특집

송도U-City 지열시스템 설계 및 시공사례

김 상 훈*, 심 두 보**, 신 정 삼**
*LIG엔설팅 에너지사업팀, **LIG엔설팅 신재생에너지팀

1. 기본방향 및 개요

1.1 기본방향

송도 U-city 홍보체험관 및 복합환승센터 건설공사는 시대변화에 적극 대응하는 미래지향적인 첨단시스템 구축을 기본방향으로 쾌적성, 환경친화성, 경제성 및 안전성 확보를 목적으로 다양한 첨단기술이 반영되었다. 본 고에서는 에너지 고갈 및 환경문제에 대한 대안으로 적용된 지열시스템의 설계 및 시공사례에 대하여 소개하고자 한다.

1.2 건축개요

표 1은 건축개요로 대상건축물은 지하 2층, 지상 6층 연면적 44,799.10m²이며, 주요시설은 홍보체험관, 환승센터, 멀티플렉스 및 상가로 구성된다. 이중 지열시스템을 사용시간이 상대적으로 긴 관리운영시설(도시통합운영센터)에 적용하여 에너지 및 환경부하를 효과적으로 절감할 수 있도록 계획하여 설치하였다.

<표 1> 건축개요

구 분	내 용
사 업 명	송도 U-city 홍보체험관 및 복합환승센터 건설공사
지역지구	일반상업지역, 제1종 지구단위계획구역
대지면적	31,697.50m²
건축면적	10,017.94m²
연 면 적	44,799.10m²
건축규모	지하 2층, 지상 6층
주요시설	홍보체험관, 환승센터, 멀티플렉스, 상가

2. 지열시스템 일반사항

2.1 지열시스템의 특장점

지열 히트펌프가 지니는 가장 큰 특징은 지열을 열원으로 사용한다는 점이다. 대부분의 건축물에 적용되고 있는 냉동기나 보일러의 경우 에너지비용을 사용자가 부담해야하는 화석연료나 전기를 이용하지만, 지열 히트펌프에서 사용하는 에너지의 대부분이 지열이며, 약간의 전기가 소비되기 때문에 지열에너지는 사용자의 에너지비용 부담이 극히 적은 무한의 자원이다.

2.2 지열 냉난방 시스템의 구성

지열히트펌프시스템은 지열을 열원으로 이용하는 냉난방시스템으로 크게 지중 열교환기와 히트펌프로 구성된다. 냉동사이클을 기본으로 한다는 측면에서는 일반냉동기와 동일하나 응축기(증발기)를 지중에 설치한다는 점에서 구조적인 차이가 있다. 즉, 냉방사이클에서의 지열 히트펌프는 실내에서 흡수한 열을 지중열교환기를 통해 지중으로 방출하며, 반대로 난방사이클의 경우에는 지중 열교환기는 지중에서 열을 흡수하여 실내로 공급한다.

2.3 지중 열교환기의 구성

지열 시스템의 중요 구성요소인 지중 열교환기는 전체 시스템의 성능과 초기 설치비를 결정하는 주요 기기이며, 지중 열교환기의 성능은 열교환기 파이프 내를 순환하는 유체와 파이프 주변 매질간의 열전달과 밀접한 관련이 있으며 다음과 같이 구성된다.

(1) 공급헤더, 환수헤더

공급헤더와 환수헤더는 히트펌프와 지중 열교환기의 공급, 환수부에 위치하며 브라인을 순환시킨다. 헤더의 연결은 PE 열융착에 의하여 긴밀하게 융착된다.

(2) 루프

공급헤더로부터 지중의 홀이나 트렌치를 지나 환수헤더로 연결되는 지중 열교환기의 관군이며 실내 부하 및 히트펌프 부하를 실질적으로 지중에 방열 또는 축열하는 역활을 한다.

(3) 리버스 리턴

각각의 루프를 흐르는 유체의 입, 출구의 순환압력을 일정하게 유지하여 균일한 유량흐름을 하기위하여 파이프의 연결은 역환수배관을 적용한다.

(4) U BEND

지중 홀의 바닥부나 트렌치의 끝부분에 사용되며 부동액의 흐르는 방향을 역방향으로 변화시키는 U자형 연결파이프

2.4 냉난방 사이클

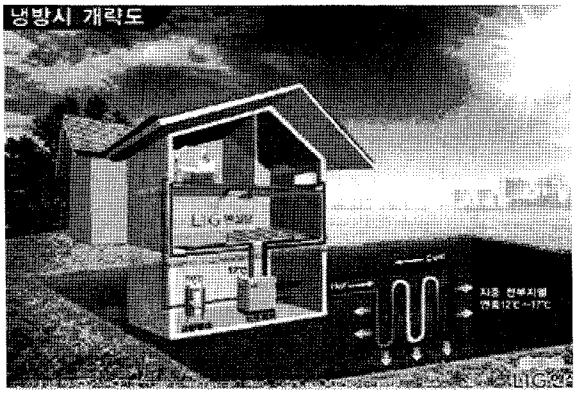
그림 1, 2에 지열히트펌프 시스템의 냉난방 사이클을 각각 나타냈다. 하절기에는 실내의 열을 히트펌프로 흡수하여 지중열교환기를 통하여 지중으로 방출하고 동절기에는 지중열교환기를 통하여 땅속의 열을 히트펌프로 흡수하여 실내로 방출한다. 지열 루프는 열교환기의 역할을 하고, 파이프의 성능, 땅의 열용량, 부동액의 유량 등에 따라서 이 열교환기의 성능이 결정이 되게 된다. 물대물 방식의 경우에는 바닥난방, 공조기, 팬코일유니트와 조합하여 사용하는 것이 일반화 되어 있다.

3. 지열시스템 설계

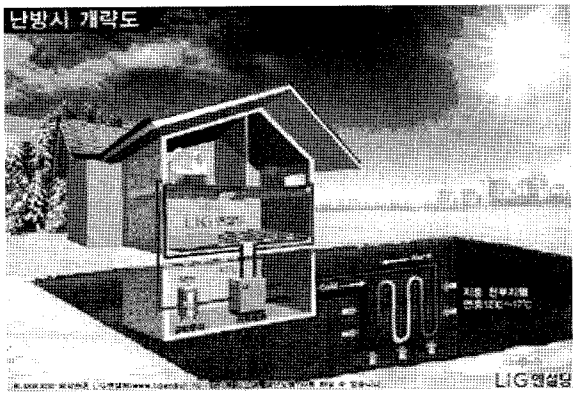
3.1 지열히트펌프 시스템 설계절차

지열히트펌프 시스템의 설계를 위해서는 **그림 3**에 나타낸 바와 같이 대상건축물 냉난방 부하계산 → 대상건축물 현장상황 파악 → 지중 열교환기 및 시스템 일반형식 결정 → 표준사양에 의한 지열시스템 기본설계 → 시험천공 → 열전도 테스트 및 데이터 작성 → 지중 열교환기 사양 확정 → 시스템 및 장비설계의 절차를 거친다.

위의 지열히트펌프 시스템 설계과정에서 설계자의 결정이 필요한 사항과 고려사항을 정리하면 다음과 같다.



[그림 1] 냉방사이클



[그림 2] 난방사이클

1) 지중 열교환기 타입 – 수직형, 수평형 선택은 유효공간, 토질 및 경제성에 의하여 결정된다. 즉, 수직형은 이용할 수 있는 토지의 면적이 좁을때 적용되고, 수평형은 암반층이 없는 넓은 공간이 있으면 주로 적용된다.
2) 순환유체 흐름 – 직렬흐름방식은 하나의 관로로 유체가 흐르는 반면 병렬흐름방식은 2개 이상의 관로로 유체가 흐른다. 직렬흐름방식은 관로의 관경이 커지기 때문에 비용이 많이 들지만 관로의 단일화로 관내 공기를 배출하기 용이하다. 병렬흐름방식은 관로내의 공기를 제거하기위하여 설계 및 설치에 세심한 주의가 필요하다. 어떠한 방식을 적용할지는 최소의 비용으로 최대의 효과를 도모할 수 있는지에 대한 검토를 통하여 결정된다.
3) 지중 열교환기 재질 – 폴리에티렌이나 폴리부티렌 재질의 파이프가 지중 열교환기로 사용되며, 유동성이 있고 열을 가함으로써 융착이 가능하다.
4) 지중 열교환기 관경 – 순환유체와 파이프 내부 벽면의 효과적인 열전달을 위하여 레이놀즈수 2500 이상의 난류를 발생시켜야한다. 따라서 압력강하와 열전도 성능을 고려하여 배관의 재질 및 관경을 결정해야한다.
5) 지중 열교환기 길이 – 유량과 허용되는 압력강하를 고려하여 유체순환이 충분하도록 한다.
6) 순환펌프 – 배관의 마찰특성 및 유체의 종류에 따라 용량을 결정한다. 특히 유체에 Calcium Chloride, Propylene Glycol, Methanol 등의 부동액이 첨가되어 압력강하 특성이 변화하므로 이를 고려해야한다.

3.2 지중 열전도도 테스트

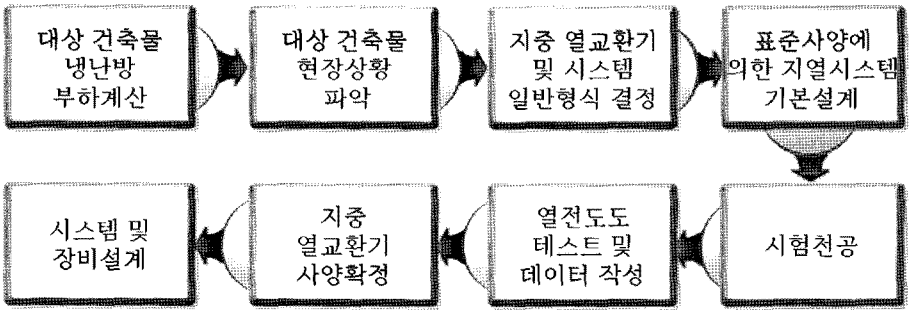
지열 히트펌프 가동 시 여름에는 실내의 발열을 지중으로 방출하고 겨울철에는 반대로 실내의 한기를 지중으로 전달하여야 하므로 지중 열전도에 대한 측정은 지열시스템 설계에서 중요하다.

송도 U-city 홍보체험관 및 복합환승센터의 지열시스템의 열 열용량을 평가를 위해 지중 열전도도 테스트를 수행하였으며, 지중 열전도도 테스트는 현장의 열교환기 설치를 위하여 설치한 샘플 천공홀을 기준으로 실시 일정한 열부하를 보어홀에 주입하면서 지중 열교환기 내부를 순환하는 유체의 온도변화의 경사도 및 주입된 열량을 기준으로 하여 측정하였다.

열전도도를 구하기 위한 현재 가정 일반적이고 정확하게 산출하는 방법은 Line-Source 이론에 의하여 계산하는 방법으로 계산할 수 있다.

$$k = \frac{Q}{4\pi \times L \times Slope}$$

k = 열전도도　　Q = 열주입량
π = 3.14　　L = 천공홀 깊이
Slope = 대수시간에 대한 온도곡선의 기울기



[그림 3] 지열히트펌프 시스템 설계절차

측정된 데이터(입출구 온도값)는 측정시간에 대하여 지중 열교환기 입, 출구의 온도변화 곡선으로 나타나게 된다. 이를 측정시간에 대한 대수곡선으로 배열하여 측정값에 대한 기울기를 구하면 열전도도를 측정할 수 있다.

표 2와 **표 3**은 지중 열전도도 테스트 준수조건과 당 건축물에 적용된 열전도도 테스트 계획이다.

테스트 결과를 X축에 대하여 시간에 대한 데이터 측정 회수로 보았을 때 **그림 5**는 측정회수에 대한 X의 자연수축 그래프이며 **그림 6**은 X의 로그축 그래프이다.

송도 U-city 홍보체험관 및 복합환승센터의 지중 열전도도 테스트 결과 및 이를 바탕으로 지중열교환기 설계프로그램에서 산출된 결과를 아래에 나타냈다.

1) 조건 : 지중 열전도도 : 2.889 W/m
시추공 개수 : 총 80개(홀당 깊이 142m)
시추공 간격 : 5m

2) 결과 : 홀당 지열교환기 필요길이
냉방기준 – 128.7m, 냉방기준 여유율 – 9.4%
난방기준 – 134.8m, 난방기준 여유율 – 5.1%

3.3 지열히트펌프 시스템 설계

송도 U-city 홍보체험관 및 복합환승센터의 지열시스템은 옥외 지중열교환기와 기계실 히트펌프, 순환펌프, 자동제어시스템으로 구성되며 지열히트펌프에서 생산한 냉온수를 공조기 및 팬코일 유니트에 공급한다.

1) 지열 히트펌프 선정
– 총 용량 : 824 kW (냉방), 837 kW (난방)
– 히트펌프 용량 : 164.8 kW × 5대(냉방기준)

2) 지열방식 결정
– 지중열교환기 방식 : 수직밀폐형
– 천공홀 : 142m, 80공

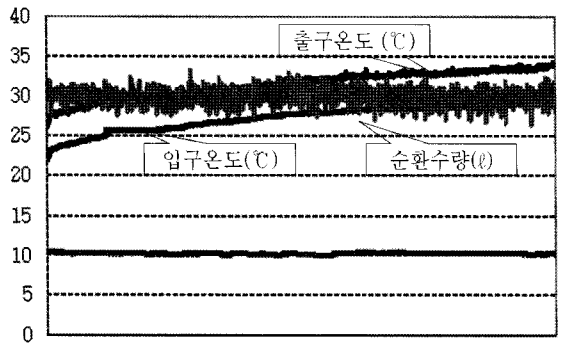
3) 지열시스템 계통도(**그림 6** 참조)

<표 2> 지중 열전도도 테스트 준수조건(에너지관리공단 기준)

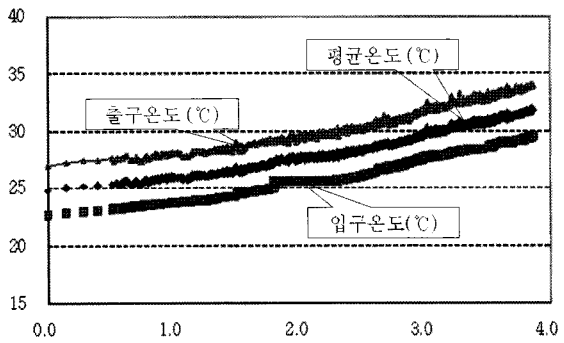
분 류	관련규정(ASHRAE, IGSHPA규정 참조)
총 측정시간	48시간 이상
해석방법	Line Source Method에 의해 해석
전압편차	표준전압의 1.5% 이내
Loop온도차	3.5 ~ 7℃
히터용량	공급되는 열량은 1미터당 50 ~ 80W
데이터취득간격	10분 이하
열전도도측정시기	그라우팅 완료후 72시간 이후

<표 3> 열전도도 테스트 계획

분 류	송도 U-city 홍보체험관 및 복합환승센터 테스트계획
시험시간	48시간 이상
해석방법	Line Source Method에 의해 해석
전력편차	현장 지열열전도 테스트 전용의 공사전력 사용
히터용량	≒ 10 kW 적용
순환유량	레이놀드 2,500 이상의 유량을 순환



[그림 4] 지중 열전도도 테스트 결과-1



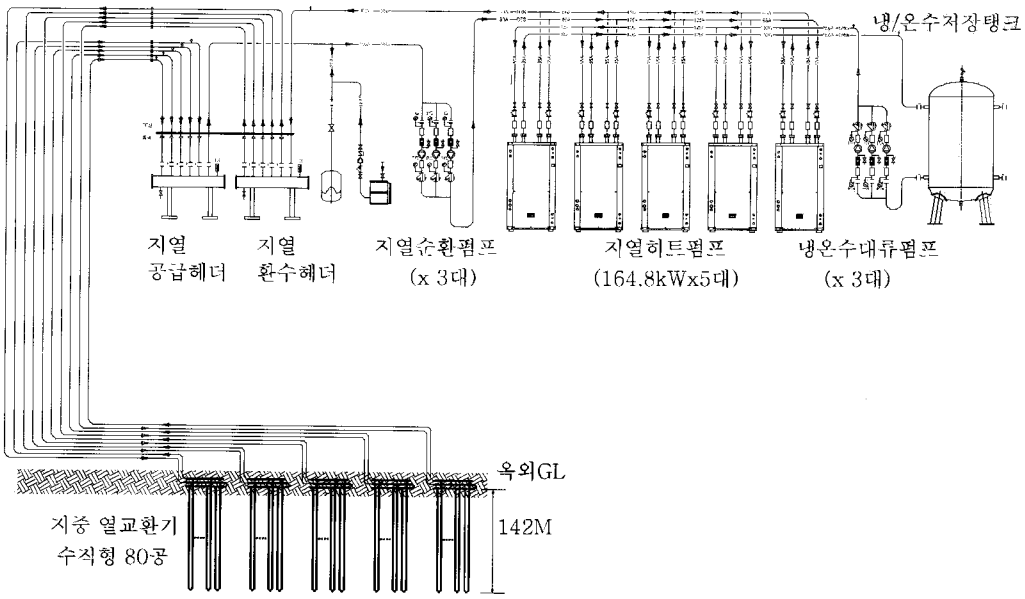
[그림 5] 지중 열전도도 테스트 결과-2

4. 지열시스템 시공

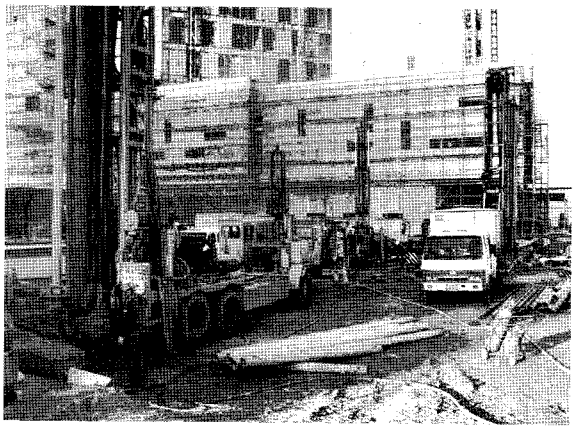
4.1 천공 및 지중 열교환기 설치

지중 열교환기 매설을 위한 천공은 일반 지하수 개발과 동일한 공정으로 진행이 되며 일반적인 밀폐형 지열의 경우 굴진심도는 100 ~ 200m, 지하수이용 개방형의 경우 400m 정도이다. 시공 시 장소에 따라 다량의 지하수가 다량 토출되는데, 암반의 연마가루가 다량 포함되어 있으며 이를 하천수에 방류 시 민원의 발생우려가 있어 방류기준에 적합하도록 침전 또는 슬라임 제거 후 방류하여야 한다.

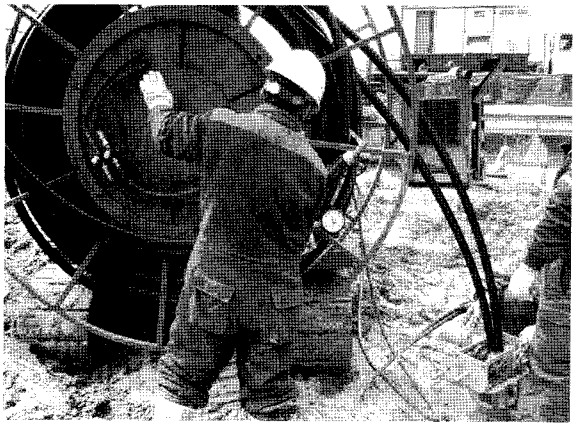
지중 열교환기의 검사 및 설치 공정에서는 지중 열교환 파이프의 손상여부를 점검하여 이상이 없는지 확인한 후, 천공홀에 지중 열교환기를 삽입



[그림 6] 지열히트펌프 시스템 계통도



[그림 7] 천공



[그림 8] 지중 열교환기 삽입

한다. 지중 열교환기를 삽입하는 동안 과도한 꼬임이나 흠집이 생기지 않도록 주의하며 부력상쇄 효과를 위해 지열교환기 내에 물을 채워 설계깊이까지 삽입하며 최종 배관연결 시 까지 열려있는 부분은 이물질이 들어가지 않도록 밀봉한다.

4.2 지중열교환기 압력테스트 및 그라우팅

지중 열교환기를 되묻기 전에 천공부분의 지중열교환기에 물을 채워 압력테스트를 시행한다.

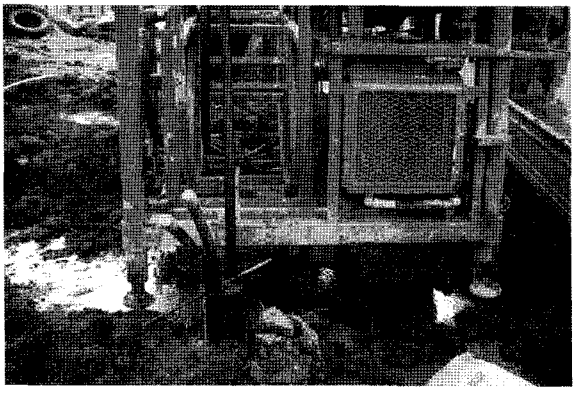
테스트 압력은 수압으로 7kg/cm^2 정도 이며 최소 1시간 이상을 측정하여 압력변화를 확인한다. 자재의 특성 상 초기 가압 후 압력강하가 많으나 안정이 되면 강하속도가 느려지고 압력이 유지된다. 허용압력은 안정 후 1kg/cm^{2}이다. 지열배관은 대개 매립배관으로 상부 복토 및 마감 후에는 보수하기가 까다로우므로 지중 열교환기 삽입 후, 지열 매립헤더배관 융착완료 후, 기계실 지중배관 인입 후 반드시 압력테스트를 실시해야한다.

그리고, 지중열교환기를 설치한 후 열교환기와 천공홀 사이의 빈공간을 채운다. 이는 지중 열교환기와 천공홀 주변의 토양 또는 암석등과 열전달을 촉진하고 표층수의 오염원으로부터 심층지하수를 보호하기 위함이다. 그라우팅 방식으로는 벤토나이트 + 물 또는 여과사 + 상부층 벤토나이트마감 등의 방식이 주로 사용된다. 벤토나이트 그라우팅은 하부에서 슬러리를 토출하여 상부로 토출되는 방식으로 시공하며 그라우팅은 최초 타설 후 몇 시간 방치하면 지하로 일정량 침하하게 된다. 침하량은 지속적으로 3 ~ 4회 보충하여 표층부에서 슬러리를 확인할 수 있어야 한다.

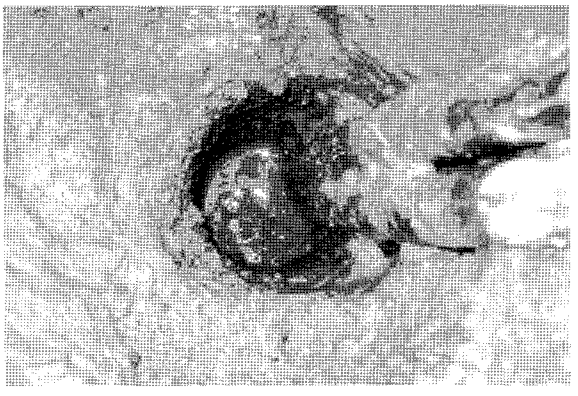
4.3 옥외 배관매립 및 기계실 배관 연결

그라우팅작업으로 지중 열교환기의 설치작업은 종결되며 설치된 지중열 열교환기는 기계실의 히트펌프와 지중매립배관으로 연결된다. 지중배관은 일반적으로 PE융착 방식으로.시공하게 된다. PE 융착작업의 특성상 우천시나 작업장 온도가 -5℃ 이하에서는 작업을 하지 않도록 하며, 매립배관의 융착이 완료되면 매립 전에 반드시 기밀시험을 거친 후 매립한다. 배관은 가능한 직선형태가 되도록 하며, 기계실 방향으로 역구배가 발생하지 않도록 한다. 역구배 발생 시 에어포켓이 형성되면 열교환기 내로 순환수의 흐름이 원활하지 않을 우려가 있기 때문이다. 1차 매립은 관의 손상방지를 위하여 모래를 30cm 채우며 2차 큰 돌을 고른후 굴착토로 상부 50cm를 남기고 매립하게 되며 매설관 경고띠를 두른 후 매립을 완료하게 된다.

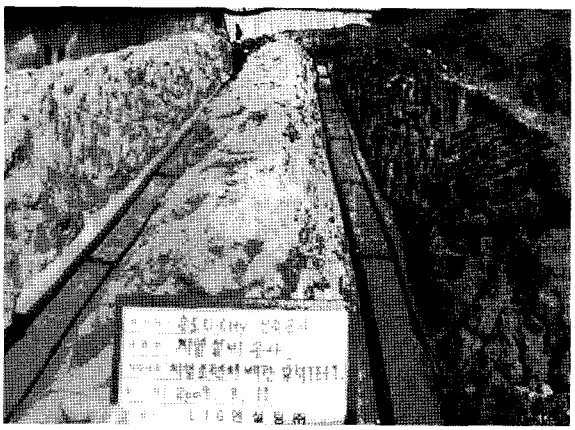
트렌치 작업을 실시한 후 지중열교환기를 존별로 구분하여 분배헤더에 연결하고, 또한 기계실 지열관련 장비 및 히트펌프 설치, 배관작업을 한다. 배관공사는 일반설비의 배관과 동일하나 각



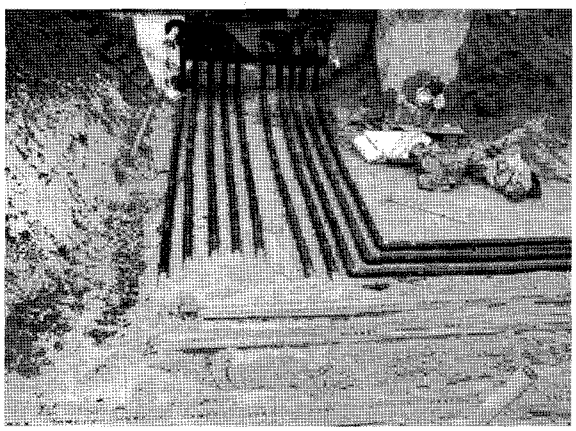
[그림 9] 그라우팅-1



[그림 10] 그라우팅-2

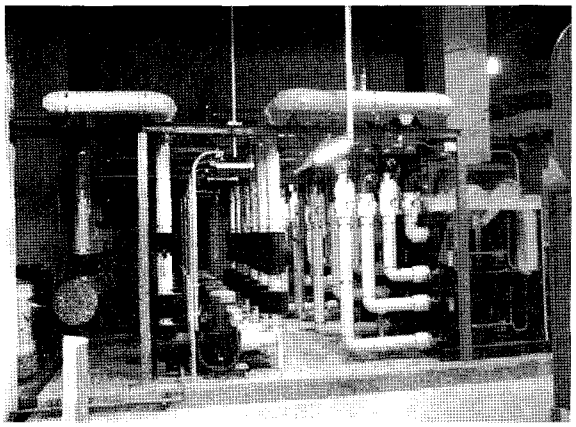


[그림 11] 트렌치 배관-1



[그림 12] 트렌치 배관-2

[그림 13] 기계실배관-1



[그림 14] 기계실배관-2

분배헤더별로 압력계를 설치하여 흐름의 불균형 또는 열교환기의 누수를 체크할 수 있도록 하여야 한다. 밀폐배관은 반드시 플러싱 작업 및 에어퍼징 작업을 하여 지열교환기 및 기계실 배관의 이물질을 제거하여 주어야하며 또한 시스템 배관 내의 공기를 완전히 배출하여 시스템의 운전 및 성능에 영향을 미치지 않도록 주의 한다.

5. 맺음말

송도 U-city 홍보체험관 및 복합환승센터에 적용된 지열시스템에 대하여 소개하였다. "쾌적성", "환경친화성"에 대한 대안으로 적용된 지열시스템을 통하여 송도 U-city 홍보체험관 및 복합환승센터는 시대변화에 적극 대응하는 미래지향적인 건축물이 될 것이다.

그리고, 우리나라는 사용되는 에너지의 대부분을 수입하므로 다른나라보다 적극적으로 에너지 절약과 기후변화협약에 대응해야한다. 이를 위하여 지열시스템 이용기술의 표준화, 설계 및 시공기술의 고도화와 시스템 운전에 대한 신뢰성 확보를 통하여 공공뿐만 아니라 민간으로의 확대적용이 필요하다.