

## 창원지역의 지중온도 예측에 관한 연구

### The Study on the Prediction of Underground Temperature in Changwon District

조성우(Sung Woo Cho)<sup>1</sup>, 임병찬(Pyeong Chan Ihm)<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>창원대학교 건축공학과, <sup>2</sup>동아대학교 건축공학과

<sup>1</sup>Department of Architectural Engineering, ChangWon University, Gyeongnam, 641-773, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Architectural Engineering, Dong-A University, Busan, 604-714, Republic of Korea

(Received October 4, 2013; revision received December 19, 2013; Accepted: January 8, 2014)

**Abstract** For an analysis of the horizontal-type geothermal heat exchanger system, an understanding of the ground temperature distributions is required in order to predict system performance. Because it is difficult to decide on the underground temperature due to the adjustment of its temperature cycle, numerous calculations are required in order to decide on the temperature cycle. In this paper, Buggs formula is utilized to decide a phase shift for outdoor temperature and ground surface temperature, which are obtained from Korea Meteorological Administration. Overall, the underground temperature distribution in the Changwon region is predicted as 10.5°C ~ 20.3°C at a depth of 3 m.

**Key words** Underground temperature(지중온도), Phase(위상), Amplitude(진폭)

\* Corresponding author, E-mail: ihmp@dau.ac.kr

#### 기호설명

- $A_s$  : 연간 공기 온도 진폭(월평균 기온을 큰 거로 함) [°C]  
 $K_v$  : 토양의 초목계수  
 $t$  : 시간 [day]  
 $T$  : 온도 [°C]  
 $T_m$  : 연간 평균 외기온도 [°C]  
 $\Delta T_m$  : 토양온도차이 [°C]  
 $x$  : 깊이 [m]

#### 그리스 문자

- $a$  : 열확산계수 [ $m^2/s$ ]  
 $\phi$  : 위상보정 [rad]

#### 1. 서 론

지열시스템의 대부분은 지열히트펌프(geothermal heat pump)와 병행되어 활용되거나 활용중인 반면, 실내에서 발생하는 열을 제거하기 위한 환기목적의 지중열 이용은 매우 드물다.

지중열과의 열교환을 통하여 외기온도보다 낮은(또는 높은)온도 공기를 공급하는 쿨튜브(Cool tube) 또는 지하피트(Earth tube)방식은 중동 및 유럽지역에서는

오래전부터 활용되었다. 그러나 국내에서는 D사와 한국에너지기술연구원에서 설치된 경우가 있지만, 지열히트펌프와 달리 시공된 예를 찾아보기가 힘든 것이 현실이다.

환기목적의 수평형 열교환 시스템은 수직형과 비교하여 매설깊이가 얇은 지점에 매설됨에 따라 수직형과 비교하여 연중 지중 온도 변화폭이 크다는 특징이 있다. 그러므로 보다 정확한 수평형 열교환 시스템의 성능 파악을 위해서는 최고 및 최저온도의 발생 시점이 중요하며, 이는 성능과 직접적인 연관성을 가질 것으로 판단된다.

국내에서는 지하 매설관에 대한 성능 파악을 위하여 지중온도를 예측하고자 하였으며, Lee<sup>(1)</sup>는 Design Day를 활용하여 대상지역에 대한 지중온도를 계산하였고, Lee et al.<sup>(2)</sup>은 쿨튜브에 대한 환경의 최적치를 도출하기 위하여 부산기상청에서 제공하는 통계자료를 활용하였다. Sohn<sup>(3)</sup>은 기상청에서 제공하는 온도 테이터를 근거로 토양의 열확산계수를 산정을 위하여 진폭과 위상방정식을 적용하였으며, 이 경우 적용한 열확산계수의 범위는  $2.5723 \times 10^{-7} \sim 9.5225 \times 10^{-7} m^2/s$  범위에 속한다고 보고하고 있다.

그리고 국외에서도 지중온도 예측을 목적으로 다양한 연구가 수행되고 있으며, Mihalakakou et al.<sup>(4)</sup>은 공기와 지표면과의 대류열교환, 지표면에 흡수되는 태양복사에

너지, 지표면에서 발생하는 증발로 야기되는 잠열이동과 지표면 반사에 의하여 발생하는 장파장을 고려한 열평형식을 도출하여 지표면 온도를 예측하였으며, Popiel et al.<sup>(5)</sup>은 2년간 열전대를 사용하여 직접 지중온도를 측정하여 깊이 1 m 지점까지는 온도변화가 작다는 점을 발견하였으며, 그 결과를 Buggs의 실험식과 비교한 연구를 수행하였다.

향후 지중깊이 3 m 이상의 지점에 매설예정인 수평형 지중열교환 장치에 대한 성능을 파악하기 위해서는 대상지역에 대한 지중온도를 조사할 필요가 있다. 그러나 대상지역인 창원지역의 경우 기상청에서 지중온도를 제공하고 있지 않으므로, 창원지역과 가까운 부산지역을 대상으로 실험식<sup>(6)</sup>을 적용시킨 결과를 검토한 후, 창원지역의 외기 및 지표면 온도를 근거로 지중온도를 예측하고자 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 국내 기상청에서 제공되고 있는 외기온도와 지표면 온도를 근거로 Buggs의 실험식과 부산지역 지중 매설 깊이에 따른 온도주기곡선과 비교 검토하여 지중온도의 위상을 분석한 후 창원지역의 지중온도 예측에 적용시키고자 한다.

## 2. 지중온도 예측을 위한 실험식

지중온도는 지표면 근처에서 외기 영향에 크게 좌우되며, 땅속 깊이가 깊을수록 외기 환경 및 시간지연(Time lag)으로 인하여 파장 형태가 변화되는 경우가 발생한다. 따라서 지중온도를 예측하기 위해서는 토양에 대한 다양한 물리적 및 열적특성을 파악할 필요가 있으며, Yang et al.<sup>(6)</sup>은 지중의 열전도율 분포가 1.58 ~ 5.93 W/mK로 변화폭 및 열확산계수의 변화폭<sup>(3)</sup>이 크다고 보고하고 있다. 그러므로 보다 정확한 예측을 위해서는 실측치와 비교한 실험식을 활용하는 것이 타당하다고 판단되며, 본 연구에서는 “식(1)”과 같이 Buggs 식을 활용하고자 하였으며, 초목계수는 “식(2)”<sup>(7)</sup>를 적용하였다.

$$T(x, t) = (T_m \pm \Delta T_m) - 1.07k_v A_s \exp(-0.00031552x\alpha^{-0.5}) \times \cos\left(\frac{2\pi}{365}t\right) \quad (1)$$

여기서

$$Kv = A+B \times \text{EXP}(-0.5 \times (t-C)/D)^E \quad (2)$$

$A = 1.2057, B = 0.24046, C = 228.91,$   
 $D = 75.714, E = 3.0676$   
 열확산계수  $a$ : 부산, 창원지역 =  $5.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$   
                   서울 =  $7.8 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$   
 $As$ : 부산 =  $11.3^\circ\text{C}$ , 창원 =  $12.9^\circ\text{C}$ , 서울 =  $15.7^\circ\text{C}$   
 $\Delta T_m$ : 부산 =  $0.6^\circ\text{C}$ , 창원 =  $1.1^\circ\text{C}$ , 서울 =  $1.7^\circ\text{C}$

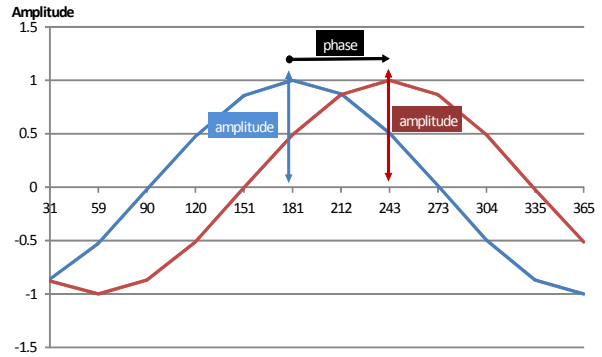


Fig. 1 Phase shift for adjust Temperature periods.

“식(1)”에서 토양온도차이( $\Delta T_m$ )는 대상기간 동안의 평균외기온도와 평균 지표면 온도와 차이 의미한다. “식(2)”의 A~E 상수값은 Buggs가 실험을 통하여 제안한 초목계수( $Kv$ )로서 일사량이 많은 시기에 대한 초목계수값을 포함하고 있으므로 이를 활용하였다. “식(1)”의 우측 3항은 온도변화에 대한 주기를 나타내고 있으며, Fig. 1과 같은 양상을 보이는 온도변화에서 기준값 보정을 위하여 위상보정이 필요하다. 이를 위하여 위상보정계수를 도입하였으며, 이에 따라 “식(1)”을 “식(3)”과 같이 나타낼 수 있다.

$$T(x, t) = (T_m \pm \Delta T_m) - 1.07k_v A_s \exp(-0.00031552x\alpha^{-0.5}) \times \cos\left[\frac{2\pi}{365}(t) \pm \phi\right] \quad (3)$$

위상보정은 시뮬레이션 결과값과 실측값과의 비교를 통하여 구할 수 있으나, 많은 반복 계산으로 인하여 번거로움이 발생할 수 있다.

이를 해결하기 위하여 본 연구에서는 국내 기상청에서 기본적으로 제공되고 있는 요소 즉 외기온도와 표면 온도를 근거로 위상이동을 분석 조사하여 이를 Buggs 실험식에 적용시켜 부산지역에 대한 지중온도 분포와 비교 검토하고자 한다.

## 3. 실험식과 부산지역 지중온도 비교 검토

### 3.1 부산지역 기상데이터 분석

부산지역에 대한 기상데이터와 실험식의 결과를 비교하기 위하여 먼저 부산지역 기상청으로부터 2000년부터 2003년까지 4년간 평균 외기온도와 지중깊이별 온도분포에 대한 데이터를 수집하여 정리한 결과는 Fig. 2와 같다. 평균 외기온도는  $15.7^\circ\text{C}$ , 평균 최고온도

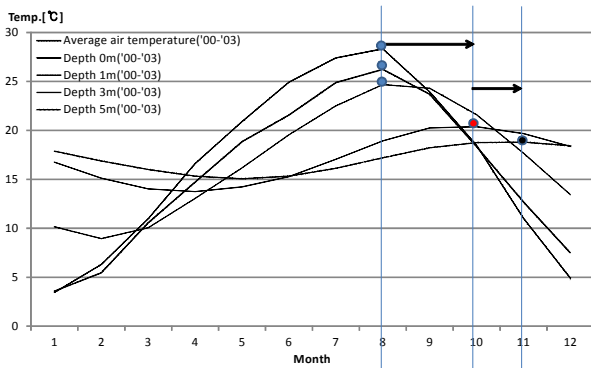


Fig. 2 The change of ground temperature by ground depth.

는 8월로 26.2°C이고, 평균 최저온도는 1월로 3.6°C이며, 평균 최고 표면온도는 28.3°C, 8월에 나타났다.

지중온도 주기곡선인 Fig. 2에서 주기곡선 형태는 외기온도와 지중깊이 1 m 지점까지는 비슷한 형태이고, 이는 Popiel et al.<sup>(5)</sup>이 2년 동안 실측한 결과인 깊이 1 m 지점까지는 위상변화가 나타나지 않는다는 점과 일치함을 알 수 있다. 또한, 외기온도와 지중깊이 1 m 지점까지의 최고온도는 동일시기에 나타남에 따라 외기조건과 깊은 관계를 가지는 것으로 판단할 수 있다.

그러나 지중깊이 1 m를 초과하는 지점에서는 토양의 열용량에 따른 시간지연으로 인하여 최고온도 발생 시기가 3 m 지점은 10월, 5 m 지점은 11월로 이동하여 발생하는 것을 알 수 있다. 그러므로 지중깊이 3 m와 5 m 지점의 지중온도를 예측하기 위해서는 시간지연을 고려한 위상보정이 필요하다고 판단된다.

### 3.2 실험식 결과와 비교 검토

대상지역에 대하여 2000년~2003년까지 기상청에서 제공된 지중온도와 실험식 결과 비교를 위하여, 지표면에 대한 위상보정을 하지 않은 실험식 결과값과 실측치 비교는 Fig. 3과 같다(이하 범례에서 실측치는 M, 실험식은 E로 나타낸다).

지표면온도에 대한 실측값에 대한 곡선과 “식(1)”을 활용하여 구한 결과값에 대한 곡선의 형태는 비슷한 양상을 보이고 있으나, 최고점의 위상이 각각 다른 시기에 나타남을 알 수 있다.

이에 대한 보정은 실측치와 “식(1)”의 결과값과의 위상차이가 Fig. 3에서 보듯이 60일이므로, 이에 대한 라디안값을 “식(3)”에 적용하여 위상보정을 수행하였으며, 그 결과값은 Fig. 4와 같다.

위상보정으로 인하여 최고온도는 외기온도와 동일한 시기인 8월에 나타남을 볼 수 있고, “식(3)”을 활용하여 구한 지중온도에 대한 온도주기 곡선의 양상은

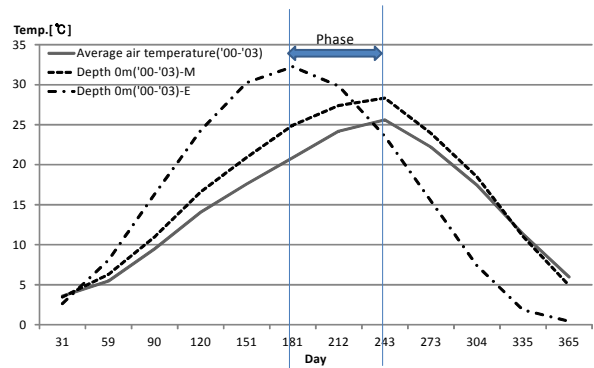


Fig. 3 Comparison between surface temperature measured results and simulation results.

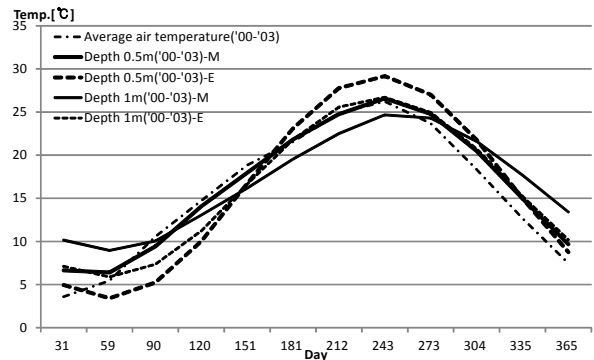


Fig. 4 The result of phase correction on underground temperature by depth.

Fig. 4의 실측값과 비슷한 양상을 보이고 있으므로 “식(3)”을 활용하여 지중온도를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

실측값과 “식(3)”의 결과값에 대하여 지중깊이 1 m 지점까지의 최고 온도를 살펴보면, 지중깊이 0.5 m 지점은 각각 26.6°C, 29.2°C, 지중깊이 1 m 지점은 각각 24.7°C, 26.7°C로 그 차이가 2.7°C, 2.0°C로 다소 크게 나타났으나, 깊이가 깊어질수록 그 차이는 줄어드는 것을 알 수 있다.

지중깊이 3 m 지점은 지표면에서 지중깊이 1 m 지점과 달리 시간지연으로 인하여 Fig. 2와 같이 60일이 지난 10월에 최고온도를 나타내고 있다.

위상보정은 지표면에서 지중깊이 1 m 지점에 적용시킨 위상보정 60일과 최고온도가 10월로 지연됨에 따른 위상보정 60일과의 합인 120일을 적용시킨 월별 지중온도분포는 Fig. 5와 같다.

실측값과 비교해보면, 지중깊이 3 m 지점에서 최고점 온도는 20.4°C, 결과값은 20.6°C로 그 차이가 0.2°C로 작게 나타났다. 4년간 평균온도는 실측값이 16.98°C, 결과값은 16.3°C로 그 차이는 0.68°C를 보이고 있으며,

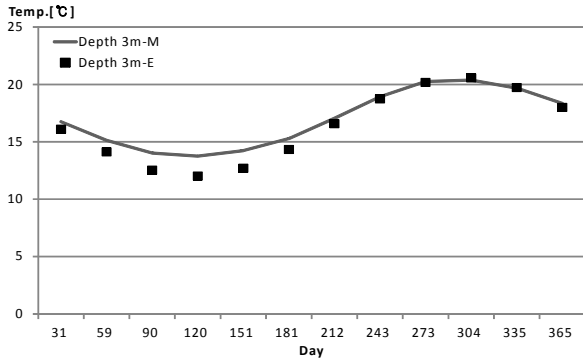


Fig. 5 The result of phase correction on underground temperature at 3 m depth.

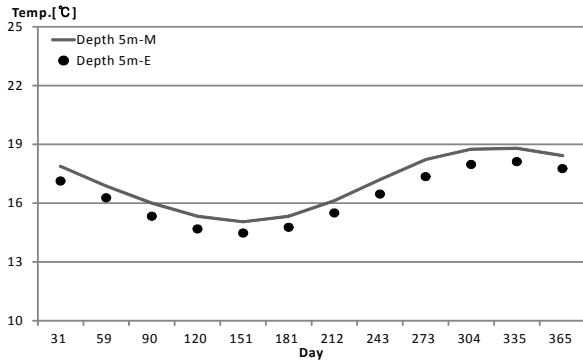


Fig. 6 The result of phase correction on underground temperature at 5 m depth.

전체적인 패턴 또한 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 지중깊이 5 m 지점은 Fig. 2에서 보듯이 시간지연으로 인하여 지중깊이 3 m 지점보다 30일 지연된 11월에 최고온도를 보여주고 있다.

위상보정은 지중온도 3 m 지점까지의 위상보정인 120일과 최고온도가 11월로 지연됨에 따른 위상보정 30일을 합한 150일에 대한 라디안값을 적용시켰으며, 그 결과는 Fig. 6과 같이 나타났다.

실측치와 결과값에 대한 지중온도주기곡선의 형태는 비슷한 유형을 보이고 있으며, 최고온도는 11월이고, 각각 18.8°C와 18.1°C이고, 4년간 평균온도는 각각 17.0°C, 16.3°C로 그 차이는 0.7°C로 잘 일치하는 것으로 나타났다.

본 논문에서 적용한 “식(3)”에 대한 타당성을 조사하기 위하여 부산과 달리 중부지방에 속하는 서울지역을 대상으로 동일한 방법으로 2010년~2012년 3년간 데이터를 토대로 지중깊이 3 m, 5 m 지점의 월별 평균온도를 실측값과 비교한 결과는 Fig. 7과 같으며, 이 기간 평균외기온도는 12.1°C이다. 최고온도에 대한 “식(3)” 결과값과의 위상 차이는 Fig. 7(사각형으로 둘러

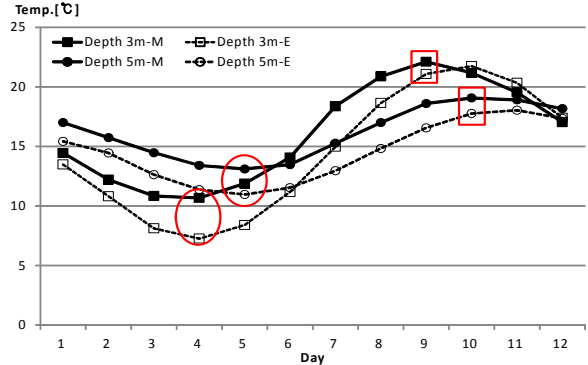


Fig. 7 The result of underground temperature at 3, 5 m depth in Seoul.

러싸인 부분)과 같이 차이를 보이고 있으나, 최저온도에 대한 위상 차이(Fig. 7의 타원으로 둘러싸인 부분)는 동일한 것을 볼 수 있다. 그리고 최고온도에 대한 실측값과 결과값의 차이를 살펴보면, 3 m 지점에서는 1.0°C, 5 m 지점에서는 1.3°C로 어느 정도 일치하는 것으로 볼 수 있으므로, “식(3)”을 이용하여 대상지역에 대한 깊이별 지중온도를 간단하게 구할 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 두 지역의 지중온도에 대한 예측결과, 위 상보정을 통한 전체적인 온도주기 곡선이 비슷한 양상을 보이고 있다. 그러므로 기상청에서 제공하는 외기온도 및 지표면온도를 근거로 한 지중온도예측은 타당하다고 볼 수 있다.

#### 4. 창원지역의 지중온도분포 예측

##### 4.1 창원지역의 기상데이터 분석

기상청으로부터 지중온도 데이터가 제공되지 않는 창원지역 지중온도 분포를 예측하기 위하여 두 지역에 적용시킨 “식(3)”과 위상보정을 통하여 검토한 결과가 타당하다고 판단됨에 따라, 창원지역에 대한 지중온도 분포는 제 3장에서 제안한 방법을 적용시켜 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

창원지역의 2010년~2012년 3년 동안 외기온도 및 지표면 온도분포는 Fig. 8과 같다. 3년간 평균외기온도와 지표면온도의 최고점은 동일시기인 8월에 발생함을 볼 수 있다. “식(1)”을 이용하여 구한 지표면온도와 실측값과의 위상은 60일의 차이를 보이고 있으므로, 이를 위상 보정한 “식(3)” 결과값과 실측값에 대한 온도주기곡선은 Fig. 8에서 보듯이 비슷한 양상을 보임을 알 수 있다.

또한, 부산과 창원지역 지표면의 최고와 최저온도

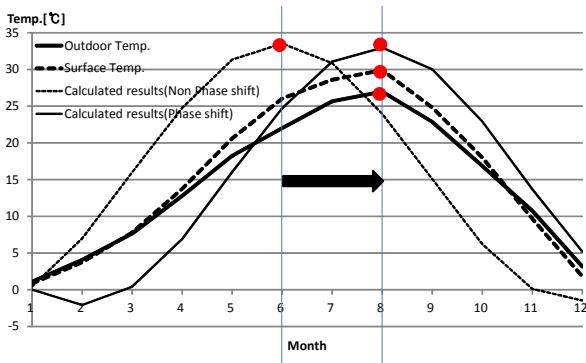


Fig. 8 The distribution of outdoor temperature and surface temperature in Changwon.

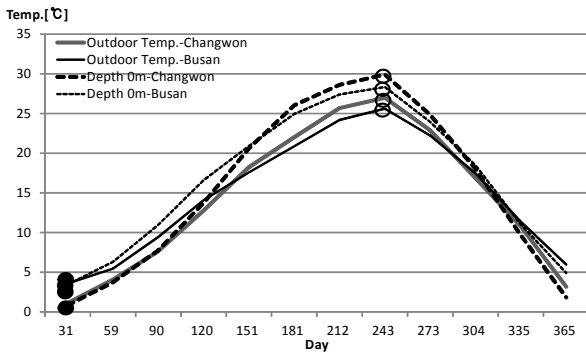


Fig. 9 Comparison between outdoor temperature and surface temperature of two region.

차이는 각각 28.3℃, 29.9℃로 차이를 보이고 있으며, 외기와 지표면 온도에 대한 부산과 창원지역의 온도곡선분포는 Fig. 9와 같다.

지리적으로 가까운 두 지역에서의 최고점온도와 최저점온도는 동일시기에 발생하였고, 온도주기곡선의 분포형태는 비슷한 양상을 가지는 것을 볼 수 있다. 이에 따라 창원지역에 대한 지중온도는 부산지역에서 나타난 지중깊이에 대한 위상보정을 활용하여 지중깊이 3 m 지점과 5 m 지점에 대한 연중 온도분포를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4.2 창원지역의 지중온도예측

Fig. 2에서 부산지역의 외기와 지표면 최고 온도는 각각 26.2℃와 28.3℃로 지표면 온도가 높게 나타났고, Fig. 8에서 보듯이 창원지역의 외기온도는 27.0℃, 지표면온도는 29.9℃로 부산지역과 동일한 패턴을 가지는 것으로 나타났다.

부산과 창원지역의 실측치인 지표면에 대한 평균 온도는 각각 16.4℃와 15.5℃로 1.0℃정도 창원지역이 낮

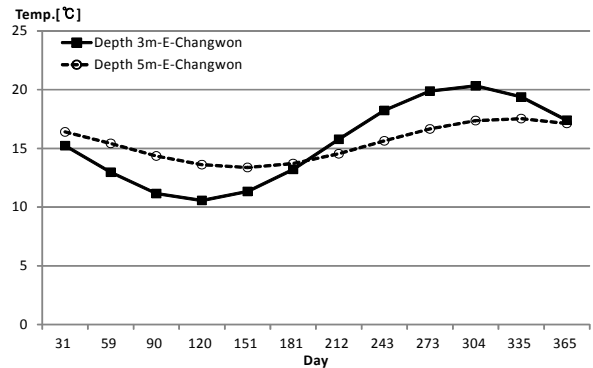


Fig. 10 Prediction of underground temperature distribution at depth 3, 5 m by Eq.(2).

Table 1 Underground temperature distribution in Changwon

(Unit : °C)

Depth	(Unit : °C)					
Day \ Depth	0 m	0.1 m	0.5 m	1.0 m	3.0 m	5.0 m
31	0.01	0.65	2.97	5.36	15.23	16.41
59	-2.07	-1.34	1.29	4.01	12.97	15.42
90	0.41	1.03	3.29	5.62	11.16	14.35
120	6.91	7.27	8.55	9.88	10.57	13.61
151	16.02	15.0	15.91	15.82	11.34	13.37
181	24.70	24.32	22.93	21.50	13.21	13.70
212	31.05	30.40	28.07	25.65	15.77	14.55
243	32.95	32.22	29.60	26.89	18.24	15.64
273	30.02	29.42	27.23	24.98	19.88	16.66
304	22.92	22.61	21.49	20.33	20.33	17.37
335	13.68	13.76	14.02	14.30	19.38	17.53
365	5.20	5.63	7.18	8.76	17.40	17.13

게 나타났다. 이를 근거로 지중에서의 열이동은 표면 온도를 시작점으로 전도현상에 따라 지중온도의 변화가 발생하므로, 창원지역의 지중온도는 부산지역보다 다소 낮을 것으로 예측할 수 있다. 최고온도의 위상이 다른 시기에 발생하는 3 m 지점과 5 m 지점에 대하여 각각 120일과 150일의 위상을 적용시켜 지중온도 분포를 예측한 결과는 Fig. 10과 같이 나타났다. 120일의 위상을 가진 지중깊이 3 m 지점에서의 연중 온도분포는 10.6℃~20.3℃이며, 진폭은 4.8℃이며, 지중깊이 5 m 지점에서의 연중 온도분포는 13.4℃~17.5℃이며, 진폭은 2.1℃로 나타났으며, 대상지역에 대한 월별 온도분포는 Table 1과 같다. 이에 따르면, 지중깊이가 깊어질수록 온도진폭은 점차적으로 줄어드는 것으로 판단된다.

본 논문을 토대로 수평형 열교환기를 지중깊이 3 m



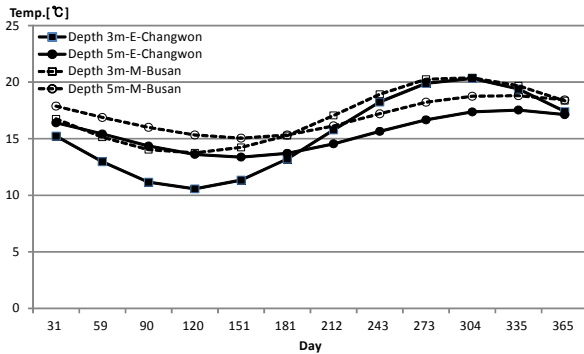


Fig. 11 Underground temperature comparison between simulation result of Changwon region and measurement result of Busan region.

이상 지점에 매설하여, 이에 대한 열교환성을 파악하고자 함에 따라 창원지역의 지중깊이 3 m, 5 m 지점의 지중온도 분포는 매우 중요한 요소이다. 이에 대한 타당성을 파악하기 위하여 실측값인 부산지역의 온도 분포 곡선과 비교하였으며, 그 결과는 Fig. 11과 같이 나타났다.

창원지역의 지중깊이 3 m와 5 m 지점에 대한 지중온도분포 곡선을 살펴보면, 부산지역의 3 m와 5 m 지점의 실측치에 대한 지중온도 분포 곡선과 유사한 형태를 보이고 있다. 또한 창원지역의 3 m 지점과 5 m 지점에서의 온도진폭은 각각 4.8°C, 2.1°C이고, 부산지역의 동일지점의 실측치에 대한 온도진폭은 각각 3.3°C와 1.9°C로 그 차이가 작은 것으로 나타남에 따라 제 3장에서 제안한 방법으로 창원지역에 대한 지중깊이에 따른 온도분포 예측은 어느 정도 타당하다고 판단된다.

## 5. 결 론

기상청 제공 외기온도 및 표면온도와 실험식을 근거로 한 위상보정을 통하여 창원지역에 대한 지중온도를 예측한 결과는 아래와 같다.

(1) Buggs 식을 활용하여 부산지역에 대한 외기 및 표면온도를 근거로 한 위상보정을 통한 실험식 결과값과 실측값을 비교해보면, 최고온도 발생 시기는 동일한 시점에 나타났고, 각 지점에 대한 평균온도 범위가 0.19°C ~ 0.72°C로 나타남에 따라 위상보정을 통하여 지중온도를 예측하는 것은 타당하다고 할 수 있다.

(2) 지중깊이 3 m와 5 m 지점에 대한 창원지역에 대한 실험식 결과값과 부산지역의 실측값에 대한 온도주기곡선은 비슷한 유형을 보이고 있고, 최고 및 최저온도의 발생시기가 동일시기에 발생하고, 지중깊이가 깊어질수록 온도 진폭이 줄어드는 현상을 보이고 있으므로 창원지역에 대한 지중온도 예측은 타당하다고 판단

된다.

(3) 창원지역에 대한 지표면온도에서의 실측값과 “식(3)”의 결과값에 대한 평균온도차이는 0.31°C로 그 차이가 작게 나타났다. 이를 토대로 향후 실험을 위한 매설깊이인 지중 3 m 지점과 5 m 지점에서의 온도분포는 각각 10.6°C ~ 20.3°C, 13.4°C ~ 17.5°C로 예측할 수 있다.

(4) 지중온도 예측을 위한 위상보정을 보다 쉽고 간편하게 하기 위해서 외기 및 지표면온도를 근거로 하였으며, 그 결과 최고 및 최저점 온도의 발생 시기 일치와 진폭에서 큰 차이를 나타내지 않고 있으므로, 이를 활용하여 지중온도를 예측하는 것은 가능하다고 판단된다.

## 후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업지원을 받아 수행된 연구임(2011-0023370).

## Reference

1. Lee, K. H., 2012, The effect of an earth tube system on cooling and heating loads in residential buildings under korean climatic conditions, AIJ, Vol. 26, No. 8, pp. 281-288.
2. Lee, Y. G. and Yoon, J. H., 2001, Optimal system design method for a building application of cool tube system, AIJ, Vol. 17, No. 6, pp. 177-186.
3. Sohn, B. H., 2011, Evaluation of ground temperature and soil thermal diffusivity using the soil temperature data of KMA, Korean Society of Geothermal Energy Engineers, Vol. 7, No. 1, pp. 1-9.
4. Mihalakakou, G., Santamouris, M., Lewis, J. O. D., and Asimakopoulos, N., 1997, On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles, Solar Energy, Vol. 60, No. 3, pp. 181-190.
5. Popiel, C. O., Wojtkowiak, J., and Biernacka, B., 2001, Measurements of temperature distribution in ground, Experimental thermal and Fluid Science, Vol. 25, pp. 301-309.
6. Yang, Y. S. and Park, J. I., 2013, Analysis of design in geothermal system, SAREK Proceeding, pp. 865-868.
7. Popiel, C. O. and Wojtkowiak, J., 2013, Temperature distribution of ground in the urban region of Poznan city, Experimental thermal and Fluid Science, Vol. 51, pp. 135-148.