화산지질층 지하공기 열원 이용 가능성에 관한 연구

A study on the availability of underground air for heating/cooling energy in volcano-stratigraphic

김용환* · 김성만** · 이동원*** · 현명택**†

Yong-Hwan Kim*, Sung-Man Kim**, Dong-Won Lee*** and Myun-Taek Hyun**†

(접수일 : 2013년 07월 18일, 수정일 : 2013년 10월 28일, 채택확정 : 2013년 10월 29일)

Abstract: This study introduces and analyzes the energy for heating and cooling system in region with volcano-stratigraphic. The thermodynamic properties of air through the air blower installed at the entrance of borehole are measured. It estimates the availability of underground air for heating and cooling system through experimental data and theoretical analysis. Based on our conclusion from these calculations we predict possibility of over 40kW steady and stable energy source from underground. Therefore this underground air can be utilized in region with volcano-stratigraphic.

Key Words : Volcano-stratigraphic, Building heating/cooling, Underground air, Heat convection, Air blower

1. 제주도의 지질구조 및 지질학적 특성

제주도는 한반도 남서부에 위치한 화산섬으로 약 2백만년 전에 생성되었다. 제주도의 크기는 한라산을 중심으로 동쪽과 서쪽간의 가로길이는 73 km이고, 북쪽과 남쪽간의 세로길이는 31 km로 총 면적은 1,847 km²이다. 지형적 특징은 서쪽-동쪽 방향의 지형은 완만한 경사를 이루며 형성되었고, 제주시와 서귀포의 북쪽-남쪽은 가파르고 험준한 지형적 특징을 지닌다. 제주도는 높은 온도의 현무암질 마그마 기원의 용암이 흐르고 쌓여 한라산을 정점으로 완만한 구름 모양을 이루고 있다.

제주도에는 용암분출에 의해 형성된 화산암과 화산폭발에 의해 형성된 화산쇄설암이 있으며, 용암과 용암사이에 퇴적암이 나타난다. 지질조사에 의하면 상부는 현무암이 차지하고 있고, 그 밑으로는 서귀포층, 미고결 퇴적층이, 더 깊은 곳에는 화강암과 용결응회암이 분포하고 있다. 화산암으로는 현무암, 조면현무암, 현무암질 조면안산암, 조면안산암 등이 있다. ¹⁾ Fig. 1은 제주도 지질도와 지질단면도를 나타낸 것이다. ²⁾ 용암(lava)은 구성 성분, 온도에 따라 지표에 나타나는 현상이 큰 차이가 있으며, 높은 온도와 낮은 점성을 갖는 파호이호이(pahoehoe) 용암과 낮은 온도와 높은 점성을 갖는 아아(aa)용암으로 구분한다.

**† 현명택(교신저자) : 제주대학교 기계시스템공학부

E-mail : mthyun@jejunu.ac.kr Tel : 064-754-3624

*김용환 : (주)제스코

**김성만 : 제주대학교 기계공학전공

***이동원 : (주)두합

**† Myun-Taek Hyun(corresponding author) : Department of Mechanical Engineering, Jeju National University.

E-mail : mthyun@jejunu.ac.kr Tel : 064-754-3624

*Yong-Hwan KIM : JESCO. Ltd.,

**Sung-Man Kim : Department of Mechanical Engineering, Jeju National University

*** Dong-Won Lee : DH. Ltd.,

Fig. 1 Geologic map

파호이호이 용암은 넓은 지역에 걸쳐 평탄한 이루는 암석을 만들고, 아아용암은 거친 표면과 암석 부스러기로 구성된 두꺼운 클링커층을 갖고 있는 암석을 만든다. 점성이 낮은 용암의 표면이 고결되고, 내부는 미고결상태에서 연속적인 흐름이 발생하여 내부 사이에 틈이 생겨 공동이 형성된다. 스코리아(Scoria)는 유리질의 현무암질 부석으로서, 크기는 6 cm 이하이며, 각력상이며 미고결층을 이루며, 기공의 함량이 높다. (70~80%). 스코리아의 형성은 휘발성분이 높은 압력의 마그마에 녹아 있다가 마그마가 상승하면서 압력이 낮아지면 마그마속에 기포를 형성한다. 기포는 서로 합쳐서 커다란 기포를 만들어 압력이 높아지고 마그마보다 빠른 속도로 상승하면서 폭발한다. 이때 다소 굳은 마그마가 작은 크기로 깨져 나오면서 스코리아가 되고, 큰 덩어리로 뿜어 나오게 되면 화산탄이 된다. 제주도에서는 이를 송이라고 하는데 지역에 따라 조금씩 차이를 보이고 있으나 색깔에 따라 적갈색, 황갈색, 흑색, 암회색으로 크게 4가지로 분류하고 있다.^{1), 3)}

2. 지중공기 원리 및 열적특성

제주도의 지질은 5 m 내외의 토사층을 제외하

고 대부분 다공질의 현무암과 클링커(Clinker), 스코리아(Scoria) 등으로 구성된 화산 세설층이 반복적으로 나타나고, 암석과 지층 사이에 형성된 다수의 공동에 의해 지표의 공기나 물이 지하로 유입되기 쉬운 구조로 되어 있다. 이와 같은 지질층의 특성을 고려했을 때 Fig. 2와 같은 지하수층 위로 다량의 공기와 물의 유동이 발생할 것이라 예상된다. 이러한 지질구조에서 지중의 열원(Underground heat source)을 얻기 위해 지중을 천공하고 송풍기로 강제 흡입하면 Fig. 3과 같은 깊이별 온도구배(15~18℃)를 갖는 지중공기가 지표 외부로 방출되는데 이를 직접 이용하거나 히트펌

Fig. 2 The mechanism of underground air generation

Fig. 3 The underground temperature variation per depth

프(Heat pump)를 활용한 열교환을 통해 열원을 취득한다. 여기서 지중공기는 암반과 용암쇄설층 등을 통과하는 과정에서 대류 열전달에 의해 열에너지를 흡수한다는 것을 예측할 수 있다.

일반적으로 지중의 열에너지를 이용하는 방식에는 지하 2 km 이상 깊이에서 80°C 이상의 고열을 이용하는 심부지열 이용 방식과 히트펌프를 활용하여 지하 200 m 이내에서 15~18°C 사이의 상온의 열을 이용한 천부지열 이용 등 두 가지로 크게 나눌 수 있다. ^{4), 5)}

이 두 가지 이용방식 중 후자의 천부지열이용 방식이 가장 일반적이고 보급이 많이 이루어진 지중에너지 이용 방식으로 본 연구의 화산지질층 내 지중공기 이용방식과는 다음의 Table 1과 같이 비교될 수 있다.

Table 1 Underground air vs shallow geothermal system

	Underground air	Shallow geothermal system
Borehole depth	50~70m	150~200m
Borehole width	Ø380	Ø150
Heat exchange method	Air to Water	Water to Water
Heat transfer mechanism	Convection	Conduction
Heat source acquisition method	Direct use/ Heatpump	Heatpump

지중 에너지의 특성은 암석의 종류와 온도에 의해 달라지며, 지중 에너지량은 지중온도 및 암석의 열용량에 따라 좌우된다. 따라서 암석 및 지질 구성 특성과 지중온도 변화는 지열에너지를 이용하는데 가장 기초적인 자료가 된다. Table 2는 제주 지역에서 지중 공기 열원을 이용하기 위해 천공한 지역의 천공 깊이와 유량, 온도 등의

Table 2 Physical characterizations of the underground air

Boring location	Altitude (m)	Depth (m)	Physical characterization	
			Flow rate (m ³ /s)	Temperature (°C)
Jongdal-ri, Gujwa-eup	53	40	2.12	18.9
Nak cheon-ri, Hangeong-myeon	70	52	1.51	18.2
Uigwi-ri, Namwon-eup,	85	51	1.85	18.7
Sehwa-ri, Pyoseon-myeon	99	45	2.32	18.4
Sogil-ri, Aewol-eup	122	62	2.11	16.8
Yong kang-dong	367	55	1.31	16.0

기본적인 열유체학적 특성을 보여주고 있다. 지중 공기 온도의 측정은 송풍기 출구에서 측정되었고, 송풍기(Air blower)의 열에 의해 실제 온도보다 약 $\pm 1^\circ\text{C}$ 의 오차를 갖는다. 지중공기 온도는 몇몇 특정 지역을 제외하고 표고가 낮은 지역은 $18\sim 19^\circ\text{C}$, 그리고 표고가 높은 곳은 $16\sim 17^\circ\text{C}$ 의 온도범위를 보이고 있다.

3. 화산암 지질층 지하공기 에너지 취득량에 관한 이론적 해석 및 예측

지중공기는 지표의 공기가 지중의 화산쇄설암층을 통과하는 과정에서 열을 흡수하게 되며 이 과정에서 지하수로 유입되는 물과 접촉하게 된다. 따라서 포화과정과 유사한 과정을 거치게 되며 흡입되는 지중공기는 거의 100%의 습도를 가지게 된다. 또한 열교환 과정에서 온도 강하에 의해 일부 수증기가 응축되며 최종적으로 배출되는 지중공기는 상대 습도가 100%인 상태로 배출된다. 따라서 열교환 가능량을 기초 조사로 통해 얻은 지중공기의 열유체학적 특성을 적용하였고 배출 후 온도를 가정하여 다음의 과정에 따라 해석하였다.

습도비(humidity ratio), $W = m_v/m_a$ 는 습공기(moist air) 상태량 표에서 상태(온도, 압력)에 따라 얻을 수 있다. 여기서, m 은 질량이며 하첨자 a 는 공기, v 는 수증기 w 는 응축수를 의미한다. 단위 체적당 수증기량은 아래와 같이 얻을 수 있고 이때 순 공기량(m_a)은 일정하다고 다음과 같이 가정하였다.

$$m_a = m_{a1} = m_{a2} \quad (1)$$

열교환 전 공기에 포함하고 있는 수증기량과 후의 수증기량은 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$m_{v1} = W_1 \times m_{a1} \quad (2)$$

$$m_{v2} = W_2 \times m_{a2} \quad (3)$$

따라서 열교환 과정에서 응축 수증기량은 다음과 같다.

$$m_w = m_{v1} - m_{v2} \quad (4)$$

지열 취득량은 열교환 과정에서의 온도 변화에 의한 현열과 지중공기에 내포되어 있는 수증기의 응축 잠열의 합에 의해 결정된다.

따라서 지중공기 단위 질량당 지열 취득량(q)은 다음과 같다. 여기서, h 는 각 상태의 엔탈피(enthalpy)이며 h_{fg} 는 응축수의 응축 잠열이다.

$$q(\text{kJ}/\text{m}^3) = m_a(h_1 - h_2) + m_a(W_1 - W_2)h_{fg} \quad (5)$$

따라서 지중공기의 풍량 조건($\dot{V}$)을 대입하면 단위시간당 얻을 수 있는 지열은 다음과 같이 계산할 수 있다. 여기서 ρ 는 밀도이고 $\dot{V}$ 는 풍량이다.

$$Q(\text{kW}) = \rho \dot{V} q \quad (6)$$

Figs. 4~7은 지중공기의 온도에 따른 지열 취득량에 대해 예측한 결과값을 나타낸 것으로 열교환 후 배출온도를 10°C 로 가정하고, 측정되어진 지중온도 $15\sim 18^\circ\text{C}$ 범위에서 $70\sim 100\text{CPM}$ 범위의 풍량을 10CPM 씩 변화시켜 그에 따른 지열 취득

Fig. 4 The simulated result for the absorbed geothermal at the temperature of underground air, 18°C

량 산출하였다. 예를 들어 설명하면(Fig. 6), 온도가 16°C 인 지중공기를 송풍기를 이용하여 100 m³/min의 풍량으로 강제대류 시켰을 때 열교환 후 배출 온도가 10°C 이면 약 48 kW의 지열을 취득할 수 있음을 알 수 있다. 지열 예상 취득량은 지중 온도와 온도차가 클수록 더 크게 나타나고 있으나, 공기 내 포함된 수증기의 응축잠열 때문에 그 비율이 비례적으로 증가하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 5 The simulated result for the absorbed geothermal at the temperature of underground air, 17°C

Fig. 6 The simulated result for the absorbed geothermal at the temperature of underground air, 16°C

Fig. 7 The simulated result for the absorbed geothermal at the temperature of underground air, 15°C

4. 결 론

본 연구는 제주도와 같은 화산 지질층으로 이루어진 지역에 지열에너지와 같이 안정적이고, 연속적인 지중에너지 사용 가능여부를 분석하기 위함이다. 이러한 연구 목적으로 이루어진 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

(1) 화산 지질층의 지중공기는 15~18°C 사이의 일정한 온도범위를 갖고 있기 때문에 일반적인 지열원 시스템과 같이 안정적인 열원 공급을 기대할 수 있다.

(2) 제주도내에서 측정되어진 지중공기 온도, 습도를 고려하여 지열취득 예측량을 산출한 결과 평균 40 kW 이상의 에너지를 취득 가능하며 열교환 온도차가 크고, 풍량이 많을수록 취득 가능 에너지량은 많아짐을 예상할 수 있었다.

(3) 이를 통해 일반적인 지열에너지 시스템과 같이 매우 안정적인 운용이 가능하다는 것을 예측할 수 있었고, 기존의 지열시스템 방식과 비교하였을 때 천공 깊이가 얕고, 깊이별 지중열용량이 크며, 직접 이용이 가능하기 때문에 시공비와

운용비 면에서 경제적이다 예상된다.

(4) 보다 정확하고 명확한 지중공기 열원을 이용한 시스템의 효율을 측정하기 위해서는 지중 내 지층별, 깊이별 온도, 습도, 공기유동량 등에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 제주대학교 학술 진흥 연구비 지원 사업에 의하여 연구되었음

References

1. Geologic columnar section of Jeju island information book, 2001, Jeju Special Self-Governing Province.
2. K. H. Park, J. S. Ahn, W. S. Kee and W. B. Park, 2006, "Guidebook for a Geological Tour of Jeju Island.
3. S. Yoon et. al, 2009, The history of Jeju structure "Joint conference of the Geological Science & Technology of Korea.
4. Y. H. Song et. al, 2005, "Characterization and utilization of geothermal resources in Korea", Ministry of Science and Technology.
5. H. J. Shin, 2005, "Construction of Performance Evaluation Methods and Technical Standards for Ground Source Heat Pump Systems", Korea Institution of Construction Technology, Ministry of Knowledge Economy.