석에 직접 적용하는 데에는 한계가 있다. 그러나, 시추공에서 관찰된 높은 지온증가율은 화산체 하부에 용융 또는 고체 상태로 존재하는 뜨거운 마그마 방에서의 열전달에 의한 것으로 판단된다.

**핵심어** 울릉도, 지열, 열물성, 마그마 방, 수치모델링

### 1. 서 론

울릉도는 동해 울릉분지의 북쪽 주변부에 위치한 화

산섬으로 조면암, 현무암, 응회암, 집괴암 등으로 구성되어 있으며 가장 최근의 화산활동은 9,300년에서 6,300년 사이에 있었던 것으로 알려져 있다(김기범, 이기동, 2008). 화력발전으로 대부분의 전력을 충당하는 울릉도에 친환경재생에너지인 지열발전을 통한 전력 충당의 필요성이 지속적으로 제기되었다. 실제 북대서양의 섬인 아이슬란드(Iceland)는 중앙해령(mid-ocean ridge)과 열점(hotspot) 위에 위치하고 있어 활발한 화산 활동에 의한 지속적인 지열 에너지가 공급되므로 수십 년 전부터 지열발전(Energy Statistics in Iceland 2015)이 활발하게 이루어지고 있으며 국내에서도 일부

Received: July 4, 2016

Revised: July 20, 2016

Accepted: July 20, 2016

\*Corresponding Author: Changyeol Lee

Tel) +82625303451, Fax) +82625303459

E-Mail) changyeol.lee@gmail.com

Faculty of Earth Systems and Environmental Sciences, Chonnam National University 33 Yongbong-no Bukgu Gwangju, Republic of Korea 61186

지역에서 지열발전의 가능성이 제시되었다(이태종과 송윤호, 2013). 비교적 최근까지 화산 활동이 일어났던 울릉도를 아이슬란드처럼 잠재 열원(마그마 방)을 가진 화산섬으로 여길 수도 있지만 섬 내부에서의 온천 개발 등의 이력이 존재하지 않기 때문에 열원을 지닌 화산섬으로 단정하기에는 어려움이 있다. 이와 같은 이유로 지열발전의 가능성을 검증하기 위하여 최근 울릉도에서 시추조사를 수행하여 온도 측정을 하였으며 높은 지온증가율이 존재함이 확인되었다(홍훈기 외, 2014). 또한, 최근에 보고된 S파(S-wave)를 이용한 지진파단층도(seismic tomography)는 울릉분지 하부에 위치한 맨틀에서 S파의 급격한 속도 감소를 보여주었으며, 이는 맨틀의 온도가 주변부의 온도보다 높거나 부분 용융에 의한 마그마가 존재하기 때문인 것으로 해석되었다(Simute et al, 2016). 만약 울릉분지 하부 맨틀에 마그마가 존재한다면, 울릉도 화산체 하부에 뜨거운 열원인 마그마 방이 존재할 가능성을 지시하므로 지속적인 지열발전의 가능성을 암시한다. 그러나, 아직까지 마그마 방의 존재를 검증할 탄성파 탐사 등은 이루어지지 못한 상태이다.

이 연구에서는 마그마 방의 존재 가능성이 높은 울릉도 화산체 하부 지각에 마그마 방이 존재한다고 가정하였다. 마그마 방이 정치(emplacement)된 이후 주변으로의 전도에 의한 열전달을 통하여 냉각되는 과정을 컴퓨터 수치모델링을 이용하여 해석하였다. 도출된 결과는 보고된 시추공 온도 검층 자료 및 지온증가율과 비교되었으며, 이를 토대로 마그마 방의 유무 및 지속적인 지열발전 가능성을 검증하고자 하였다.

## 2. 시추공 조사를 통한 울릉도 지열 측정

### 2.1 시추공 위치

울릉도의 지열을 측정하기 위하여 2011년에서 2015년까지 총 4공의 시추조사가 수행되었다(지식경제부, 2011; 홍훈기외, 2014; Korea Electric Power Research Institute, 2015, 2016). 시추공의 위치는 울릉도의 동서남북 지역에 분포하며(Fig. 1), 각 시추공의 심도는 다음과 같다; 2011년 GH-1 시추공: 600 m, 2011년 GH-2 시추공 500 m, 2015년 GH-3 시추공 1,005 m, 2016년 GH-4 시추공 1,009 m.

### 2.2 시추조사

수행된 시추조사에서는 회전수세식(rotary wash type) 방식의 유압식 시추기가 사용되었으며, 1,000 m 이상의 대심도를 굴진 시에는 로드(rod)와 케이싱의 하중, 코어

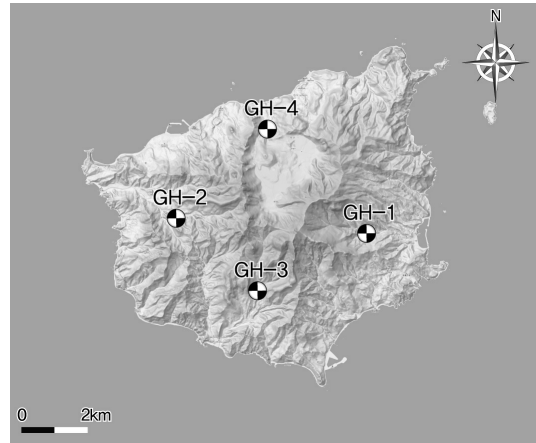


Fig. 1. Location map for the boreholes of GH-1, 2, 3 & 4 on the topographic map of Ulleung Island

배럴 인발심도 등을 감안하여 고성능의 장비가 사용되었다. GH-1, GH-2 시추공은 NX 규격(내경 76.2 mm)으로 굴진되었으며, 1,000 m 이상의 대심도 굴진을 시행한 GH-3, GH-4 시추공은 연암층과 보통암층을 각각 HQ 규격(내경 77.9 mm)과 NQ 규격(내경 60.0 mm)으로 굴진되었다. 1,000 m 이상의 대심도 굴진에서는 상부 봉적층과 풍화대 구간의 공벽붕괴 방지를 위해서 케이싱이 설치되었고 최종 심도까지는 NQ 규격(내경 60.0 mm)으로 굴진되었으며, 굴진 종료 후 물리검층이 수행되었다.

### 2.3 온도 검층 결과

울릉도의 지열측정을 위해 설치된 시추공 GH-1, GH-2, GH-3 그리고 GH-4에서 한국지질자원연구원(KIGAM)에서 온도검층을 실시하였다. 온도검층에 따르면, GH-1 시추공은 600.1 m에서 최종 73.79℃로 지온증가율이 약 95℃/km, GH-2 시추공은 497.04 m에서 최종 66.11℃로 지온증가율은 약 95℃/km, GH-3 시추공은 1,001.0 m에서 최종 77.1℃로 지온증가율은 약 63.5℃/km, GH-4 시추공은 1,009.0 m에서 최종 92.2℃로 지온증가율은 약 77.1℃/km로 각각 관찰되었으며(KEPRI 외, 2016). 모두 일반적인 지각의 지온증가율인 25~30℃/km 보다 훨씬 높다.

### 2.4 열물성

열전도도(thermal conductivity)는  $2.9 W/(m \cdot K)$ 으로, 울릉도에서 가장 흔하게 관찰되는 조면암을 대상으로 한국지질자원연구원에서 직접 측정하였다. 방사성

동위원소 붕괴열은 조면암에서 측정된 감마선 API 값 (gamma ray API)을 변환하여 구한  $3.0 \times 10^{-6} \text{ W/m}^3$  으로 측정되었다(KEPRI 외, 2016).

### 3. 지질 현상 열전도 모델링

#### 3.1 지배방정식

시추공에서 측정된 높은 지온증가율은 울릉도 화산체 하부에 뜨거운 열원인 마그마 방이 존재한다는 것을 암시하므로, 우리는 울릉도 화산체 하부 지각에 마그마 방이 존재한다고 가정하였다. 뜨거운 마그마 방에서 주변부로의 열전달(heat transfer) 기작으로서 우리는 전도(conduction)만을 고려하였다. 3차원 공간의 고체에서의 전도에 의한 열전달은 확산 방정식(diffusion equation)을 이용하여 설명할 수 있으며 직교좌표계 하에서 다음과 같이 정의된다(Crank, 1975).

$$\frac{dT}{dt} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

여기에서,  $T$ 는 온도( $^{\circ}\text{C}$ ),  $t$ 는 시간(s),  $k$ 는 열확산율(thermal diffusivity,  $\text{m}^2/\text{s}$ )이며 열확산율은 열전도도( $K$ ), 열용량( $C_p$ , heat capacity,  $J/(kg \cdot K)$ ) 그리고 밀도( $\rho$ , density,  $\text{kg}/\text{m}^3$ )의 관계식인  $k = \frac{K}{C_p \cdot \rho}$ 로 표기될 수 있다.

#### 3.2 컴퓨터 수치모델링

울릉도 화산체는 높이가 약 2900 m, 지름이 약 30 km 인 콘(cone) 형태로 해저면 위에 형성되어 있으며 해수면 위로 돌출된 섬의 지름은 약 10 km이다(김기범과 이기동, 2008). 우리는 컴퓨터 수치모델링을 수행하기 위하여 Fig. 2와 3에서 제시된 콘(cone) 형태로 섬 모양을 단순화하였다. 이 연구에서 지열이 측정된 GH-4 시추

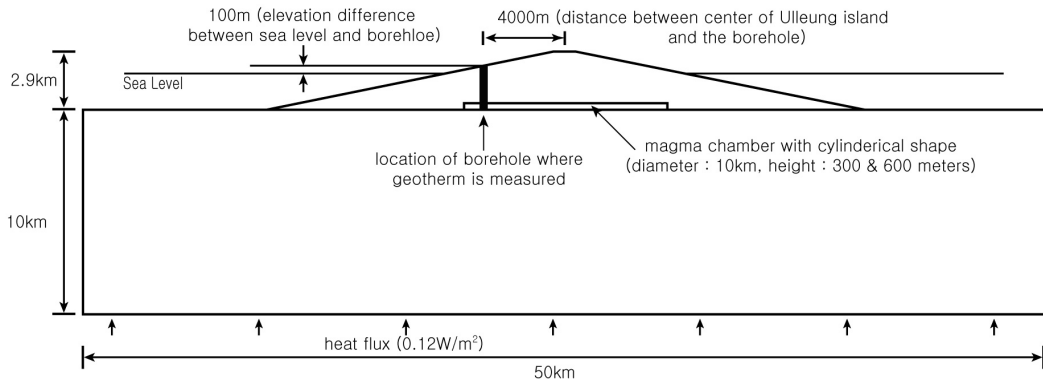


Fig. 2. Simplified illustration of the model dimensions and boundary conditions

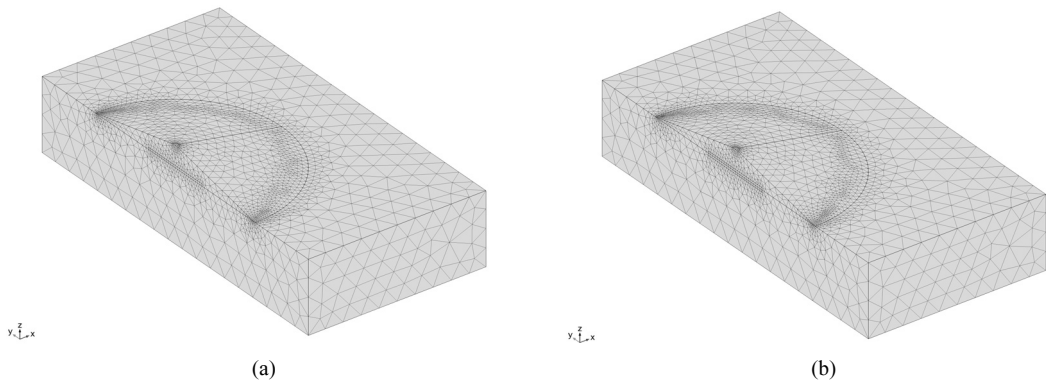


Fig. 3. Finite element mesh used for the calculation of thermal evolution after an emplacement of a magma chamber. (a) a model using a 300 m-thickness of the magma chamber. (b) a model using a 600 m-thickness of the magma chamber

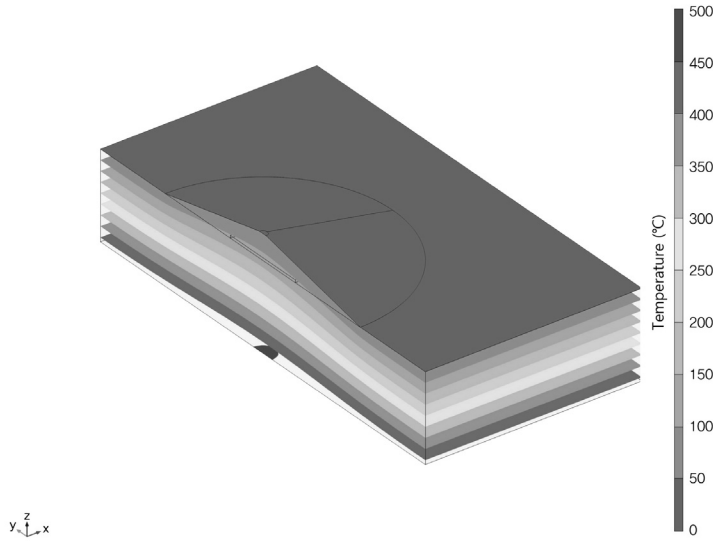


Fig. 4. A steady-state geotherm calculated with the parameters listed in Table 1

공은 해발고도 100 m에 위치하는 것으로 설정하였으며 지표면에서 1 km 깊이까지의 지온의 변화를 관찰하였다.

마그마 방 형성 이후 울릉도 화산체의 수치모델링을 수행하기 위하여 우리는 마그마 관입 전 울릉도 화산체의 지온 분포를 마그마 방이 없는 상황에서의 정상 상태 온도 분포로 가정하였다. 화산체 온도 분포를 계산하기 위한 경계조건으로서, 모델 하부 경계면의 온도를 고정시키는 방법과 모델 하부에서 유입되는 열유량을 고정시키는 방법 등이 사용된다. 모델의 상부 경계면인 지표면의 온도는 일반적으로 0°C로 가정하는 것이 가능하나, 고심도 지온을 직접 측정하지 못 하였기 때문에 모델 하부 경계면을 특정 온도로 고정시키기에는 근거가 부족하다. 그러므로, 본 연구에서는 울릉분지 주변에서 측정되는 열유량이 약 0.08~0.15 W/m<sup>2</sup>임(Kim et al., 2010)을 감안하여 10 km 깊이의 지각 하부에서 0.12 W/m<sup>2</sup>의 열유량이 지속적으로 공급된다고 가정하였다. 이 경계 조건을 이용하여 열전도를 계산하여 정상 상태에 도달한 지온을 모델의 초기조건으로 설정하였다 (Fig. 4). 모델의 초기조건에서 수평 디스크 형태의 마그마 관입이 매우 짧은 시간 동안 발생한 것(instantaneous event)으로 가정하였고 이후 마그마 방의 냉각과 주변으로의 열전달을 계산하였다.

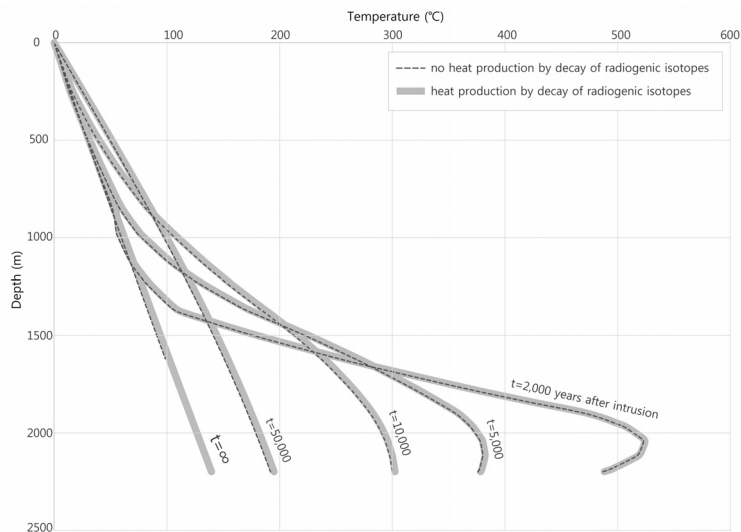
수치모델링에서 사용된 물성 값으로 열용량은 850 J/(kg · K), 밀도는 2,600 kg/m<sup>3</sup>, 열전도도는 2.9 W/(m · K)을 사용하였다(Table 1). 이를 이용하여 계산된 열확산율

은 1.18×10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s이며, 이 값은 지열 관련 문헌(Philpotts, 1990)에서 알려진 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s과 상당히 유사한 값이다. 계산 속도의 향상을 위하여 화산체 전체를 고려하지 않고 화산체를 중심으로 대칭(symmetric) 구조로 모델 도메인(domain)을 형성하였다. 모델의 측부 경계에는 모두 단열(insulated) 경계조건을 부여하였다. 마그마 방의 부피는 모델 도메인의 부피에 비하여 매우 작으므로 단열 경계 조건에 의한 온도 분포에 대한 영향은 미미할 것으로 볼 수 있다. 마그마 방은 해양지각의 상부 표면과 화산섬 하부 경계 사이에 두께 300 m 혹은 600 m, 직경이 10 km인 디스크 형태로 가정하여 삽입하였다. 마그마의 초기 온도로서 우리는 현무암질 마그마의 온도인 1100°C를 사용하였다. 아울러, 화산체 내부의 암석에서 발생하는 방사선 동위원소의 붕괴열은 시추공에서 채집된 암석의 측정값인 3.0×10<sup>-6</sup> W/m<sup>3</sup>을 사용하였으며, 화산체 하부에 존재하는 지각에 해당하는 방사선 동위원소의 붕괴열은 해양지각에서 보고된 일반적인 값인 0.1×10<sup>-6</sup> W/m<sup>3</sup>(Davies, 2011)을 사용하였다.

수치모델링을 위하여 우리는 상용 소프트웨어인 콤솔 멀티피직스(COMSOL Multiphysics)를 사용하였다(http://www.comsol.com). COMSOL Multiphysics는 유한요소법(finite element method) 기반의 상용소프트웨어로 기계, 전기, 유체역학, 화학공학의 공정 등의 다양한 물리현상을 모델링할 수 있는 모듈들이 분리(segreated) 혹은 직접(direct) 계산을 통해 활용될 수 있으므로, 다

**Table 1.** Parameters used for modelling

type (magma vs country rock)	model parameters	value	units
disk magma chamber	diameter	10	km
	height	300 or 600	m
	temperature	1,100	°C
	radiogenic heat production	$0.1 \times 10^{-6}$	$W/m^3$
	latent heat of crystallization	0	$W/m^3$
properties of magma chamber and country rock	heat capacity	850	$J/(kg \cdot K)$
	density	2,600	$kg/m^3$
	thermal conductivity	2.9	$W/(m \cdot K)$
	thermal diffusivity	$1.18 \times 10^{-6}$	$m^2/s$
properties of country rock	radiogenic heat production (volcano)	$3.0 \times 10^{-6}$	$W/m^3$
	radiogenic heat production (underlying oceanic crust)	$0.1 \times 10^{-6}$	$W/m^3$
	heat flux at the bottom of the model	0.12	$W/m^2$

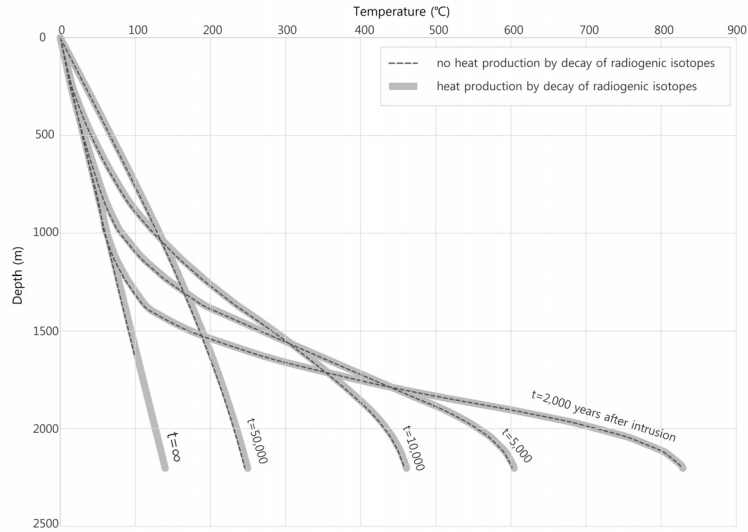


**Fig. 5.** Thermal evolution of the volcanic body with depth after an emplacement of a magma chamber. The thickness of the magma chamber is assumed as 300 m. The dashed and shaded curves represent thermal profiles obtained from the experiments using no radiogenic heat production and the rate of the radiogenic heat production used in this study, respectively

중 물리 현상의 동시 모델링을 가능하게 한다. 모델 도메인은 사면체 요소(element)로 분할하여 구성하였다. 화산체의 바깥부분과 하부 지각이 만나는 지역 그리고 마그마 방에 해당하는 요소는 메쉬 세밀화(mesh refinement)를 사용하여 수치 계산의 정확도를 확보하였다. 확산 방정식을 계산하기 위하여 직접 솔버(direct solver)를 사용하였다.

### 3.3 결과

Fig. 5는 두께 300m로 가정된 마그마 방의 형성 이후, 모니터링 시추공 지점에서 2,000년, 5,000년, 10,000년, 50,000년, 무한 시간 경과 이후의 지온의 진화를 나타낸다. 무한 시간 경과 이후의 지온 분포는 마그마 방이 없을 때의 경우, 즉 수치모델링의 초기 조건에서 부여된 지온 분포와 같다. 마그마 방이 없을 경우, 지표면에



**Fig. 6.** Thermal evolution of the volcanic body with depth after an emplacement of a magma chamber. The thickness of the magma chamber is assumed as 600 m. The dashed and shaded curves represent thermal profiles obtained from the experiments using no radiogenic heat production and the rate of the radiogenic heat production used in this study, respectively

서 1 km 심도까지의 평균 지온증가율은 약  $60^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 이며 이는 시추공에서 관찰된 지온증가율에 비해 크게 낮은 것을 알 수 있다. 마그마 방의 형성 이후, 마그마 방 주변으로 전도에 의한 열전달이 발생하여 마그마 방의 온도는 감소하나 마그마 방 주변의 온도는 상승하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 2,000년의 시간이 경과한 경우에는 시추공의 도달 깊이인 약 1 km 깊이에서 지온의 변화가 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 이는, 마그마 방에서 유출된 열이 아직까지 시추공에까지 도달하지 못 하였음을 시사한다.

마그마 방에서 열유출이 지속됨에 따라 마그마 방의 온도는 지속적으로 감소하나, 마그마 방 상부의 온도는 계속하여 증가하게 되며, 5,000년이 경과하면 GH-4 시추공의 도달 깊이인 약 1 km 깊이에서 약  $80^{\circ}\text{C}$ 로 지온이 상승하여 평균 지온 증가율이 약  $80^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 에 도달한다. 10,000년 경과 후 시추공의 깊이에서 약  $110^{\circ}\text{C}$ 의 최대 온도가 형성되며 지온증가율( $110^{\circ}\text{C}/\text{km}$ )은 보다 선형적인 증가 형태를 보인다. 이후 화산체의 온도는 전체적으로 감소하기 시작하여 50,000년의 시간이 경과하였을 때 약 1 km 깊이에서의 지온증가율은 약  $100^{\circ}\text{C}$ 에 이르게 되며 이후에는 무한 시간에 해당하는 지온 분포로 점진적으로 수렴한다. GH-4 시추공에서 측정된 지온 증가율은  $77.1^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 이므로, 우리의 수치모델링에 의하면, 마그마 방 형성 이후 약 5,000년 혹은 50,000년

이상 경과된 경우와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 방사성 동위원소 붕괴열이 지온에 주는 영향을 알아보기 위하여 별도의 수치모델링을 수행하였다. 수치모델링 결과는 방사성 동위원소 붕괴열이 지온에 거의 영향을 주지 않는다는 것을 잘 보여준다(Fig. 5).

마그마 방의 부피에 의한 화산체 열진화의 영향을 평가하기 위하여 마그마 방의 두께를 600 m로 두 배 확대한 수치모델링을 수행하였다. 이 경우 마그마 방의 부피가 작은 수치모델링에 비하여 같은 시간에 마그마 방 주변에 많은 열에너지를 공급할 수 있다. 그러므로 마그마 방 형성 이후 2,000년이 경과되었을 때 마그마 방 주변의 온도는 마그마 방의 두께를 300 m로 설정한 수치모델링보다 훨씬 높은 값을 보여준다(Figs. 5 and 6). 그러나 전반적인 지온의 변화 양상은 마그마 방 두께를 300 m로 설정한 수치모델링과 유사하며, 10,000년과 50,000년의 시간 경과 후 지온증가율은 각각  $135^{\circ}\text{C}/\text{km}$  및  $140^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 로 더 높게 나타났다. 이 수치모델링에서도 방사성 동위원소의 붕괴열이 지온에 미치는 영향은 매우 작다는 것을 확인하였다. GH-4 시추공에서 측정된 지온 증가율  $77.1^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 을 가장 잘 설명하는 경우는 300 m의 두께를 가진 마그마 방이 형성된 이후 2,000년에서 5,000년 사이 혹은 50,000년 이후로 판단할 수 있다.

#### 4. 토의 및 결론

시추공에서 측정된 지온증가율은  $63^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 에서  $95^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 이며 이러한 지온증가율은 컴퓨터 수치모델링을 이용하여 마그마 방의 냉각에 의한 열전달을 계산한 결과와 비교적 잘 부합한다. 수치모델링에서 고려된 열유량 ( $0.12\text{ W}/\text{m}^2$ )은 일반적인 해양 지각의 평균 열유량인  $0.1\text{ W}/\text{m}^2$  (Davies, 2011)보다 높음에도 불구하고 추가적인 열원이 존재하지 않는다면 시추공에서 측정된 높은 지온증가율은 설명될 수 없다. 또한, 방사성 동위원소의 붕괴열은 지온에 미치는 영향이 작으므로 높은 지온증가율의 원인이 될 수 없다. 그러므로, 측정된 지온증가율을 설명할 수 있는 가장 합리적인 지질구조는 울릉도 화산체 내부에 존재하는 마그마 방이다. 울릉도는 지질학적으로 비교적 최근인 기원전 약 6,300년에도 화산활동을 일으킨 활화산이므로(Arai et al., 1981), 울릉도 화산체 내부에 뜨거운 마그마 방이 아직까지도 존재하고 있을 가능성이 높다. 그러므로 마그마 방에서 유출된 열이 수천 년 이상 높은 지온증가율을 울릉도 화산체 내부에서 유지시키고 있을 것으로 추정된다.

비록 울릉도 화산체 내부에 마그마 방이 존재할 가능성이 높지만, 수치모델링에서 고려되지 않은 많은 변수가 존재한다. 첫째, 수치모델링에서 중요한 요소인 마그마 방의 크기 및 위치가 아직까지 알려지지 않았으므로 수치모델링의 결과는 마그마 방의 크기 및 위치에 따라 달라질 수 있다. 둘째, 수치모델링에서는 마그마 방의 형성 이후 울릉도 화산체 내부에서의 열전달이 전도에 의해서만 일어나는 것으로 단순화되었다. 그러나 마그마 방 내부 대류와 마그마 방과 접한 기반암에 발달한 절리를 따라 흐르는 열수(hydrothermal fluid)의 순환에 의한 열전달은 열전도보다 훨씬 더 빠르게 열을 주변 지역에 확산시킨다. 만약 이러한 기작들이 고려된다면 마그마 방의 열에너지는 주변으로 빠르게 전달될 것이므로 마그마 방의 온도는 수치모델링에서 계산된 것보다 빠르게 감소할 것이다. 그러므로 수치모델링에서 계산된 값보다 심도가 얇은 지역에서는 지온이 높게, 심도가 깊은 지역에서는 지온이 낮게 나타날 것으로 예상된다. 이는 지온이 수치모델링에서 요구되는 시간보다 더 빠르게 증가할 것임을 암시한다. 또한, 시추공의 위치에 따라 다른 지온증가율이 관찰되는데 이는 지역적으로 발달한 파쇄대를 따라 전달된 뜨거운 열수 순환의 정도가 다르거나 마그마 방의 분포가 지역적으로 다르기 때문에 발생한 것으로 해석될 수 있다. 보다 사실적인 수치모델링을 수행하기 위하여, 마그마 방의 크기와 위치 그리고 온도를 파악할 수 있는 전기전도도 탐사

및 탄성과 탐사가 요구된다. 또한 수치모델링 기법의 항상 방안으로, 마그마 방 내부 대류를 고려한 열전달을 고려하는 것이 필요하다. 예를 들어, 광물의 분별 정출 작용에 의한 잠열이 마그마 방의 온도 및 대류에 미치는 영향이 수치모델링에 고려될 수 있을 것이다. 둘째, 열수 순환과 화산체 내부에 발달한 파쇄대가 열수 순환에 미치는 영향을 고려하는 것이 필요하다. 화산체 내부에 파쇄대가 발달되어 있다면 파쇄대 주변을 따라 열수 이동이 활발하게 발생하여, 효율적이고 지역적인 열전달이 발생할 수 있으므로 시추공에서 나타나는 지역적인 지온증가율의 차이를 설명할 수 있을 것으로 추정된다. 이러한 다양한 열전달 기작과 화산체 내부 구조들을 고려하기 위한 후속 연구에도 COMSOL Multiphysics의 유체 및 지하수 모듈을 유용하게 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 사 사

이 연구는 2014년도 한국에너지기술연구원 산업기술 혁신사업(과제번호: 20143030110950)의 지원을 받아 수행되었습니다.

#### References

1. 김기범, 이기동, 2008, 울릉도의 화산층서와 단층에 대한 연구, 지질공학회지, 18, 321-330.
2. 홍훈기, 윤건신, 전재수, 김영식, 정성욱, 송윤호, 2014, 울릉도 심부 지열자원 부존 가능성 검토, Proceedings of KSEG 2014 Spring Conference, 419-423.
3. Arai, F., Oba, T., Kitazato, H., Horibe, Y. and Machida, H., 1981, Late Quaternary tephrochronology and paleo-oceanography of the sediments of the Japan Sea, Quaternary Research, 20, 209-230.
4. Crank, J., 1975, The mathematics of diffusion, Clarendon Press, Oxford.
5. Davies, G. F., 2011, Mantle Convection for Geologist, Cambridge University Press.
6. Energy Statistics in Iceland 2015, 2015, ed. Baldur Petursson, National Energy Authority, Ministry of Industries and Innovation, Government Offices of Iceland.
7. KEPRI/KIGAM/Nexgeo./Heesong Geotek/KETEP, 2016, Final report of Assessment of deep geothermal resources for geothermal power generation in Ulleung Island (in Korean).
8. Kim, Y., Lee, S.-M., Matsubayashi, O., 2010, New heat flow measurements in the Ulleung Basin, East Sea(Sea of Japan): relationship to local BSR depth, and implications for regional heat flow distribution, Geo-Marine Letters, 30, 595-603.
9. Korea Electric Power Research Institute, 2015, Final

- report of deep and high-temperature drilling 1st project (in Korean).
10. Korea Electric Power Research Institute, 2016, Final report of deep and high-temperature drilling 2nd project (in Korean).
  11. Philpotts, A.R., 1980, Principles of igneous and metamorphic petrology, Prentice Hall.
  12. Simute, S., Steptoe, H., Cobden, L., Gokhberg, A., Fichtner, A., 2016, Full-waveform inversion of Japanese Islands region, Journal of Geophysical Research, Solid Earth, 121, doi:10.1002/2016JB012802.
  13. T.J. Lee, Y.H. Song, 2013, Enhanced Geothermal System Case Study: The Soultz Project, Tunnel & Underground Space Vol. 23, No. 6, 561-571.

---

### 이 창 열



2004년 고려대학교 이과대학 지구환경  
과학과 이학사  
2010년 버지니아 공과대학교 대학원 지구  
과학과 이학박사

Tel: 062-530-3451  
E-mail: changyeol.lee@gmail.com  
현재 전남대학교 자연과학대학 지구환경  
과학부 부교수

### 연 관 희



1993년 서울대학교 자원공학과 공학사  
1995년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
2007년 서울대학교 자원공학과 공학  
박사

Tel: 042-865-5892  
E-mail: geoyun1@kepcoco.kr  
현재 한국전력공사 전력연구원 친환경  
구조그룹 책임연구원

---



---

### 김 기 석



1987년 서울과학기술대학교 전자공학과  
공학사  
2004년 충남대학교 대학원 토목공학과  
공학석사  
2008년 수원대학교 대학원 토목공학과  
공학박사

Tel: 02-576-381  
E-mail: kskim@hsgeo.co.kr  
현재 (주)희송지오텍 대표이사

---