

지중 축냉조에 대한 에너지 시뮬레이션

Energy Simulation for the Cold Storage Tank in the Ground

김 홍 제 *, 양 윤 섭
(한국에너지기술연구소)

1. 요약

The heat transfer process below and adjacent to the cold storage is numerically investigated. The cold storage dimensions, temperatures, insulation thickness, and the initial soil temperature were considered.

2. 내용

국민생활 수준의 향상에 따라 근래 하절기 냉방수요가 급증하고 있다. 특히 냉방 에너지는 주로 전력에 의존하고 있기 때문에 하절기 부하가 높은 주간에 전력은 최고치에 달하게 되어 국가 발전설비용량이 한계수위에 이르고 있는 실정이다. 따라서 하절기 주간대의 첨두부하를 낮추는 동시에 전력사용의 불균형을 조절할수 있는 방안의 하나로 부하가 낮은 심야시간대의 잉여전력을 이용한 축열시스템의 사용이 권장되고 있다. 최근 축열조의 소형화 추세에 따라 많은 연구가 이루어지고 있는 빙축열시스템은 그 축열효과가 물의 약 12배 정도에 이르기 때문에 몇몇 기업에 의해 보급화가 적극적으로 추진되고 있다. 일반적으로 건물의 냉방을 위한 정상적인 부하운전을 고려할때 축냉조의 단열방수벽을 통한 냉열손실량의 산정은 부하의 예측 및 냉동기용량의 선정 등에 있어서 대단히 중요하다.

따라서 본 연구에서는 이미 신축된 특정건물에 대하여 축냉조의 위치, 외벽 및 바닥의 구조(단열조건) 등에 따른 축냉조의 냉열손실을 예측하기 위하여 지중축냉조의 열전달 특성을 2차원 모델을 사용하여 수치해석하였다.

본 계산에서 사용한 축냉조의 설계조건은 다음과 같다.

- 위치 : 서울(서울기상 조건 사용)
- 사용 BRINE : ETHYLENE GLYCOL 25% wt
- 사용온도 범위 : BRINE 온도 $-10^{\circ}\text{C} \sim +15^{\circ}\text{C}$ (일일 변화온도)
(최악조건임)
- 일일 BRINE 온도변화 :
 - 1) 22:00 ~ 08:00(빙축운전) : 평균 BRINE 온도 -5°C
 - 2) 08:00 ~ 18:00(냉방운전) : 평균 BRINE 온도 7°C
 - 3) 18:00 ~ 22:00(정지) : 평균 BRINE 온도 10°C
- 축냉조 위치 : 1층 건물 아래 지하

2.1 수학적 모델 및 지배방정식

본 축냉조의 크기는 가로, 세로, 높이가 $24\text{m} \times 24\text{m} \times 4\text{m}$ 이며 이는 지하 기계실 하단에 위치한다. 따라서 수학적 모델은 냉축열조의 가로, 세로 길이가 각각 24m 정도로 아주 크기 때문에 半無限(semi-infinite) 직육면체 형태인 것으로 가정하여 단순화하였으며, Fig.1과 같은 2차원 지중토양 열전도 문제로서 나타낼 수 있다. 또한 본 계산에서 축냉조의 측면 단열벽면은 7cm 의 경질 우레탄폼과 30cm 의 콘크리트로 이루어지며, 바닥면은 7cm 의 경질우레탄폼과 2m 의 무철근 콘크리트로

이루어진 것으로 가정하였다. 지중토양의 하단 깊이는 온도의 변화폭이 별로 없는 지중깊이인 15m로 하였으며, 냉축열조로부터 12m 떨어진 토양(soil)까지 계산영역으로 하였다. 지표면을 통한 지중토양의 열전달은 대류경계조건을 사용하며, 외기온도는 년중 기온이 가장 높은 8월달의 1일 평균 시간대별 기온을 기상데이터로 사용하였다. 또한 지중 하단 깊이(15m)의 온도는 건축설계 핸드북을 참조하여 냉방설계 지중온도가 12°C인 것으로 하였다. 비정상 열전도 및 토양내부의 수분변화를 고려하면 지배방정식은 다음식과 같이 쓸 수 있다.

- 에너지방정식 :

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \alpha_s \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} \right) - \frac{h_{ig} D_{\theta v}}{(\rho C_p)_s} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right)$$

- 수분방정식 :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = D_{\theta} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) - D_T \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial K}{\partial y}$$

여기서 θ 는 수분함유량(moisture content)을 나타내며, h_{ig} 는 증발잠열, α_s 및 $D_{\theta v}$ 는 각각 토양의 열확산계수 및 증기상태의 수분의 등온확산계수(isothermal diffusivity coefficient)이다. 또한 D_T 및 D_{θ} 는 각각 수분의 열확산계수 및 등온확산계수이며, K 는 비포화 수력전도도(unsaturated hydraulic conductivity)이다.

본 계산에서 지중토양에 대한 초기온도 및 수분함유량은 빙축운전을 하지 않는 조건하에서 정상상태에 대한 지중토양의 온도를 하루동안에 대하여 수치계산한 결과치를 초기조건으로 사용하였다.

초기조건 및 경계조건은 다음과 같다.

1) 계산영역의 전구간에서 :

$$\begin{aligned} T_s &= T_s(x, y) \\ \theta &= \theta(x, y) \end{aligned} \quad (t=0)$$

2) 지표면에서 :

$$h(T_{air} - T_{surf}) = -\lambda \frac{\partial T_s}{\partial y}, \quad \theta = 0.1 \quad (t \geq 0)$$

여기서 $h = 5.67 + 3.86V$; V 는 풍속(8월중 평균 풍속: 1.8m/sec)

3) 계산영역의 양쪽 수직면에서 :

$$\frac{\partial T_s}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \quad (t \geq 0)$$

4) 지중 하단면에서 :

$$T_s = 12 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad \theta = 0.4 \quad (t \geq 0)$$

5) 지하 기계실 벽면 :

$$T_s = 20 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \quad (t \geq 0)$$

6) 냉축열조 벽면 :

$$T_s = T_s(t), \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0 \text{ (bottom)} \quad (t \geq 0)$$

2.2 지중토양의 물성치

지중토양의 공극율은 0.4로 가정하였으며, 지중하단면과 지표면의 수분함유량은 각각 0.4와 0.1로 각각 가정하였다. 여기서 0.4는 기공(pore)에 수분이 포화되어 있는 상태를 나타내며, 지표면의 수분함유량 0.1은 일반 토양내의 액상의 수분이 연속 상태가 되는 최소값(약 0.08)에 가까운 값으로 가정하였다.

지중토양의 열용량과 유효열전도율은 Ingersoll[1]의 식을 사용하였으며, 전달계수는 일반적으로 수분함유량의 함수로 표시되나 본 계산에서는 Gee[2] 결과를 참고하여 수분함유량이 0.3인 경우에 대한 값, 즉 $D_0 = 0.075 \text{ m}^2/\text{day}$, $D_T = 1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{day}^\circ\text{C}$, $D_{0v} = 0.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{day}$ 을 각각 사용하였다.

한편 외기온도는 서울지방의 지난 5년간의 평균값을 시간대별로 정리한 다음식을 사용하였다. 즉

$$T = \sum_{n=0}^{10} C_n t^n$$

여기서 t는 시간이며, C_n 은 계수로서 8월달의 경우에 그 값은 아래와 같다. 즉

$C_0 = 23.2884$	$C_1 = -0.118934$
$C_2 = 0.0387597$	$C_3 = -0.0532267$
$C_4 = 0.00430139$	$C_5 = 0.0017609$
$C_6 = -0.000341471$	$C_7 = 2.56046 \times 10^{-5}$
$C_8 = -9.75428 \times 10^{-7}$	$C_9 = 1.88493 \times 10^{-8}$
$C_{10} = -1.47259 \times 10^{-10}$	

2.3 좌표변환(Coordinate Transformation)

본 계산은 축냉조의 형태가 직사각형이 아니기 때문에 이를 좌표변환할 필요가 있다. 본 연구에서는 해석형태가 복잡하거나 경계가 이동하는 경우에 까지 확장이 가능한 경계밀착좌표계(boundary-fitted coordinate)[3]를 사용하였다.

3. 결과 및 논의

본 수치계산은 먼저 정상상태의 지중온도 분포를 계산하였으며, 그후 주어진 조건, 즉 방축운전(-5°C), 냉방운전(7°C), 정지(10°C) 등의 조건에 대하여 5일동안에 걸쳐서 계산한 결과치중 5일째의 결과를 사용하였다. 정상상태에서 서울지방의 8월달 평균시간별 외기온도를 지표면에서 대류경계조건으로 주어 수치계산한 지중깊이 변화에 따른 시간별 온도변화를 살펴보면 지중불이층에 대한 온도분포 곡선형태는 나타나지 않았으나 대략 지표면에서 2m 정도의 깊이 이내에서 지중온도가 변화하는 것을 알 수 있었다. 본 계산에서 전형적인 지중불이층 형태의 온도분포가 그려지지 않은것은 지중하단면의 온도를 12°C 로 일정한 것으로 두고 정상상태에 대한 수치계산을 하였기 때문인 것으로 판단되는데, 즉 이는 외기온도의 년중 변화가 고려되지 않았기 때문으로 사료된다. 본 결과가 다소 미흡한 면은 있으나 지중온도의 초기조건이 대략 이 온도분포인 것으로 가정하여 수치계산 하였다.

Fig.2와 Fig.3은 각각 정상상태에 대한 지중온도분포 및 지중 수분함유량분포를 나타낸 것이다. 지중온도분포 및 수분함유량분포는 지표면으로부터 잘 성층화되어 있는 것을 알 수 있으며, 축냉조의 바닥에서는 방수조건에 의해 수분함유량이 높은

수치를 유지하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig.4는 5일째 되는 날 08:00시(빙축운전)의 지중온도분포를 나타낸 것이다. 빙축운전이 끝나는 시간으로서 축냉조 주변에서 온도구배가 크게 나타났는데, 이는 단열재의 영향이 큰 것을 알 수 있다. 또한 이 경우에 냉축열조로부터 지중으로의 열교환은 주로 벽면 근처의 짧은 거리에서 이루어지는 것으로 나타났다. 한편 지중수분함유량 분포는 온도변화에 따라 큰 영향을 나타내지 않았다.

Fig.5와 Fig.6은 각각 11:00시(냉방운전)와 21:00시(정지)의 지중온도분포를 나타낸 것으로 이 경우에는 축냉조의 벽면 근처에서 온도구배가 점차 작아져가는 것을 알 수 있으며, 이때 축냉조의 냉열손실은 줄어든다.

Fig.7은 본 수치계산결과 축냉조 벽면을 통한 시간별 총냉열손실을 나타낸 것으로, 여기서 총냉열손실은 실제 바닥면(24m x 24m)과 4개의 측벽면(24m x 4m)을 통한 냉열손실을 총합한 것이다. 그림에서 보면 빙축운전 기간에는 냉열손실이 시간당 약 12 kWh로서 상대적으로 크게 나타났으나, 냉방운전 기간에는 4 kWh로 줄어 들며, 정지기간에는 2kWh 정도로 작아지는 것을 알 수 있다. 따라서 하루동안의 총냉열손실은 이 그림을 24시간에 걸쳐 적분한 결과 약 164 kWh인 것으로 나타났다. 한편 기계실의 온도를 20°C로 가정하고, 축냉조의 천정면의 열관류율을 0.25 W/m²°C로 하였을때 천정면을 통한 1일 냉열손실은 60 kWh가 된다. 따라서 1일 총냉열손실량은 대략 224 kWh인 것으로 나타났다.

4. 결론

본 고에서는 축냉조의 설계시 부하의 예측 및 냉동기용량의 산정 등에 필요한 지중 축냉조의 냉열손실을 구하기 위한 에너지 시뮬레이션 연구가 행해졌다. 수치계산은 서울의 어떤 특정건물을 대상으로 하여 축냉조의 크기(24m x 24m x 4m), 단열조건 및 운전조건(빙축->냉방->정지) 등에 대하여 수행되었으며, 그 결과 최악조건인 여름철(8월달)의 1일 평균냉열손실은 대략 224 kWh인 것으로 나타났다.

5. 참고문헌

1. Ingersoll, J.G., Analytical Determination of Soil Thermal Conductivity and Diffusivity, Trans. ASME, J. Solar Energy Engrg, Vol.110, pp.306-312, 1988.
2. Gee, G.W., Water Movement in Soils as Influenced by Temperature Gradient, Ph.D. Dissertation, Washington State University, 1966.
3. Thompson, J.F., Warsi, Z.U.A., and Mastin, C.W., Numerical Grid Generation-Foundations and Applications, Elsevier Publishing Company, New York, 1985.

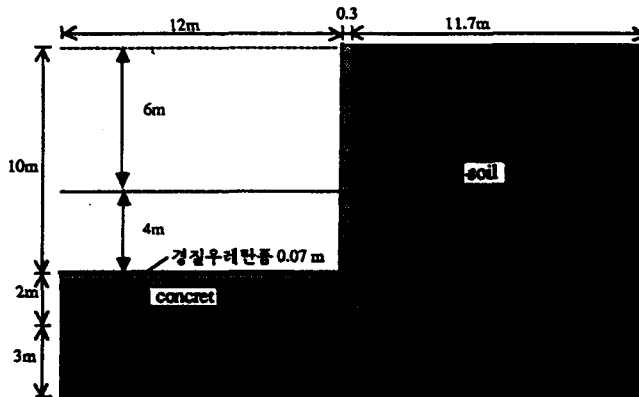


Fig.1 수치계산을 위한 축냉조 모델

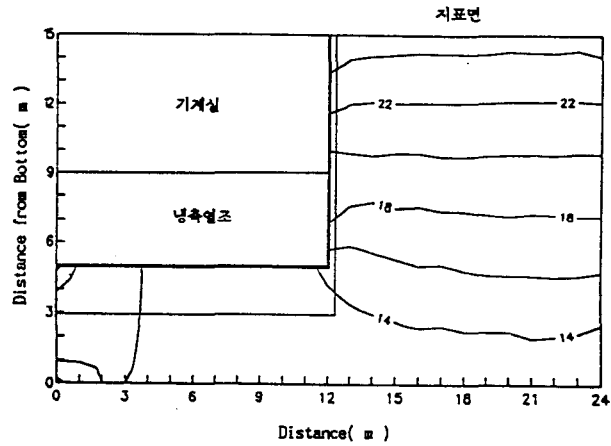


Fig.2 지중온도분포(정상상태)

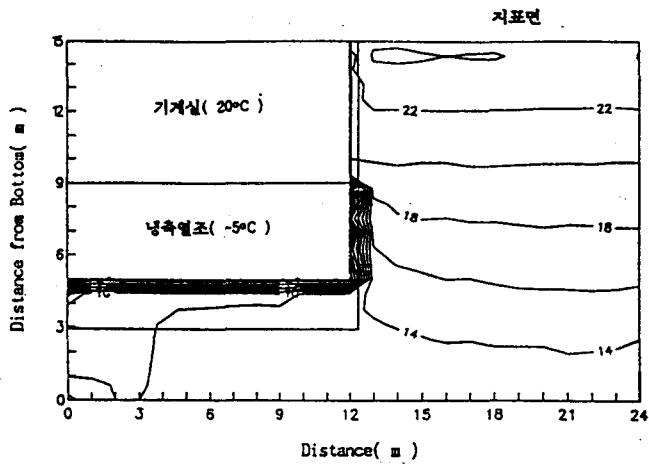


Fig.4 지중온도분포(08:00시)

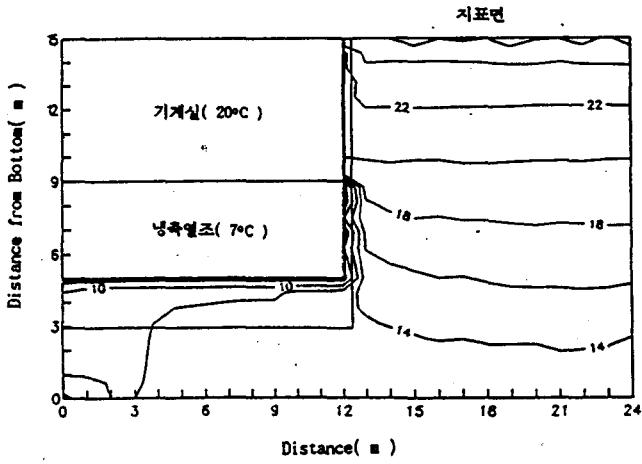


Fig.5 지중온도분포(11:00시)

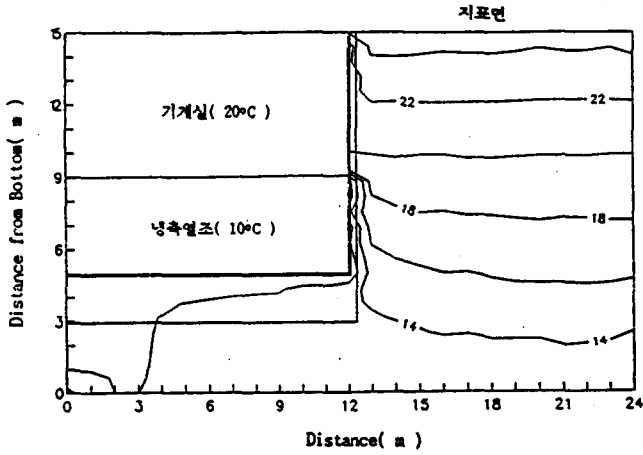


Fig.6 지중온도분포(21:00시)

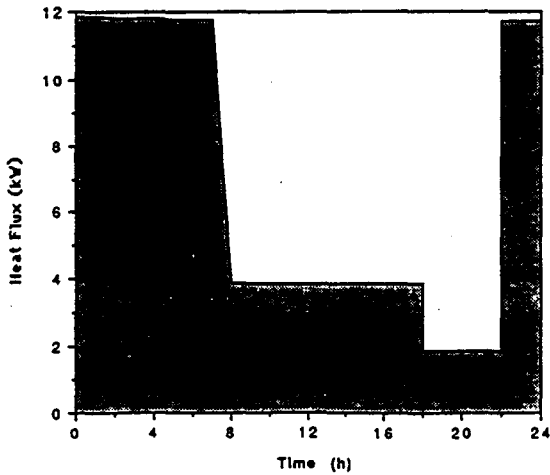


Fig.7 냉축열조의 시간별 냉열손실