

## 지중 파이프에 의한 지중열교환 이용 기술

### Utilization of Underground Heat through Underground-Air-Pipe

장 문 석

M. S. Jang

한국에너지기술연구소  
건축환경연구팀



· 1957년생  
· IAQ에너지절약, 공기조화 설비 등에 관심을 가지고 있다.

박 효 순

H. S. Park

한국에너지기술연구소  
건축환경연구팀



· 1951년생  
· 건물에너지절약, 단열, 개 보수, 자연냉난방시스템 등에 관심을 가지고 있다.

우 정 선

J. S. Woo

한국에너지기술연구소  
건축환경연구팀



· 1950년생  
· 건물에너지절약, 농수산물 환경저장에 관심을 가지고 있다.

#### 1. 서 론

사회가 문명화됨에 따라 현격한 에너지의 소비증가를 초래하고 있으며 이로 인해 현대사회는 에너지소비와 불가분의 관계를 유지하고 있는 실정이다. 70년대의 두 차례에 걸친 에너지 파동은 전세계적으로 에너지절약에 대한 노력과 새로운 에너지원의 개발에 주력하고 있다. 또한 최근들어 환경오염이라는 측면이 새롭게 인식되면서 자연에너지 이용에 많은 관심을 갖게 되었다.

일반적으로 건물에서 소비하는 에너지량

은 전에너지 소비량의 20~30%에 이른다고 알려지고 있으며 이 중에서 공조용으로 소비하는 에너지량은 건물에너지 소비량의 약 50% 정도를 차지하고 있으므로 건물의 냉난방을 위한 에너지는 전체 에너지 소비량의 10~15% 정도를 차지하고 있다. 따라서 비교적 적잖이지만 연중 일정한 온도를 유지하는 토양이 갖는 지열을 효과적으로 이용할 수 있는 시스템의 개발이 요구되고 있는 실정이다.

적절한 깊이의 지중토양은 주간과 야간, 여름과 겨울에 각각 열싱크(Heat Sink) 및

열원(Heat Source)으로 사용될 수 있으며 하루를 1 사이클로 할때 지중토양은 주야간의 하루 또는 여름과 겨울에 걸쳐 1년을 주기로 주기적 함수를 갖는 일종의 열교환기(Periodic Heat Exchanger)로 고려될 수 있다. 이때 지중파이프내의 공기와 주위 토양과의 열교환량은 파이프의 표면적, 파이프의 길이, 파이프 입구 공기의 수분함유량, 토양의수분함유량, 지중온도, 유입공기량, 파이프벽의 표면조건 및 재질, 지표면에서부터 관의 매설깊이 등 여러가지 변수들에 의하여 작용된다.

지금까지 지중을 열원으로 사용하는 아이디어는 오래전부터 알려져 왔다. 즉, 기원전 3000년경 고대 이란의 건축가들은 윈드타워(Wind Tower)와 함께 자연형 냉각 지중터널(Underground Tunnel of Passive Cooling)을 사용한 것으로 기록되어 있다. 또한 근세에 와서는 1845년 Wilkinson이 젓소용 축사의 냉방을 위해 지중통로(Underground Passage)를 사용한 바 있다. 그러나 이와 같은 기술들은 1940년대까지는 거의 활용되지 않았으나 1964년 Cornell 대학의 농공학과에서 최초의 이론적 연구가 이루어지면서 최근에는 N.K. Bansal, F.D.Y. Goswami, A. Trombe, M.S. Sodha 등 많은 연구자들에 의하여 여러 분야에서 활발

히 진행되고 있다.

## 2. 이론적인 모델

지상에서의 주위환경을 제어하는데 적절한 깊이에서의 지하의 온도를 이용하게 되면 지중을 열싱크나 열원으로서 활용이 가능하게 된다. 이처럼 온도가 안정이 되어 있는 지하의 보온효과(동절기)와 냉각효과(하절기)를 이용하기 위하여 지하에 파이프나 튜브를 매설하고 그 속에 외기를 통과시킨다. 이때 유입된 공기와 지중 온도와의 열교환을 통하여 하절기에는 냉각된 공기를 얻고 동절기에는 외기보다 높은 온도의 공기를 얻을 수 있어 외기를 그대로 유입하여 건물을 공조할 때보다 공조기에 유입되는 공기가 자연에너지의 의하여 예열 및 예냉효과를 가져오므로 공조기 부하를 감소시켜 에너지 절약을 도모할 수 있다. 그림 1은 모델의 개략도를 보여주고 있다.

지중에서의 열교환은 지중에 묻혀 있는 파이프와 토양사이의 지중열교환 시스템이므로 이에 대한 단순화된 모델을 그림 2, 그림 3처럼 설정하여 열적 특성을 알아보았다.

이를 위하여 다음과 같이 가정을 하였다

- 지중토양의 물성치는 등방성(isotropic)이다.

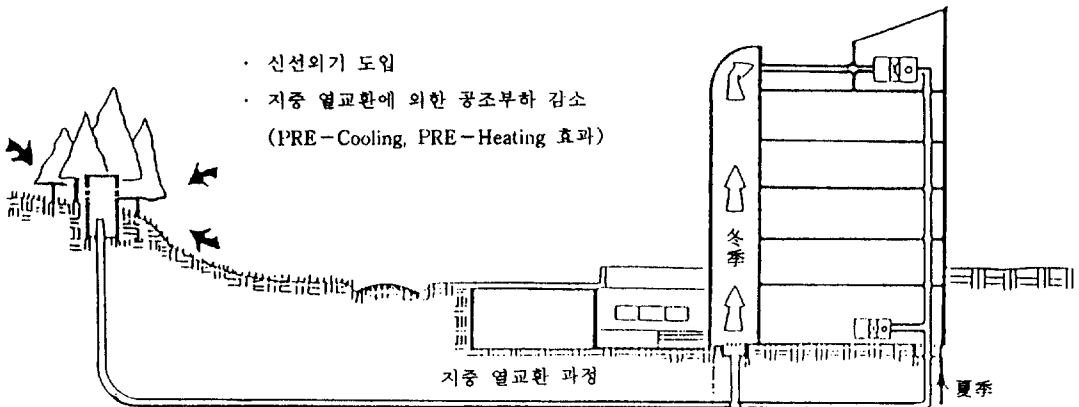


그림 1 지중파이프의 개략도

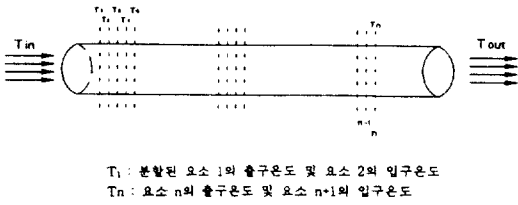


그림 2 지중파이프의 미세구간 분할

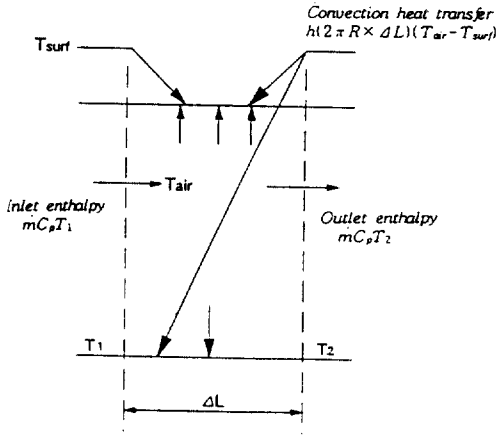


그림 3 미세구간에서의 에너지 평형

- 토양과 파이프 사이에서는 완전한 접촉(perfect contact)이 이루어진다. 이 가정은 토양이 젖어(wet) 있고 파이프 주변에 완전히 밀착(densely packed)되어 있는 경우에 타당하다.
- 지중파이프 표면의 초기온도는 파이프 주변토양의 초기온도와 같다.

2.1 지중파이프내의 열전달

열매체인 공기로부터 지중파이프로의 열전달을 해석하기 위하여 파이프는 그림 2와 같이 수많은 요소(element)들로 나누어진다. 그리고 각 요소에서는 그림 3과 같은 에너지 균형이 이루어진다. 각 미세구간에서의 출구온도는 다음과 같다.

$$T_2 = [T_1 + \frac{U}{2} T_{surf}] / (1 + \frac{U}{2})$$

(unsaturated condition) (1)

$$T_2 = [T_1 + \frac{(W_1 - W_2)}{C_p} H_{fg} + \frac{U}{2} T_{surf}] / (1 + \frac{U}{2})$$

(saturated condition) (2)

여기서  $U = \frac{A_{ph}}{mC_p}$ ,  $T_{air} = \frac{T_1 + T_2}{2}$ ,  $Nu_d = 0.023$

$Re_d^{0.8} Pr^n$ 이다.

2.2 지중파이프와 토양사이의 열전도

지중파이프로부터 토양으로의 열전달은 매설 파이프 주변의 토양에 의하여 형성되는 반무한(Semi-Infinite) 원통 내부의 열유속(Heat Flux)에 의하여 생성된다고 고려하였다.

그림 4에 나타난 미소구간에 대하여 지중파이프의 열전도 문제를 고려하면 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 T(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(r,t)}{\partial t}$$
 (3)

경계조건과 초기조건은 다음과 같다.

$$T(r,0) = T_e$$

$$T(\infty,t) = T_e$$

$$-k \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} = q'' \quad (W=r, t>0)$$
 (4)

위에 나타난 식들을 근사해 방법(Integral Method)을 사용하여 구한 온도분포식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T(r,t) = T_e - \frac{q'' R/k}{\delta/R} (1 + \delta/R - r/R)^2 \left( \frac{1}{\delta/R + 2 \ln(1 + \delta/R)} \right) \cdot \ln \left( \frac{r/R}{1 + \delta/R} \right)$$
 (5)

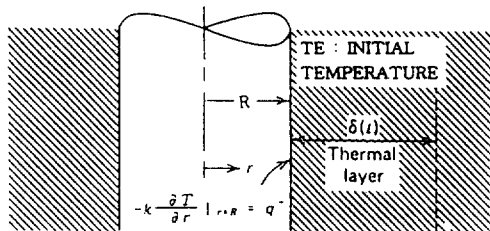


그림 4 반무한 원통의 열전달

여기서  $q^*$ 는 지중매설관으로부터 대류에 의해서 전달된 열량과 같고 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q^* = h(T_{air} - T_s)$$

윗 식 (5)에서 나타내는  $\delta$ 는 시간  $t$  동안에 열플럭스가 도달할 수 있는 거리로서 다음 식에 의하여 구할 수 있다.

$$\frac{\alpha t}{R^2} = \frac{(72\eta^2 - 96\eta + 36)\ln\eta - 13\eta^4 + 36\eta^2 - 32\eta + 9}{144(\eta - 1)(2\ln\eta + \eta - 1)} \quad (6)$$

여기서  $\eta = 1 + \frac{\delta}{R}$

### 3. 지중온도분포에 관한 해석

지중의 온도분포를 아는 것은 파이프 매설 깊이에 따른 주변 토양의 온도조건을 결정하고 파이프 출구에서의 온도변화를 하는데 매우 중요한 일이다. 여기서는 정현이나 여현의 주기성을 도입하여 풀이하는 방법으로 온도의 주기적 변화를 적절하게 고려하여 지중 온도 분포를 해석하는 방법을 사용하였다.

지중온도에 대하여 에너지방정식을 세워 해를 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\alpha}{1} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

식 (7)에서  $\alpha$ 는 열확산계수를 나타내고  $t$ 는 시간,  $x$ 는 지면으로 부터의 깊이를 나타낸다.

식 (7)의 해를 구하기 위한 경계조건은 다음과 같다.

$$T(0, t) = T_{aw} + T_{am} \cos wt \quad (8)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} T(x, t) = T_{aw} \quad (8)$$

식 (8)에서  $T_{aw}$ 는 지중평균온도,  $T_{am}$ 는 온도진폭,  $w$ 는 온도변화의 각속도를 나타내는데 하루중의 온도변화를 해석할 경우에는  $w = 2\pi/24$  시간으로 하고 1년의 온도변화를 해석할 경우에는  $w = 2\pi/365$ 일로 한다.

$$T(x, t) = T_{aw} + T_{am} \exp(-x\sqrt{\frac{w}{2\alpha}}) \times \cos(wt - x\sqrt{\frac{w}{2\alpha}}) \quad (9)$$

식 (9)는 지중의 깊이  $xm$ , 시간  $t$ 에서의 지중온도를 나타내는 식이다.

식 (9)의 이론해석 결과를 실측치와 비교하기 위하여 우리나라 중요지역의 연중, 월별 지중온도에 관한 자료와 비교하여 보정한 후 일반적으로 적용하기 위하여 표현한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = T_{aw} + T_{am} \exp(-x\sqrt{\frac{w}{2\alpha}}) \times \cos(wt - x\sqrt{\frac{w}{2\alpha}} + C) \quad (10)$$

식 (10)을 사용하기 위한  $T_{aw}$ ,  $T_{am}$ ,  $\sqrt{\frac{w}{2\alpha}}$ ,  $C$  값을 기상대 통계자료를 참고로 하여 지역별로 계산한 것은 표 1과 같으며 이와 같은 값을 일반식에 대입하면 지역별 깊이에 따른 지중온도를 쉽게 구할 수 있다.

표 1 우리나라 지역별  $C$ ,  $T_{aw}$ ,  $T_{am}$ ,  $\sqrt{\frac{w}{2\alpha}}$

지 명	( $^{\circ}C$ ) $T_{aw}$	( $^{\circ}C$ ) $T_{am}$	$\sqrt{\frac{w}{2\alpha}}$	(Radian) $C$
속 초	13.4	13.00	0.323	2.375
대관령	9.6	13.55	0.508	2.481
춘 천	16.1	14.95	0.371	2.548
강 룡	13.7	13.45	0.411	2.639
서 울	14.2	15.00	0.336	2.424
인 천	14.2	14.65	0.402	2.612
울릉도	13.2	12.20	0.426	2.420
수 원	13.1	14.15	0.411	2.410
서 산	14.2	14.00	0.450	2.438
울 진	13.8	12.70	0.333	2.350
청 주	14.6	14.75	0.355	2.378
대 전	14.2	13.80	0.355	2.245
추풍령	13.8	14.20	0.391	2.393
군 산	15.0	13.85	0.441	2.431
대 구	15.2	14.70	0.389	2.478

전주	14.9	14.25	0.413	2.510
울산	15.4	13.05	0.498	2.474
광주	15.6	13.80	0.424	2.310
부산	15.7	13.20	0.447	2.452
충무	17.3	12.50	0.513	2.488
목포	15.9	13.10	0.395	2.396
여수	15.1	13.45	0.452	2.439
제주	16.0	12.50	0.365	2.374
서귀포	18.1	11.55	0.581	2.536
진주	15.9	13.30	0.437	2.539
포항	14.1	13.95	0.406	2.683

4. 결과 및 고찰

그림 5~그림 7은 각각 외기도입 후 1시간, 5시간, 10시간 후의 파이프 안의 온도변화를 관경과 풍량에 따라 나타낸 그림이다. 이 때 길이 50m의 파이프에 공급되는 공기는 30℃이고 파이프 내공기의 평균유속은 약 2.3m/s 정도이며 토양의 평균온도는 15℃로 하여 계산하였다.

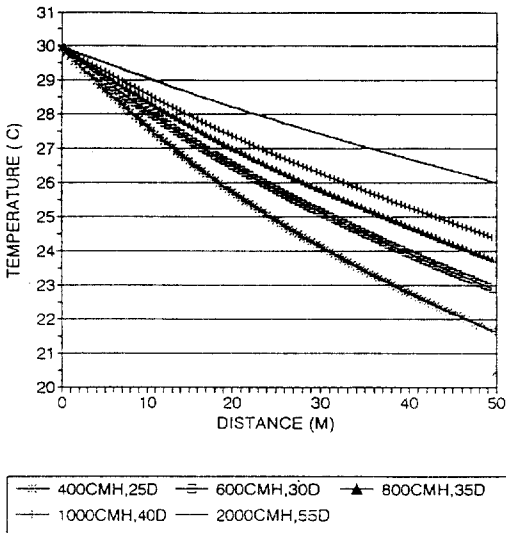


그림 5 각 풍량별, 직경별 파이프내 공기의 온도분포(1시간후)

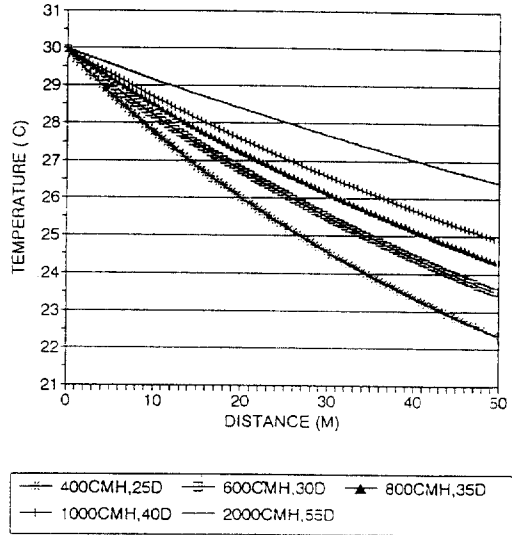


그림 6 각 풍량별, 직경별 파이프내 공기의 온도분포(5시간후)

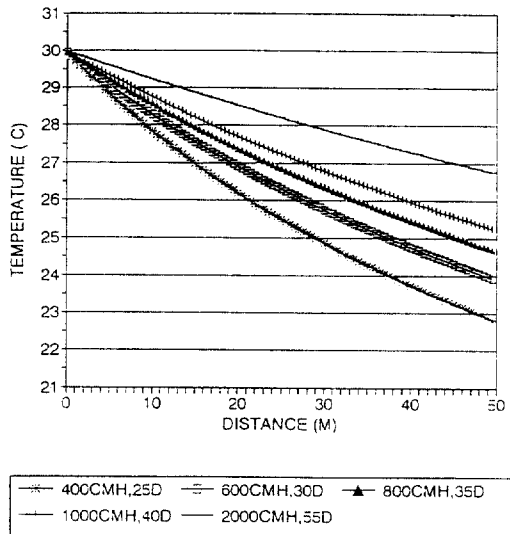


그림 7 각 풍량별, 직경별 파이프내 공기의 온도분포(10시간후)

출구에서의 온도강하는 3~8℃ 정도로 나타났으나 시간경과에 따른 온도는 1℃ 정도 밖에 상승하지 않았다. 그리고 각 조건의 최대온도 편차는 4℃ 정도로 나타났다. 여기서

보면 관경이 작아질수록 공급유량에 대한 관 표면과의 접촉면적이 커지기 때문에 온도강하가 큼을 알 수 있다.

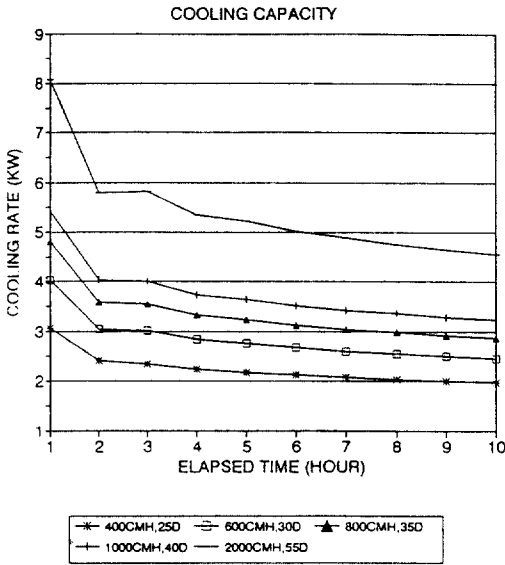


그림 8 각 풍량별, 직경별 파이프의 냉각성능

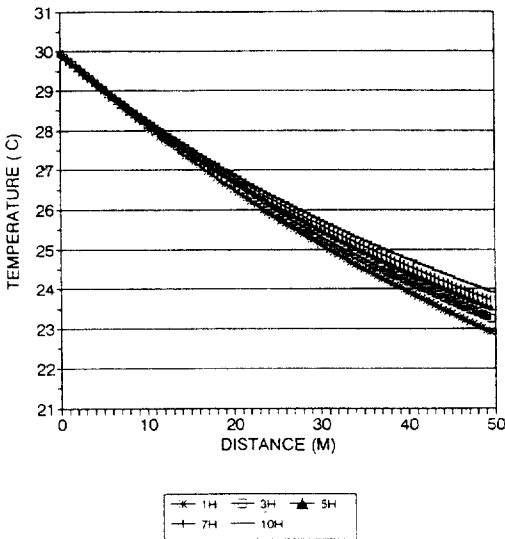


그림 9 파이프내 공기의 시간별 온도분포 (풍량 600CMH, 관경 0.3m)

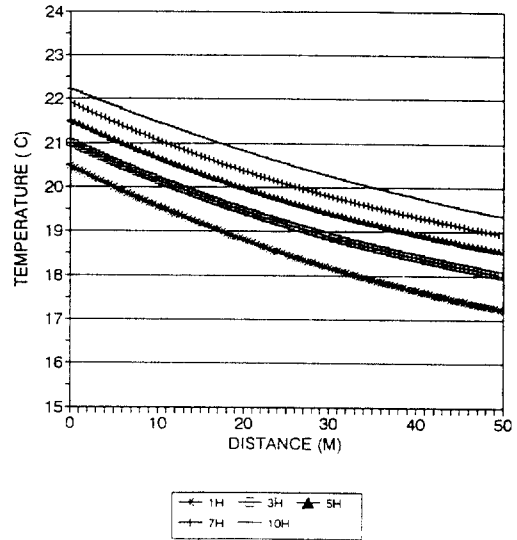


그림 10 파이프 표면의 시간별 온도분포 (풍량 600CMH, 관경 0.3m)

그림 8은 파이프 1개당 시간별 냉각열량을 보여주고 있다. 송풍량을 2500CMH 정도로 생각한다면 400CMH, 직경 0.25m인 경우가 가장 냉각효과가 좋을 수 있다.

그림 9, 그림 10은 풍량이 600CMH이고 관경이 0.3m일 때의 파이프내 온도와 관표면의 온도변화를 시간별로 나타내었다. 출구에서 7℃ 정도의 온도강하를 보여주고 있으며 시간경과에 따라 1℃ 정도의 온도상승이 나타났다. 입구와 출구쪽 간의 관표면 온도 변화폭은 3℃ 정도이고 10시간이 경과하면 2℃ 정도로 관 표면온도가 상승하고 있다.

그림 11은 5시간이 지난 후 파이프 표면 주변의 땅속온도를 보여주고 있다. 파이프 표면에서 약 25cm 이상 떨어진 위치에서는 땅속온도와 거의 같아지고 있으며 온도가 성층화 현상을 보여주고 있어 파이프와 파이프 사이의 이격거리를 고려할 때 기초자료가 되리라고 생각된다.

그림 12는 여름철과 겨울철의 지중열교환에 대한 성능을 보여주고 있다. 여름철은 유입공기와 토양의 온도차가 13℃, 15℃, 18℃

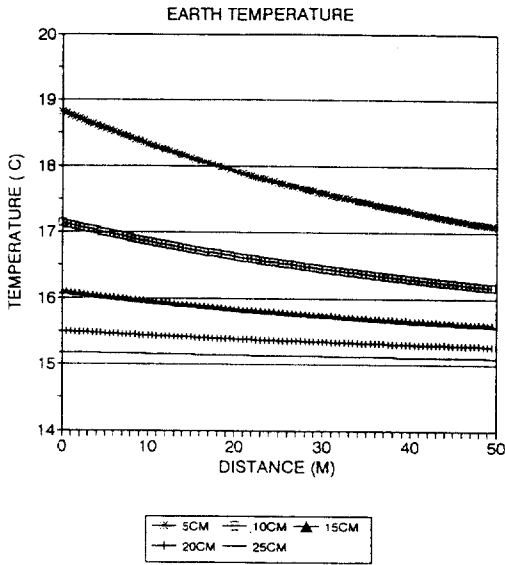


그림 11 파이프 표면부근의 지중온도분포 (5시간후)

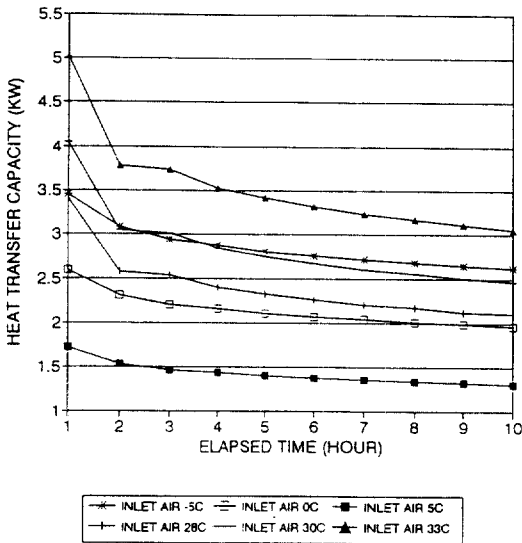


그림 12 파이프의 유입공기 온도별 전열성능

인 경우에 대하여 적용하였고 겨울철은 10℃, 15℃, 20℃인 경우에 대하여 비교를 하였는데 여름철의 냉각성능이 더 효과적으로 나타났다.

본 시스템은 유입공기의 온도가 일정하게 유지되면서 작동되며 작동시간은 10시간으로 가정하였다. 그리고 하루중 그 나머지 시간은 토양으로 전달된 열량이 다시 환원되어 주기적으로 변한다고 고려하였다. 따라서 실제 출구에서의 온도강하는 외기의 온도변화를 고려한다면 출구에서의 온도가 더 높게 나타날 것으로 예측할 수 있다.

### 5. 결 론

지중열교환을 이용한 지중파이프 시스템에서 여러가지 변수 중 몇가지에 대하여 이론 해석을 하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 유입외기가 30℃인 경우 풍량을 2000 CMH에서 200CMH까지 변화를 시켰을 때 파이프 출구에서의 온도는 3~9℃ 정도 떨어졌으며 작동시간이 10시간 경과에 대하여는 1℃ 정도의 온도상승을 가져왔다.

(2) 튜브의 관경이 작을수록 공급풍량에 대한 파이프 표면과의 접촉면적이 커져서 열교환이 많이 일어나므로 온도가 많이 떨어지나 파이프의 갯수가 여러개가 되면 유량분배의 불균형과 혼합에 의한 손실, 응축수량의 증가, 송풍기 풍압 등을 고려하여 어느 정도 크게하는 것이 바람직하다.

(3) 파이프내의 공기가 파이프주위 토양온도 변화에 영향을 주는 거리는 대략 파이프 직경의 2배 정도로 나타나 파이프 매설시 파이프 사이의 이격거리를 고려할 때 기초자료가 될 수 있다.

(4) 여름철과 겨울철에 공급공기와 토양의 온도차가 동일한 경우 여름철의 엔탈피 변화량이 더 크게 나타나고 있어 지중파이프에 의한 냉각성능은 여름철이 더 효과적이라고 할 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. Krarti, M. and Dreinder, J.F., 1987,

- "Analytical model for heat transfer in an underground air tunnel", *Solar Engineering ASME*, vol. 2, pp. 878~888.
2. Trombe, A., Serres, L., 1994, "Air-earth exchanger study in real site experimentation and simulation", *Energy and Building*, vol. 21, pp. 155~162.
  3. Bansal, N.K., Sodha, M.S. and Bharadwa, S.S., 1983, "Performance of earth air tunnel", *Energy Research*, vol. 7, pp. 333~345.
  4. Sodha, M.S., Sharma, A.K., Bansal, S.P. and Kumar, A., 1985, "Evaluation of an earth-air tunnel system for cooling/heating of a hospital complex", *Building and Environment*, vol. 20, no. 2, pp. 115~122.
  5. Goswami, D.Y., Dhaliwal, A.S., 1985, "Heat Transfer analysis in environmental control using an underground air tunnel", *JSEE*, vol. 107, pp. 151~145.
  6. Goswami, D.Y., Ileslamlou, S., 1990, "Performance analysis of a closed-loop climate control system using underground air tunnel", *ASME*, vol. 112, pp. 76~81.
  7. Ozisik, M.N., 1980, *Heat Conduction*, A Wiley-Interscience Publication, pp. 335~347.
  8. Myers, G.E., 1971, "Analytical methods in conduction heat transfer", McGraw-Hill, pp. 173~177.
  9. 정수일, 박윤성, 1984, "지중온도예측을 위한 방법론 연구", *건축*, 제8권, 제119호, pp. 36~37.
  10. 박효순 외, 1995, Cool Tube를 이용한 자연에너지 이용기술 연구, KIER 연구 보고서, KIER.