

# 년간 지중온도의 실측 및 수치해석에 관한 연구 A Study on the Yearly Measurement and Numerical Analysis of Underground Temperature

신용한 · 리야드 · 정한식 · 정효민

Y. H. Shin, Md. Riyad Tanshen, H. C. Chung and H. M. Jeong

(접수일 : 2011년 08월 04일, 수정일 : 2011년 12월 28일, 채택확정 : 2012년 01월 11일)

**Key Words** : CFD(전산유체역학), Unsteady heat conduction(비정상 열전도), Underground Temperature(지중온도)

**Abstract** : The geothermal energy is one of the renewable energy sources which can contribute in accomplishing a vision and goal of the national plan on energy for a government suggestion. Especially, the geothermal energy is evaluated as the nearly unlimited resources. The yearly underground temperature distribution by depth is very important to the design of air-conditioning system which uses a geothermal energy. Furthermore, there has no data for comparisons to numerical analysis. In this study, the yearly underground temperature is measured under the depth of 2 m in Tongyeong, and these data are compared with numerical analysis results for checking the accuracy. The results showed that the experimental temperature and numerical results had a good agreements and these results will be utilized to predict a performance of air-conditioning system for using a geothermal energy.

## 1. 서 론

- $a$  : 일사의 흡수율
- $C$  : 비열 (J/kg·°C)
- $Ca$  : 구름량
- $J$  : 일사량 (W/m<sup>2</sup>)
- $Jn$  : 야간 복사량 (W/m<sup>2</sup>)
- $l$  : 일사의 잠열 변환율
- $t$  : 시간 (h)
- $Xa$  : 절대 습도 (kg/kg)
- $\square c$  : 지표면의 대류 열전달율 (W/m<sup>2</sup>·°C)
- $\epsilon$  : 지표면방사율
- $\theta$  : 온도 (°C)
- $\lambda$  : 열전도율 (W/m·°C)
- $\sigma$  : Stefan-Boltzmann 상수

-하부 첨자-

- $a$  : 대기
- $s$  : 흙 또는 지표면

## 1. 서 론

최근 인류의 환경과 에너지에 대한 관심이 커지는 가운데 세계의 여러 나라에서는 이산화탄소 배출량 절감을 위해 지열, 태양광, 풍력, 태양열 등의 신재생 에너지에 대한 사용비율을 높이기 위하여 투자와 기술개발에 많은 연구와 노력을 기울이고 있다.

신재생에너지 중에서 지열에너지는 재생에너지(Renewable Energy)로 고갈이 없는 친환경적인 에너지이다. 미국 EPA(Environmental Protection Agency) 보고서에 의하면 지열 원을 이용한 냉난방 시스템이 가장 에너지 효율적이고 친환경적이며 비용효율적인 공조 시스템(기존 공조시스템에 비해 25 ~ 50%의 적은 전력소비)이라고 하였다. 또한 지열 냉난방 시스템은 공기 열원 열펌프에 비해 44%까지 그리고 에어컨과 전열기에 비해 72%까지 에너지 소비를 절감할 수 있다고 밝혔다.<sup>1)</sup>

지열에너지(Geothermal Energy)는 정부가 제시하

H. M. Jeong(corresponding author) : Department of Energy and Mechanical Engineering, GyeongSang National University. E-mail : hmjeong@gnu.ac.kr, Tel : 055-646-4766  
Y. H. Shin, M. R. Tanshen, H. S. Chung : Department of Energy and Mechanical Engineering, GyeongSang National University.

고 있는 국가 에너지 기본계획의 비전과 목표를 달성하는데 크게 기여할 수 있는 신·재생에너지원 중의 하나이다. 특히 지열에너지는 거의 무한정한 자원으로 평가되고 있으며, 이미 미국이나 유럽의 일부 선진국에서는 지열 열펌프와 지열에너지를 이용한 지역난방(Geothermal District Heating)등을 포함하여 지열발전까지 다양한 분야에서 지열에너지를 적극적으로 이용하고 있다.

Rybach 등<sup>2)</sup>은 지열시스템의 장기 가동에 따른 지중 온도변화에 관한 연구, Katsura 등<sup>3)</sup>은 지중 열교환기에 의한 열간섭 영향 범위에 관한 연구, Hepbasli 등<sup>4)</sup>은 수직 밀폐형 지중열교환기를 이용한 지열원히트펌프 시스템의 성능 특성에 관한 연구, 정영만 등<sup>5)</sup>은 지중열전도측정과 열확산 특성에 관한 연구, 이상우 등<sup>6)</sup>은 지열교환기의 실측과 CFD결과에 대한 비교 연구를 수행하였다. 이처럼 지열에너지에 관한 성능향상 및 요소기술개발에 대한 관심도가 증가하고 있다. 또한, 정부의 저탄소녹색성장 정책에 따라 신재생에너지 이용에 대한 관심도가 높아지고 그에 따라 보급 활성화를 위한 제도적 장치가 마련되어 기술개발 및 보급이 활성화되고 있다.

지열을 이용하기 위해서는 지열에 대한 경계조건과 시간의 경과에 따른 지하깊이의 지중온도를 예측할 수 있어야 한다. 우리나라에서는 약 30개의 지점에서 지중온도를 측정하고 있으나 일개 도 단위에서 2~4개 정도만 측정하고 있다.

본 연구에서는 통영지역의 지중 2 m 깊이의 온도를 실측하고, 수치해석을 통해 구한 값과 비교하여 그 정확성을 검증하며, 지열 이용을 위한 기초자료를 도출하는데 그 목적이 있다.

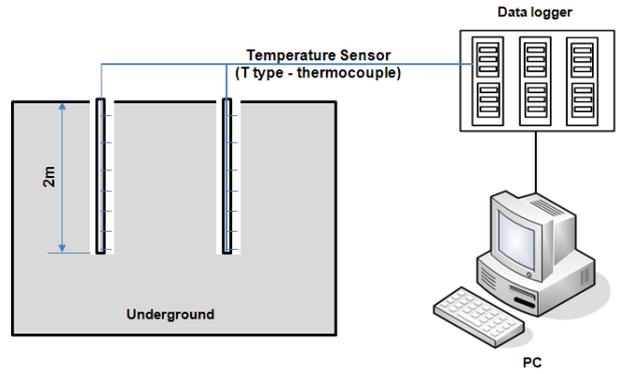
## 2. 지중온도 측정

### 2.1 실험 방법

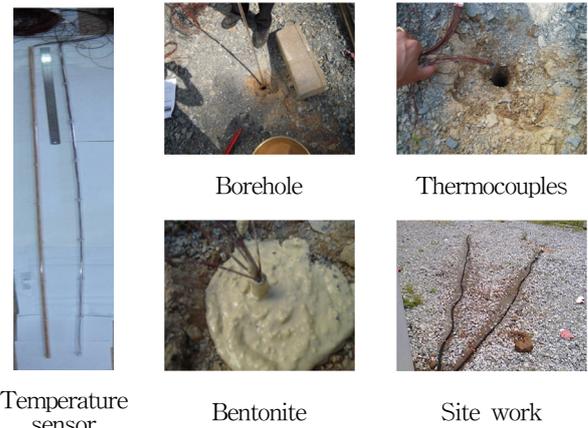
통영지역의 지중온도는 기상대에서 측정하지 않기 때문에 경상대학교 교내 조선기자재 센터 후면에 2 m 깊이의 단열성을 지닌 아크릴관을 매설하고 아크릴관 외부에 온도센서(Temperature T type)를 설치하여 지중온도를 측정하였다.

### 2.2 실험 장치 구성

통영지역의 지중온도를 측정하기 위해서 Fig. 1과 같은 형태로 실험 장치를 구성했다.



(a) Schematic diagram of Experiment system



(b) Photos of temperature sensors

Fig. 1 Experimental devices setup

데이터의 정확도를 위해 2개의 홀의 사용, 아크릴관과 천공 홀 사이의 빈 공간을 매우는 그라우팅 재료로써 벤토나이트와 실험지역의 흙을 각각 한 홀씩 이용하여 매립하였다. 두 홀의 간격은 2.5 m 이다.

지중온도의 측정은 0.5 m 간격으로 (4 point / hole) 측정하였고, T-type의 열전대를 사용하였으며 데이터로거를 사용, 측정된 값을 컴퓨터를 사용해 저장하였다. 또한, 실험지역의 대기 온도 측정을 위해 열전대를 대기에 노출 시켜 측정하였다. 측정 기간은 2010년 6월1일부터 2011년 5월31일까지, 1년 동안의 데이터를 수집 하였다.

## 3. 수치 해석

### 3.1 해석모델

Fig. 2는 지중온도를 계산하기 위한 모델 및 계산 격자와 매개체를 통해 저온의 냉열이 지중의 온도에 미치는 영향을 예측하기 위한 모델 및 계산 격자를 나타낸다. 모델의 크기는 30 m × 30 m이다.

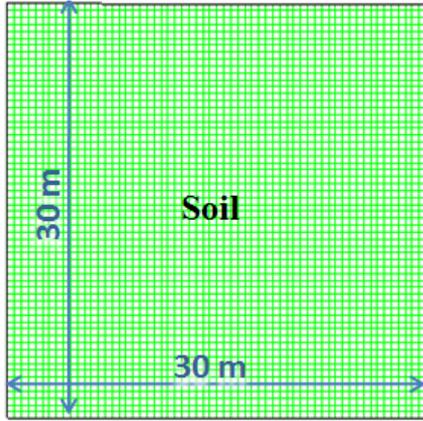


Fig. 2 Geometry and Grid system

### 3.2 기초 방정식

본 해석에서 지배방정식에 대한 수치 해석을 수행하기 위하여 상용프로그램인 Fluent 6.3을 사용하였으며, 온도와 시간에 관한 열전도 함수만 관여하므로, 지중에서의 열 이동은 다음의 2차원 비정상 열전도 방정식으로 표시 할 수 있다.

$$\rho C \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} \right) \quad (1)$$

식(1)을 차분법으로 이산화하여 각 격자상의 온도를 구한다. 또한, 시간에 대하여는 양해법을 이용하였으며, 본 연구에서는 지중의 온도의 일변동 혹은 연변동과 같은 긴 주기변화에 대한 것을 주 연구 대상으로 하기 때문에 수치계산의 시간 차분간격은 1시간으로 하였으며, 각 차분마다 잔차값이  $10^{-6}$  일때 까지 반복계산을 하였다. 또한 수치해석의 수렴 및 타당성을 위해서 총 17520개(2년간)의 Time step을 수행하였다.

### 3.3 경계조건

본 계산에서의 경계조건은 지표면을 제외한 밑면 및 측면은 단열 조건으로 하였다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial Z} = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0 \quad (2)$$

지표면의 온도에 관한 경계조건의 경우, 단순한 대기의 온도로는 불충분하며 일사량의 영향을 고려 할 필요가 있다. 그래서 일사의 영향을 온도로 환산한 값에 대기온도  $\theta_a$ 를 더하여 증가한 온도로서 다음과 같은 상당 외기온도  $\theta_{ae}$  (Equivalent air temperature)를 지표면의 경계온도로 한다<sup>7)</sup>.

$$\theta_{ae} = \theta_a + \frac{a(1-l)J - \epsilon J_n}{\alpha_c} \quad (3)$$

여기서  $J$ 는 일사량을 나타낸다. 기상청에서 측정하는 일사량은 태양과 법선방향의 직달 일사량 (Direct Normal Solar Radiation)이고, 본 계산모델에서의 지표면은 수평면이기 때문에 표준 기상자료로부터 수평면의 일사량을 분리하여 일사량  $J$ 로 한다. 야간 복사량  $J_n$ 은 다음 식을 이용한다.

$$J_n = \sigma T_a^4 \left( 0.49 - 2.1 \sqrt{\frac{X_a}{0.622 + X_a}} \right) \cdot (1 - 0.062 C_a) + (4\sigma T_a^3 (\theta_s - \theta_a)) \quad (4)$$

상기 식을 통해 구한 물리량을 시간에 따라 도표화 하여 지표면 경계 값으로 입력하였다. 흙의 물성치의 경우 아래 Table 1과 같이 모래, 모래+점토 그리고 점토질, 3가지 경우에 따른 해석을 수행하였다<sup>7)</sup>.

Table 1 Property of Soil (Ave.)

Case	Type	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	C <sub>p</sub> [j/kg-k]	Thermal conductivity [w/m-k]
1	Sand	1520	795.5	0.326
2	Sand+Clay	1450	2302.7	1.047
3	Clay	1860	1674.7	1.512

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 지중온도 측정 실험 결과

측정기간은 2010년 06월부터 2011년 06월까지, 일년 동안이며, 측정된 온도는 Fig. 3~4와 같다.

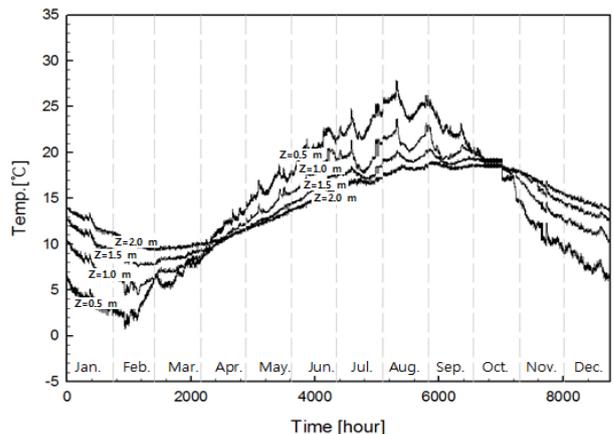


Fig. 3 Yearly temperature distribution in case of soil in experiment.

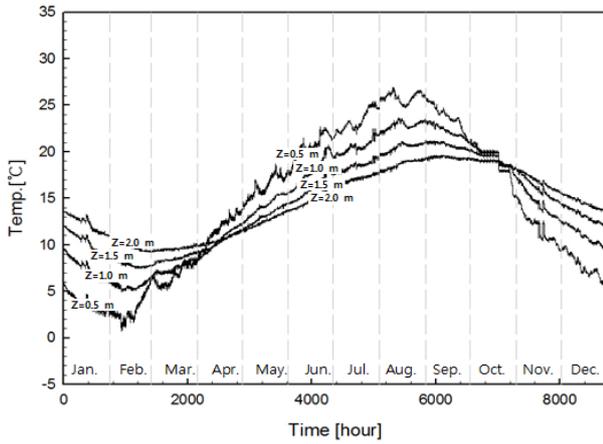


Fig. 4 Yearly temperature distribution in case of bentonite in experiment.

Fig. 3은 그라우팅 재료로써 실험지역 흙을 이용한 홀이며 Fig. 4는 벤토나이트를 이용한 홀에서 측정된 지중온도이다. 두 홀에서 측정된 온도 그래프는 매우 유사하며, 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, 2 m 깊이별 온도차를 확인 할 수 있다. 깊이의 최소(0.5 m)부터 최대(2 m)까지 최대·최소 온도 차이는 약 12°C이다.

두 조건에 따른 온도 그래프를 살펴보면, 그라우팅 재료로써 실측장소의 흙을 사용한 홀의 지중온도 그래프가 벤토나이트를 사용한 경우 보다 민감하게 요동치는 것을 확인 할 수 있다. 이는 흙의 경우 흙의 입자 사이로 빗물 및 표층수가 유입되어 여름철에는 증발, 겨울철에는 응결되는 현상으로 인해 온도의 변화가 급격해져 나타나는 현상으로 사료 된다. 따라서 빗물등의 외부환경이 혼합되지 않은 것으로 생각되는 벤토나이트 충전의 경우가 보다 지중온도의 정확한 실측으로 사료되어 해석적인 결과와의 비교는 이 벤토나이트의 경우에 한하여 비교 검토한다. 온도 그래프 중 상대적으로 낮은 구간(Feb.)은 겨울철이며, 높은 구간(Aug.)는 여름철이다.

#### 4.2 수치해석 결과 및 비교

수치 계산시의 대기 조건은 통영지방과 위도상의 위치가 유사하고 전형적인 해양성기후의 기상조건을 가진 부산지방의 기상데이터를 사용하였다. 3가지 흙의 물성치를 달리 하여 수치해석을 수행한 결과, 3가지 모든 조건에서 실측자료와 연중 유사한 온도 흐름을 보였으나, 지하 0.5 m의 낮은 깊이에서는 열 물성치에 따른 온도 변화의 차이가 크게 나타났다. 실측지역의 토양은 점토질의 성분이 다양 함유된 토질임으로 실측자료의 지질성분과 유사한 case 2의 조건을 실측자료와 비교 대상으로 선정하였다.

Fig. 5~8은 본 수치계산법에 의한 계산결과와 실측자료의 비교 그래프로써, 지하 깊이가 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m 지점의 연중 지중온도 변화를 비교하여 나타낸 것이다. 연중, 한 시간 단위의 자료로써 수집되는 실측 데이터의 방대한 양은 도식화하여 비교 시 식별의 어려움이 있어 데이터를 추출하여 비교 하였다. 깊이별로 비교한 Fig. 5~8에서 알 수 있듯이 지중온도는 지하 깊이가 깊어질수록 연변화의 진폭이 작아지고 위상도 늦어지는 것을 알 수 있다.

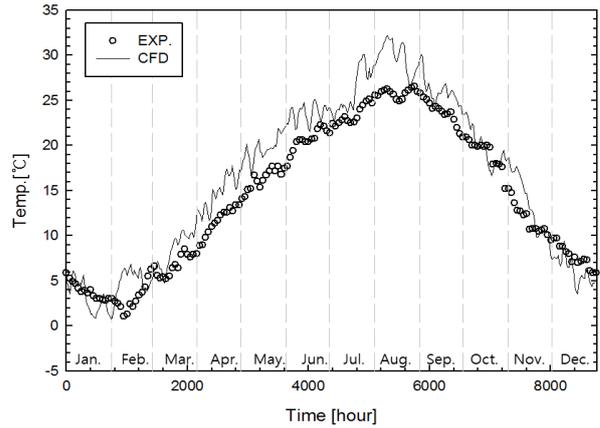


Fig. 5 Yearly temperature distribution at z=0.5

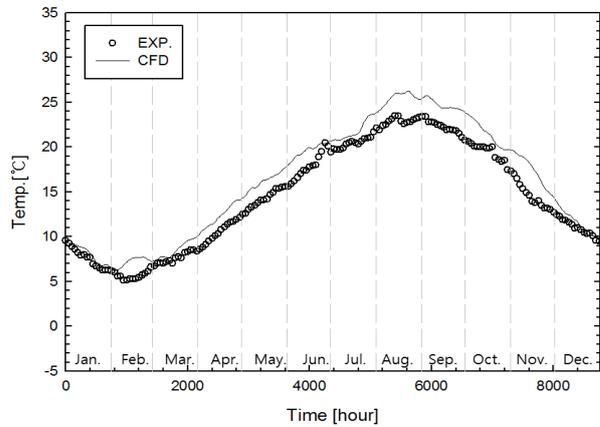


Fig. 6 Yearly temperature distribution at z=1.0

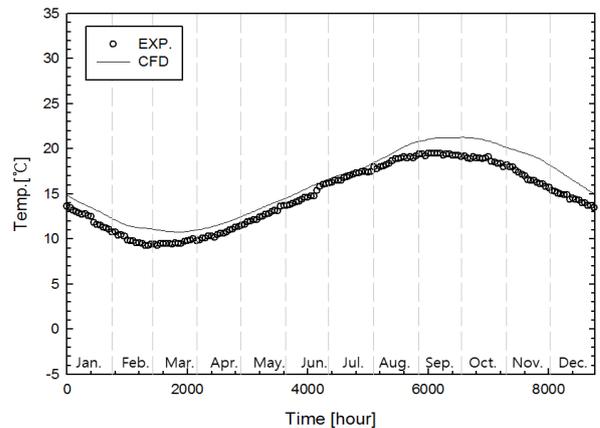


Fig. 7 Yearly temperature distribution at z=2.0

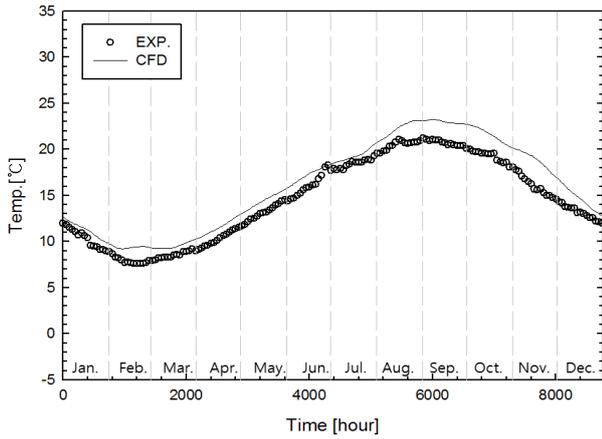


Fig. 8 Yearly temperature distribution at  $z=1.5$

또한 대기온도와 일사의 일변동에 의한 지중온도의 변동은 지하 0.5 m 이내의 지점에서는 그 영향이 뚜렷하지만 지하 1 m 이상의 깊이가 되면 거의 일변동의 영향을 받지 않는 것을 나타내고 있다. 이것은 실측과 수치해석의 결과 값, 모두에서 확인 할 수 있다.

이는 흙이라는 열매체의 특성이 큰 축열성 및 단열성을 가지고 있고, 이 영향도 지하로 갈수록 커짐을 말해 준다. 또한 지중온도에 관한 수치모델과정에서 열물성치는 지중온도에 상당한 영향을 행하는 것을 확인할 수 있으며, 지질의 성질에 따른 적절한 열물성치를 선정하여야 한다. 실측 지중온도의 여름철(8월1일)과 겨울철(2월1일)의 각각 낮 12시 시점을 기준으로 수치해석자료와 비교분석 하였다.

Fig. 9는 여름철(8월1일12시) 시점의 실측 및 수치해석에 따른 지중온도분포를 나타낸다. 두 그래프의 값은 상당히 일치함을 보이나, 0.5 m 지점에서는 값의 차이가 난다.

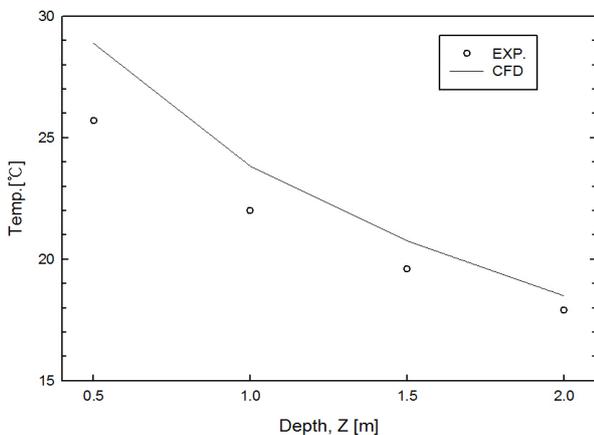


Fig. 9 Comparison of CFD and experiment in a underground temperature.(summer season)

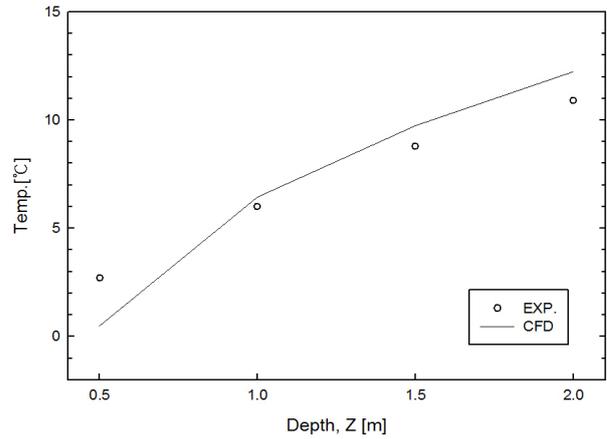


Fig. 10 Comparison of CFD and experiment in a underground temperature.(winter season)

지하 0.5 m의 경우 대기의 조건, 즉 온도, 습도, 일사량 그리고 구름량 등에 의해 일일마다 직접적인 영향을 받게 됨으로 이와 같은 차이가 난다고 사료된다.

여름철의 경우, 각 지점 온도 값의 크기는  $0.5\text{ m} > 1.0\text{ m} > 1.5\text{ m} > 2.0\text{ m}$  순으로 나타난다. 지면에서 가까운 지점은 대기의 높은 온도 및 일사량 등에 영향을 받아 온도가 다소 높다.

Fig. 10은 겨울철(2월1일12시) 시점의 실측 및 수치해석에 따른 지중온도분포를 나타낸다. 두 그래프의 값은 매우 일치하며, 겨울철의 경우 각 지점 온도 값의 크기는  $2.0\text{ m} > 1.5\text{ m} > 1.0\text{ m} > 0.5\text{ m}$  순으로 나타난다. 지면에서 가까운 지점은 대기의 낮은 온도 및 일사량 등에 영향을 받아 온도가 다소 낮은 반면, 2 m의 지점은 지열 및 비 축열로 인해 약  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 높은 값을 나타낸다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 시간의 경과와 지하깊이에 따른 지중온도의 변화 및 분포에 대하여 연구했다. 그 결과 다음과 같은 결론을 도출 할 수 있다.

1. 지하 1m 이하 지표면 근처의 지하 공간은 대기의 일변동 영향이 크게 작용하지만, 그 이상에서는 연변화의 진폭도 작아지고 온도 변화 주기의 위상이 늦어진다.
2. 지중온도 실험 자료와 비교해서 수치 해석적 지중온도의 그래프는 전체적으로 상당히 일치하고 있음을 알 수 있다.

3. 수치해석 시 초기조건 및 경계조건으로써 그 지역의 대기온도 및 일사량, 흙의 열물성치 등에 대한 자료를 충분히 알 수 있다면 명확한 데이터를 얻을 수 있으리라 사료되며, 이 부분에 대한 정확한 자료의 분석이 요구된다.

### 후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.2011-0021376)이며 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. U.S. Environmental Protection Agency, 1996, Space Conditioning : The Next Frontier - The Potential of Advanced Residential Space Heating Technologies for Reduction Pollution and Saving Customers Money.
2. Rybach, L., Eugster, W. J., Hopkirk, R. J., and Kaelin, B., 1992, "Borehole heat exchangers: Long-term operational characteristics of a decentral geothermal heating system", Geothermics, Vol. 21, pp. 864-867.
3. Karsura, T., Nagano, K., Takeda, S., 2008, "Method of calculation of the ground temperature for multiple ground heat exchangers", Applied Thermal Engineering, Vol. 28, pp. 1995-2004.
4. Hepbasli, A., Akdemir, O., Hancioglu, E., 2003, "Experimental study of a closed loop vertical ground source heat pump system", Energy Conversion and Management, Vol. 44, pp. 527-548.
5. Y. M. Jeong et al., 2008, "Measurement of Ground Thermal Conductivity and Characteristics of Thermal Diffusion by the Ground Heat Exchanger" Journal of Society of Air conditioning and refrigerating Engineers of Korea, Vol. 20, No. 11, pp. 739-745.
6. W. S. Woo, J. H. Kim, S. H. Shin and G. I. Hwang, 2007, "The Comparison of the EWT&LWT between Field Measurement and CFD of Vertical-type Geothermal Heat Exchanger", Journal of Korea Society of Geothermal Energy Engineers Vol. 3, No. 1, pp. 11-16.
7. H. M. Jeong and H. S. Chung, 1998, "A Study on the Yearly Thermal Environmental Characteristics in Underground Space", Journal of Korea society for Power System Engineering, Vol. 2, No. 3, pp. 27-33.
8. ASHRAE, ASHRAE Fundamentals, ASHRAE, 1993.