

수직형 지중 열교환기를 이용한 냉난방 시스템 운전에 따른 지중온도 분포

조 정 식

한국건설기술연구원 책임연구원

1. 서론

지열원 시스템은 기존 냉난방 설비보다 에너지 소비량이 적고, 공기보다 안정적인 지열을 히트싱크(heat sink) 및 열원(heat source)으로 사용하기 때문에 효율이 높은 시스템이다. 또한 이산화탄소와 같은 온실가스의 배출이 타 시스템에 비해 적은 친환경적인 시스템이다. 그러나 지중 열교환기의 매설을 포함한 전체 시스템의 초기 설치비가 기존 냉난방 설비보다 큰 것이 단점이다. 특히, 지중 열교환기 보어홀(borehole) 천공 및 지중 열교환기 설치비용이 전체 초기 설치비용의 30%~50%를 차지할 만큼 지중 열교환기의 적정 설계 및 시공은 전체 시스템의 성능 및 초기 설치비를 결정하는 중요한 과정이다.

현재, 미국 및 캐나다 그리고 북유럽 국가 등이 지열원 시스템 보급 및 연구활동의 중심에 있다. 특히 지난 10년 동안 매년 10% 이상의 증가율을 보이고 있는 것으로 추산되고 있다. 국내에서 지열원 시스템에 관심을 갖기 시작한 것은 최근의 일이지만 최근 들어 대체에너지 이용에 대한 관심도가 증가하고 보급 활성화를 위한 제도적인 장치가 마련되면서 설치 사이트가 증가하고 있다.

국내에서는 지열 에너지의 이용 가능성이 확인된 후, 지열원 시스템의 성능분석 및 요소기술 개발에 대한 관심도가 증가하고 있다.

그러나, 실제 현장에 설치된 지중 열교환기를 이용하여 지중(토양)과의 열교환 성능을 규명하고 이로부터 주위 토양의 온도분포에 대한 분석은 거의 없다. 이에 본 논문에서는 실제 수직형 지중 열교환기를 설치하고, 냉난방 운전을 실시한 후 이에 따른 지중 온도분포를 분석함으로써 냉난방 시스템 운전이 지중환경에 미치는 영향 정도를 확인하고자 한다.

2. 지열원 냉난방시스템의 개요

2.1 에너지원으로서의 지열

일반적으로 지열이란 지중(토양, 지하수, 지표수 등)에 저장된 태양 복사에너지를 말하며, 이는 지구에 도달하는 전체 태양 복사에너지 중 약 47%를 차지한다. 이러한 지열은 지표면으로부터의 깊이에 따라 천부지열(shallow geothermal)과 심부지열(deep geothermal)로 구분된다. 천부지열은 지표로부터 150m~200m까지에 저장된 지열을 일컫으며, 온도는 지형 및 지역에 따라 다르지만 10~20℃ 정도이다.

지중 열교환기가 지중으로부터 열을 흡수하거나 또는 지중으로 방출하는 과정은 지중 열교환기 순환유체와 지중의 온도차에 기인한다. 지면에서 대략 지하 5m까지의 지중온도는 외기의 온도변화에 영향을 받지만 그 이하부터는 거의 일정한 값을 갖는다.

지중(토양 또는 암반)과 지중 열교환기 사이의 열 전달에 영향을 미치는 요인으로는 지중 열교환기의 표면적과 지중의 열 물성치(thermal properties) 등이 있다. 지중의 열 물성치는 계절, 연간 강우량 그리고 시스템 운전에 따른 지중 열교환기 주위 토양의 수분함량 변화 등과 같이 다양한 요인에 의해 영향을 받는다. 따라서 지중의 열 물성치에 대한 정량적인 데이터 확보는 지열원시스템의 설계에 매우 중요하다.

지열원 열펌프시스템의 지중 열교환기 설계 및 성능에 영향을 미치는 지중의 열 물성치는 열전도계수와 열확산계수이다. 표 1은 전형적인 토양 및 암석의 열물성치를 보여주고 있다. 암석의 열전도계수 또는 열확산계수가 토양보다는 큰 값을 갖고, 암석이나 토양은 모두 건조한 상태보다 습한 상태일 때 다소 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다.

2.2 수직형 지중 열교환기

그림 1은 수직형 지중 열교환기 설치 개략도를 보여주고 있다. 지중 열교환기로 사용되는 U자관을 보어홀에 삽입한 다음 파이프와 보어홀 사이의 빈 공간을 그라우트(grout, 뒤채움재)로 다시 채운다. 그라우트는 지중 열교환기 파이프와 보어

홀 주변의 토양 또는 암석 등과 열전달을 촉진하고 지면에 고인 물이 보어홀 내로 유입되는 것을 방지하며 보어홀 주변의 지하 수맥에서 보어홀 안으로 지하수가 유입되는 것을 방지하는 중요한 역할을 한다. 현재 투과계수(permeability)가 낮은 시멘트 그라우트나 벤토나이트 그라우트 등이 주로 사용되고 있다.]

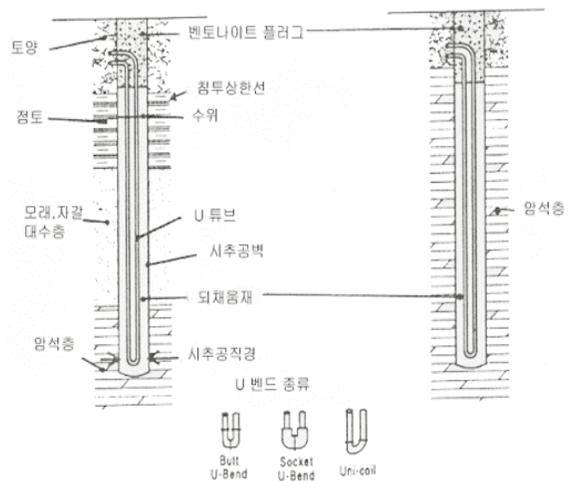
그라우트는 다음과 같은 조건을 갖추어야 한다.

- 낮은 투과계수 ($1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-9}$ cm/sec)
- 높은 열전도계수 및 화학적인 안정성
- 지중 열교환기 파이프와 보어홀 벽면과의 높은 접착력(bond strength)
- 저렴한 가격 및 우수한 혼합성
- 그라우트 혼합기(mixer) 또는 그라우트 펌프 사용 후 기기 세척용이

수직형 지중 열교환기용 그라우트의 열성능 향상을 위한 연구는 크게 그라우트 자체의 열물성과 관련된 연구와 현장에서 열물성치를 측정하는 연구로 구분할 수 있다. 현재 주로 사용되는 순수 시멘트 그라우트(시멘트+물)와 순수 벤토나이트 그라우트(벤토나이트+물)는 보어홀 주변의 토양 또는 암석과 비교했을 때 상대적으로 낮은 열전도계수를 갖는다.

<표 1> 토양의 전형적인 열적특성

재료	열전도계수 (W/mK)	비열 (kJ/kgK)	밀도 (kg/m ³)	열확산계수 (m ² /day)
화강암	2.1~4.5	0.84	2640	0.078~0.18
석회암	1.4~5.2	0.88	2480	0.056~0.20
대리석	2.1~5.5	0.80	2560	0.084~0.23
사암				
건사암	1.4~5.2	0.71	2240	0.074~0.28
습사암	2.1~5.2	.	.	0.11~0.28
점토				
건점토	1.4~1.7	1.3~1.7	.	0.046~0.056
습점토	1.7~2.4	1.7~1.9	1440~1920	0.056~0.074
모래				
건모래	.	1.3~1.7	.	0.037~0.046
습모래	2.1~2.6	1.7~1.9	1440~1920	0.065~0.084



[그림 1] 전형적인 수직형 지중열교환기

또한, 벤토나이트 그라우트를 적용할 경우 투과성, 접착력 그리고 그라우트가 함유하고 있는 수분의 유출로 인한 열전도계수 감소 등을 주의 깊게 고려해야 하며, 규사(silica sand)와 같은 고체재료를 첨가함으로써 열전도계수를 향상시킬 수 있다.

지열원 열펌프 시스템을 설계할 때 지중 열교환기의 장기간 운전에 따른 지중온도 변화 및 부동액 누설이 지중환경에 미치는 영향 등을 고려해야 한다. 또한 그라우트 사용에 대한 법적 기준을 검토하여 시스템 설치 예정지역에 적합한 지중 열교환기를 시공해야 한다. 그러나 지열원 열펌프 산업이 초기 단계인 국내에는 이렇다할 법적 기준이 없다. 현재 미국은 60% 이상의 주에서 지중 열교환기 시공을 위한 그라우트 및 그라우팅 기술을 명시하는 법적 기준을 두고 있다.

지중 열교환기 순환유체로 부동액을 주로 사용한다. 이상적인 순환유체는 열전달 능력이 우수하고 점도가 낮아야 하며 지중 환경에 대한 영향이 없어야 한다. 또한 값이 저렴하면서 장기간 사용할 수 있어야 한다. 현재 주로 사용되고 있는 부동액은 염화칼슘(CaCl₂)/물, 염화나트륨(NaCl)/물, 탄산칼륨(K₂CO₃)/물, 에틸렌글리콜(HOCH₂CH₂OH)/물, 프로필렌글리콜(CH₃CHOHCH₂OH)/물, 메탄올(CH₃OH)/물, 에탄올(C₂H₅OH)/물 그리고 아세트산칼륨(CH₃CHOOK)/물 등이다.

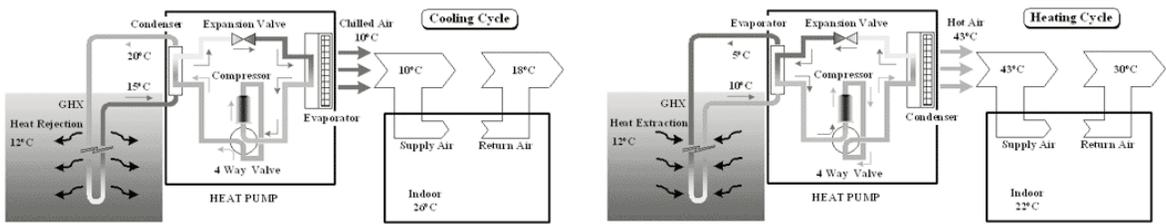
유럽은 질량비율로 20%~30%를 물과 혼합하여 사용하는 글리콜 계열의 부동액을 주로 사용한다. 그러나 -10℃ 이하의 낮은 온도에서 글리콜 계열의 부동액은 점도가 증가하고 따라서 부

동액 순환펌프의 소비동력이 증가하게 되어 전체 지열원 시스템의 효율이 감소하는 단점이 있다. 미국은 알콜 계열(메탄올 또는 에탄올)의 부동액을 주로 사용한다.

지중 열교환기 순환유체는 각종 금속에 대해 내부식성을 갖추어야 한다. 따라서 실제 지열원 시스템에 사용되는 부동액은 소량의 부식억제제(corrosion inhibitors)가 첨가된 것이다. 일반적으로 글루코스(glucose)를 부식억제제로 사용하지만 아세트산칼륨과는 함께 사용하지 않는다.

2.3 지열원 냉난방시스템

냉방사이클로 작동하는 지열원 열펌프시스템의 개략도를 그림 2의 (a)에 도시하였다. 고온·고압의 냉매는 과열증기 상태로 압축기를 나와 4방밸브를 거쳐 응축기로 들어간다. 응축기에서 고온의 증기냉매는 상대적으로 온도가 낮은 부동액과 열교환을 한다. 이 과정에서 부동액의 온도는 상승하며 증기냉매는 기상(vapor phase)에서 액상(liquid phase)으로 상변화(응축)를 하게 된다. 응축기를 나온 고온의 액상냉매는 팽창밸브를 지나면서 저온·저압의 상태가 된다. 저온·저압 상태의 액상냉매는 증발기로 들어가 실내공기와 열교환을 한다. 이 열교환 과정에서 액상냉매는 증발기로 유입되는 실내공기를 차갑게 만들면서 증기로 상변화(증발)를 하게 된다. 증발기를 나온 저온·저압의 액상냉매는 4방밸브를 지나 압축기로 들어가 압축과정을 겪으면서 다시 고온·고압의 증기냉매가 된다.



(a) 냉방시스템

(b) 난방시스템

[그림 2] 지열원 열펌프시스템

한편, 전형적인 지열원 열펌프시스템에서 부동액의 응축기 입구온도는 약 15℃ 이고, 출구온도는 냉매로부터 열(온도차 에너지)을 받아 약 5 ~ 6℃ 정도 상승한다. 온도가 상승한 부동액은 지중 열교환기 파이프 내를 순환하면서 약 12℃의 토양과 열교환을 하여 설정 입구온도로 된다.

그림 2의 (b)는 지열원 열펌프시스템의 난방사이클을 개략적으로 도시한 것이다. 압축기를 나온 고온·고압의 증기냉매는 4방밸브를 거쳐 응축기로 들어간다. 응축기에서 고온의 증기냉매는 상대적으로 온도가 낮은 실내순환공기(물-공기 방식) 또는 물(물-물 방식)과 열교환을 수행한다. 이 과정에서 증기냉매는 액상으로 상변화를 하고, 실내순환공기 또는 물은 냉매가 갖고 있던 에너지를 받아 온도가 상승한다. 온도가 상승한 공기 또는 물을 분배장치를 통해 난방을 하거나 온수를 공급하게 된다. 응축기를 통과하면서 액상으로 상이 변한 냉매는 팽창밸브를 지나면서 온도와 압력이 감소하여 증발기로 들어간다. 증발기로 유입된 액상냉매는 지중 열교환기를 순환하는 부동액으로부터 에너지를 받아 다시 증발하고, 4방밸브를 지나 압축기로 들어간다. 압축기는 저온·저압의 액상냉매를 압축하여 처음 상태로 만든다. 지중 열교환기의 부동액은 증발기에서 냉매를 증

발시키고 자신은 약 5 ~ 6℃ 정도 온도가 감소한다. 이때 부동액의 증발기 입구온도는 대략 10 이다. 온도가 강하된 부동액은 지중 열교환기 내를 순환하면서 약 12℃의 토양과 열교환을 하여 설정 입구온도로 된다.

3. 수직형 지중열교환기 냉난방시스템

3.1 적용 건물의 개요

수직형 지중열교환기를 이용한 냉난방시스템 적용 건물은 경기도 화성시에 소재한 연구/실험용 건물로서, 연구실, 사무공간 및 실험공간으로 구성되어, 연구실은 8시간 연속공조 공간이고, 전산실, 향온향습실, 방제센터 등은 24시간 공조운전 그리고, 각종 실험실은 간헐부하운전으로 운전되고 있다.

또, 실험실에서 수행되는 실험수요가 일정치 않아 실별 자동제어의 필요성이 높고, 실내에서 연소를 실시하기 때문에 냉방부하와 환기부하가 높으며, 실험장비의 실험조건을 일정하게 유지할 수 있도록 하기 위한 고려할 필요가 있다.

다양한 부하가 존재하여, 실험실에서는 실험장비의 급기온도를 일정하게 유지시키기 위한 장비 부하가 존재하며, 연구실에서는 재실자 및 기기

<표 2> 적용건물의 지열원 냉난방 열량

구분	담당 구역	냉방열량(kcal/h)	난방열량(kcal/h)		운전 시간	수량	비고
			온수	가습(kg/h)			
1. 지열히트펌프 (Water to Water)							
IAV 유닛	2층 사무실 존	46,189	39,855		8		
OHU-1	2층 사무실 존	19,959	23,018	12	8		
OHU-2	3,4층 실험실 존	29,381	34,039	15	간헐		
MOHU-1	실험실 Make up용	140,712	165,795	-	간헐		
	소 계	236,241	262,707				
2. 지열히트펌프 (Water to Air)							
GTHP-1	실험실 지역	103,758	110,255		간헐		
	소 계	103,758	110,255				
	합 계	339,999	372,962				지열히트펌프(Water to Water, Water to Air)

등 실내공조부하가 필요하다.

시스템은 물-물(Water to Water), 물-공기(Water to Air) 열펌프시스템(용량 145 RT)을 설치하였으며, 상세한 내용은 표 2와 같다.

3.2 적용시스템의 구성개요

1) 지중열교환기

수직형으로 직경150mm, 깊이 150m의 보어 홀(bore hole)에 직경 32mm 정도의 폴리에틸파이프(HDPE)를 삽입하여 벤토나이트와 실리카샌드 등의 그라우팅재를 혼합하여 그라우팅 처리한다. 총 소요 지중열교환기의 길이는 4,350m가 된다.

2) 지열원 열펌프

물-공기 열펌프(Water to Air Heat Pump)는 3층과 4층의 실험실 존에 적용하여 개별운전이 되도록 구성하고, 물-물 열펌프(Water to Water Heat Pump)는 연구실 및 사무실 존의 IAV(Increasing Air Volume)유닛에 냉수와 온수를 공급하도록 구성하였다. 또한 외기처리용 공조기에는 물-물 열펌프에서 냉온수를 공급하도록 한다.

3) 지열원측 브라인 순환펌프

1차순환과 2차순환펌프에는 Decoupled 방식을 채택하여 2차순환 펌프는 존별로 설치하고 존별 사용시간 및 부하에 따라 사용함으로써 에너지를 절약하고, 또한 1차순환펌프 가동이 없이 바이패스라인을 이용하여 환절기와 시험실 냉방운전에서 방출되는 열을 사무실 난방으로 이용할 수 있도록 한다.

4) 성능평가

존별로 2차 순환펌프를 설치하여 수열원 공급라인과 환수라인의 온도 차, 유량을 측정할 수 있도록 하여 지열원 열펌프의 유용성과 경제성을 평가하기 위한 자료로 활용할 수 있도록 구성한다.

5) 하이브리드시스템

밀폐형 냉각탑을 설치하고 지중열교환기의 해더에서 배관을 조정하여 하이브리드형 시스템의 유효성을 평가할 수 있도록 구성한다.

6) 물-물 열펌프

냉온수기 대신에 물-물열펌프를 설치하여 IAV 유닛 열원으로 공급하고, 열펌프성능 및 IAV 유닛 성능을 시험할 수 있도록 한다.

7) 부분부하운전

각각의 실험실에 물-공기 열펌프를 설치하여 개별제어 함으로써 중앙에서 열원을 공급하는 냉온수+팬코일(IAV유닛)방식에 비해 효율적인 부분부하운전이 가능하도록 구성함으로써 에너지 절약 효과를 최대한 높일 수 있도록 한다.

8) 축열조설치

지열원 열펌프의 초기투자비와 운전비의 절감방안을 도출하고, 운전효율을 최대한 높일 수 있는 방안을 정립하기 위한 실험을 수행하기 위해 수 축열조의 설치를 강구한다.

9) 원격 자동운전/관리시스템 구축

운영비의 절감과 운전관리의 효율을 기하기 위하여 모든 운전을 자동화 함으로써 무인화가 가능하도록 제어시스템을 구성하였다. 또한, 인터넷을 이용한 원격운전 및 관리가 가능하도록 구성함으로써 향후 지열원 열펌프시스템의 자동제어 모델을 제시한다.

3.4 지중 온도분포 고찰

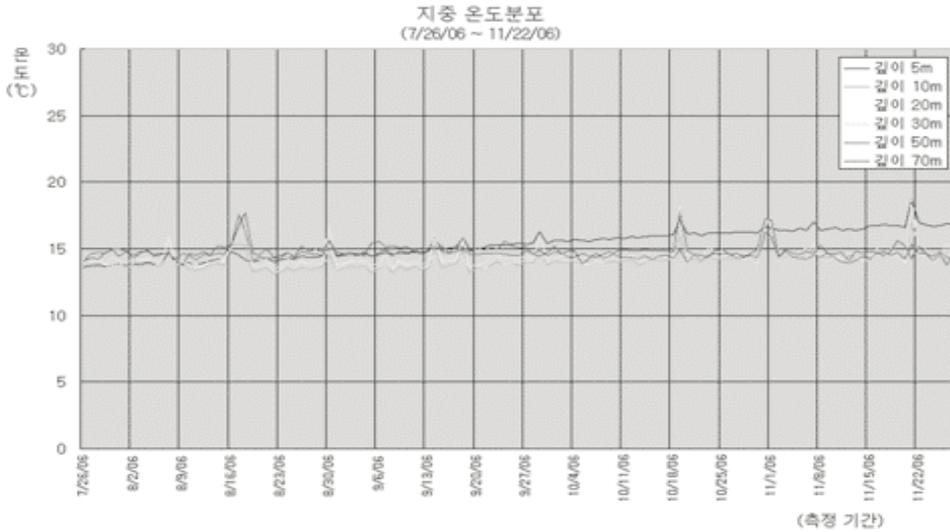
수직형 지중 열교환기를 이용한 냉난방시스템의 운전에 따른 지중 온도분포를 확인하기 위하여 지중 5m, 10m, 20m, 30m, 50m 그리고 70m까지의 열전대를 삽입하고 연중 온도분포를 그림 3에서 그림 5까지 나타내고 있다.

그림 3에서 그림 5까지에서 지중 5m를 기준으

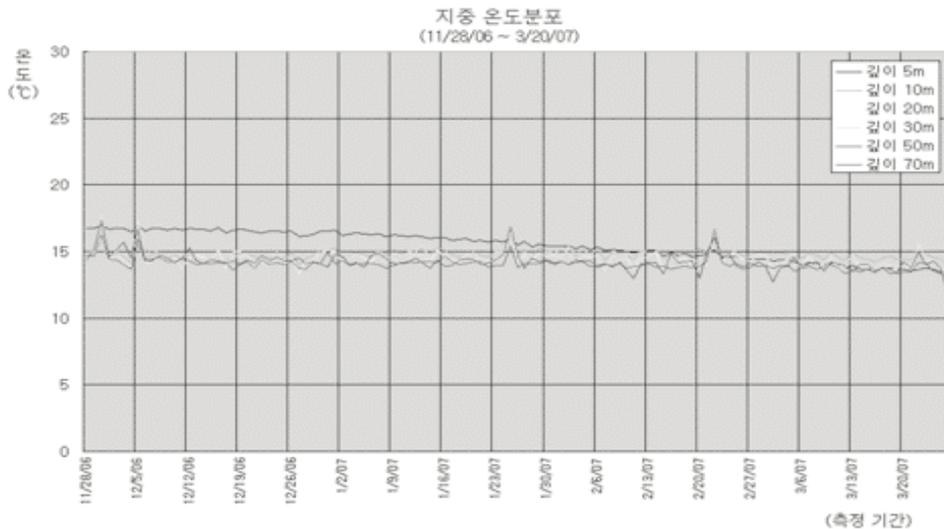
로 볼 때, 냉방 운전기간에서는 1~2℃ 이내에서 약간 상승함을 보여주고 있으며, 냉방운전이 종료되는 시점에서 지중온도는 계속 상승함을 보여 비냉방기간 동안 결국에는 3~4℃ 정도 상승함을 보여주고 있다. 하지만 난방운전이 시작되면서 지중온도는 완만한 하락세를 보여주며, 역시 난방운

전이 끝나고도 지중온도는 계속 하락하여 결국은 냉방운전이 시작되는 시점에서 볼 때는 상승과 하락이 비슷한 폭으로 나타나기 때문에 냉난방운전의 열평형이 이루어짐을 확인할 수 있었다.

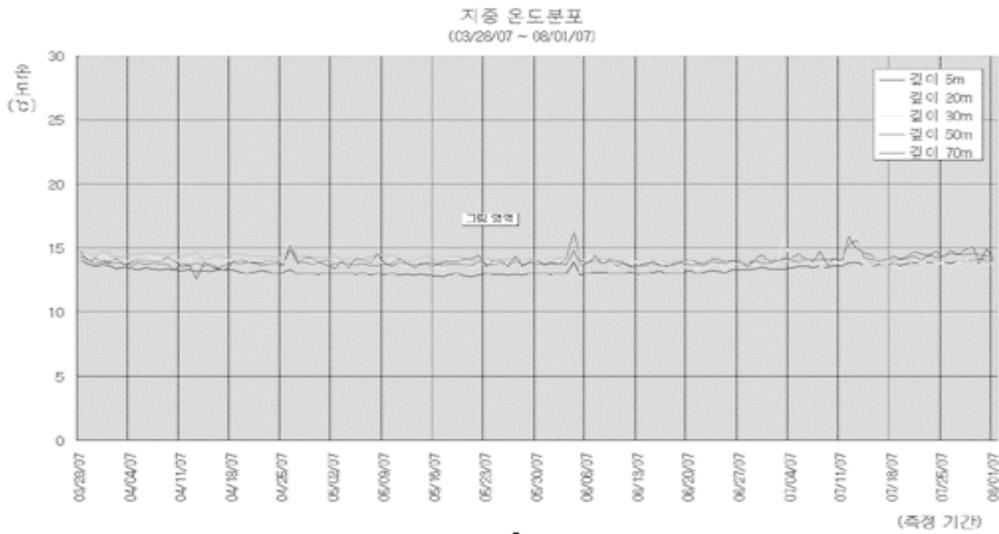
다만, 10m 이상의 지중 온도분포는 5m와 비슷한 양상을 보이고 있지만, 전체의 온도상승과 하



[그림 3] 지중 온도분포(7/26/06 - 11/22/06)



[그림 4] 지중 온도분포(11/28/06 - 3/20/07)



[그림 5] 지중 온도분포(3/28/07 - 8/01/07)

락폭이 1~2℃ 이내에서 이루어지고 있기 때문에 이에 대한 변화폭은 크지 않다고 볼 수 있다.

따라서, 지중 150m까지 설치된 수직형 지중 열교환기를 이용한 냉난방시스템의 지중온도분포는 상기의 고찰을 통하여 유추할 수 있으며, 그동안 추측으로만 여겨지던 냉난방시스템의 지중 온도분포에 대한 균형유지가 이루어지고 있음을 확인할 수 있지만, 1회성이 아닌 장기간의 온도분포에 따른 지중 온도분포의 필요성은 아직 남아있다고 할 수 있다.

4. 결론

에너지원의 대부분을 수입에 의존하는 국내의 실정을 감안할 때 대체에너지 이용을 활성화시키는 것이 필요하다. 미국을 비롯한 유럽 등의 선진국에서는 지열 에너지를 이용한 냉난방 시스템 기술이 보편화 되어있다. 반면 우리는 일부 소규모 상업용 건물에 제한적으로 사용하고 있다. 이는 아직 도입 초기단계인 국내의 현실도 있지만, 지열원 시스템에 대한 기술적인 검증이나 보급 활성화를 위한 제도적 장치 마련 및 이미 설치된

시스템을 대상으로 성능 및 경제성 분석 등과 같은 일련의 활동이 저조한 것에도 원인이 있다.

우리보다 에너지 사정이 좋은 나라에서도 지열 에너지를 활용하는 기술개발을 국가적인 정책으로 정착시키고 있는 상황을 볼 때, 국내에서도 지열 에너지를 회수하여 건물의 냉난방 및 온수 급탕용 시스템으로 활용할 수 있는 지열원 시스템을 개발함으로써 장차 에너지 수요변화에 적극적으로 대처해 나가고 또한 정부의 에너지 수급정책을 효과적으로 달성하는데 일조할 수 있는 방법 중의 하나라는 점에서 지열원 시스템의 활성화는 필수적이다.

따라서, 국내에서 많이 사용되고 있는 수직형 지중 열교환기를 적용한 냉난방시스템의 운전에 따른 지중 온도분포를 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 지중 5m를 기준으로 볼 때, 냉방 운전기간에서는 1~2℃ 이내에서 약간 상승함을 보여주고 있으며, 냉방운전이 종료되는 시점에서조차 지중온도는 계속 상승함을 보여 결국에는 3~4℃ 정도 상승함을 보여주고 있다.
- 2) 난방운전이 시작되면서 지중온도는 완만한

하락세를 보여주며, 역시 난방운전이 끝나고 도 지중온도는 계속 하락하여 결국은 냉방운전이 시작되는 시점에서 볼 때는 상승과 하락이 비슷한 폭으로 나타나기 때문에 결국은 냉난방운전의 열평형이 이루어짐을 확인할 수 있었다.

- 3) 10m 이상의 지중 온도분포는 5m와 비슷한 양상을 보이고 있지만, 전체의 온도상승과 하락 폭이 1~2℃ 이내에서 이루어지고 있기 때문에 이에 대한 변화폭은 크지 않다고 볼 수 있다.
- 4) 지중 150m까지 형성된 수직형 지중 열교환기를 이용한 냉난방시스템의 지중온도분포는 상기의 고찰을 통하여 유추할 수 있으며, 그동안 추측으로만 여겨지던 냉난방시스템의 지중 온도분포에 대한 균형유지가 이루어지고 있음을 확인할 수 있지만, 1회성이 아닌 장기간의 온도분포에 따른 지중온도분포의 필요성은 아직 남아있다고 할 수 있다.

참고문헌

1. DOE, 2001, Ground-source heat pumps applied to federal facilities-second edition, Federal Energy Management Program, DOE/EE-0245, PNNL-13534, US Department of Energy, Washington D.C.
2. Pahud, D. and Matthey, B., 2001, Comparison of the thermal performance of double U-pipe borehole heat exchangers measured in situ, Energy and Buildings, Vol. 33, pp. 503-507.
3. Leong, W. H., Tarnawski, V. R. and Aittomaki, A., 1998, Effect of soil type and moisture content on ground heat pump performance, Int. J. Refrigeration, Vol. 21, pp. 595-606.
4. Kavanaugh, S. P., and Allan, M. L., 1999, Testing of thermally enhanced cement ground heat exchanger grouts, ASHRAE Trans., Vol. 105, pp. 446-450.
5. Allan, M. L., 2000, Materials characterization of superplasticized cement-sand grout, Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 937-942.
6. Sohn, B. H., Cho, C. S., Shin, H. J., and An, H. J., 2004, Cooling and heating performance evaluation of a ground source heat pump. Proceedings of the KSME 2004 Spring Annual Meeting, pp. 2117-2122.
7. Carslaw, H. S., and Jaeger, J. C., 1947, Conduction of Heat in Solids, Oxford, Clarendon Press.
8. Zhang, Q., 1999, Heat transfer analysis of vertical U-tube heat exchangers in a multiple borehole field for ground source heat pump systems, Ph.D. dissertation, University of Kentucky, Lexington.
9. EPRI, 1993, Soil and rock classification for the design of ground-coupled heat pump systems: field manual, EPRI CU-6600. 