

# 말뚝형 지중열교환기의 개발과 활용

안형준, 백성권  
 코오롱건설(주) 기술연구소 과장

## 1. 개요

지열냉난방시스템은 에너지절감효과가 매우 뛰어난 냉난방설비로 각광받고 있다. 지열냉난방설비의 에너지절감효과는 결국 지중열교환기를 통해 안정적인 열원(Heat source, Heat sink)을 확보할 수 있기 때문이다. 하지만 지중열교환기의 설치는 쉽지않은 토목공사이기 때문에 많은 초기 투자비가 필요하며 공사의 신뢰성도 낮아져 지열냉난방시스템의 보급에 걸림돌이 되기도 한다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 지중열교환기를 별도로 설치하는 방식이 아니라 기존 건설공사에서 사용되는 구조물을 지중열교환기로 사용하고 자 하는 시도가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 시도중에서도 가장 활발하게 개발되어 활용되고 있는 기술이 바로 말뚝을 이용한 지중열교환기 기술이다.

지열냉난방시스템은 건물의 냉난방용도로 사용되는 것이고 이에 따라 건물의 구조체를 이용하는 것이 가장 적합한데 이중에서도 지중에 가장 깊이 설치되는 말뚝을 이용하는 것이 타당할 것이다. 특히 우리나라의 경우 아파트와 같은 대규모 고층 건축물이 많고 이에 따라 많은 말뚝이 사용되고 있으므로 말뚝형 지중열교환기의 활용성이 높아 향후 유용하게 쓰일 것으로 판단된다. 따라서 본 기사에서는 해외의 말뚝형 지중열

교환기 개발 및 활용사례와 함께 국내의 말뚝형 지중열교환기 개발현황 및 향후 활용방안을 소개하고자 한다.

## 2. 말뚝형 지중열교환기 소개

### 2.1 말뚝형 지중열교환기 개요

말뚝(Pile)이란 사전적으로 무엇을 받치기 위하여 박아 세우는 기둥 모양의 것을 의미하며 일반적으로는 건물이나 교량 등을 지탱하기 위해 땅속에 박아세우는 구조물을 의미한다.

일반적으로 말뚝은 재질과 타설방법에 따라 다음과 같이 여러 가지로 나누어 진다.

#### 1) 나무 말뚝

- 육송, 해송 등의 재질로 만들어진 말뚝

#### 2) 콘크리트 말뚝

- 기성말뚝 : 공장에서 제작된 말뚝으로 전신주로 사용되는 콘크리트 기둥과 형태가 유사하다. 기성 콘크리트 말뚝에는 회전 원심력을 주어 강도를 증가시킨 PHC말뚝(Pretensioned spun High strength Concrete pile)이 주로 사용된다.

- 현장타설말뚝 : 현장에서 철근망과 거푸집을 만든 후 콘크리트를 타설하여 양생하여 제작된 말뚝으로 일반적으로 콘크리트건물의 기둥을 만드는 방법과 동일하게 제작되는 말뚝이다.

3) 강 말뚝

- 강관 말뚝 : 강관형태로 제작된 말뚝
- H 말뚝 : H자 단면을 가진 강관을 이용하는 말뚝

이상과 같은 말뚝 중에서 주로 적용가능한 말뚝은 콘크리트 말뚝과 강관말뚝이다. 말뚝형 지중열교환기는 기존의 수직폐쇄형 지중열교환기를 대체하는 것으로 볼 수 있다.

그림 1과 같이 기존의 수직폐쇄형 지중열교환기는 직경 150 mm의 지하수공을 굴착하고 그 안에 HDPE재질의 파이프를 매설한 후 지하수공의 빈공간을 벤토나이트나 모래, 시멘트 등으로 메꾼 형태로 설치된다. 지중열교환기의 열교환원리를 살펴보면 HDPE파이프내부에 물, 부동액 등의 열매체를 순환시키면 지반에 열전도가 발생하면서 열매체와 지반이 열을 주고 받아 열교환이 일어나게 된다.

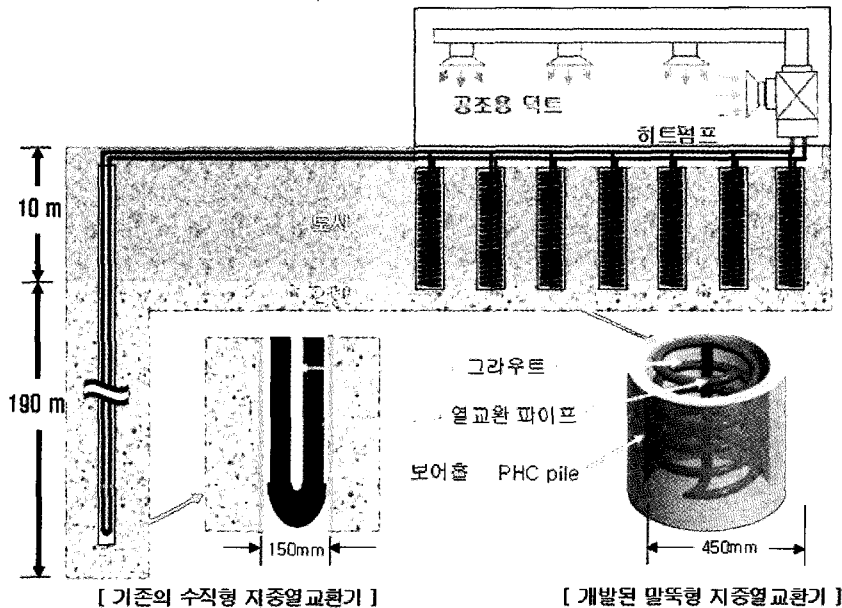
말뚝형 지중열교환기도 이와 동일한 원리로 설치되는데 단지 차이가 있다면 수직폐쇄형 지중열

교환기는 지하수공을 굴착하여 그안에 열교환파이프를 삽입하는 것이고 말뚝형 지중열교환기는 별도의 지하수공을 굴착하지 않고 이미 기초부에 존재하는 말뚝의 중공부에 삽입한다는 차이점이 있을 뿐이다.

말뚝형 지중열교환기의 장점은 지하수공을 별도로 굴착하지 않기 때문에 지하수공 굴착공사비가 절감된다는 것과 기존의 말뚝설치 공정에 열교환파이프를 삽입하는 공정을 포함시켜 지중열교환기의 설치를 단순하고 신뢰성있게 수행할 수 있다는 점이다.

일반적으로 지열난방시스템 설치비용 중 약 50%가 지중열교환기 설치비용이고 이중 약 50%가 지하수공 굴착비용이므로 결론적으로 전체 지열난방시스템 설치비용 중 25%를 절감할 수 있는 큰 장점을 가지게 되는 것이다.

반면 말뚝형 지중열교환기는 여러 가지 단점도 있는데 가장 큰 단점은 지중열교환기의 설치심도를 마음대로 조절할 수 없다는 점이다. 일반적으로 수직폐쇄형 지중열교환기는 100~200 m 깊이



[그림 1] 수직형 지중열교환기와 말뚝형 지중열교환기의 비교

로 설치되는데 건물기초용 말뚝은 10~20 m 정도로 매우 짧다. 따라서 동일한 부지에서 얻어낼 수 있는 지중열원이 대폭 감소하는 결과를 낳게 된다. 또한 말뚝의 설치에 건물의 구조적인 계산에서 결정되는 것이므로 지중열교환기로서 최적의 성능을 발휘하도록 말뚝의 위치를 조절하는 것을 불가능하다.

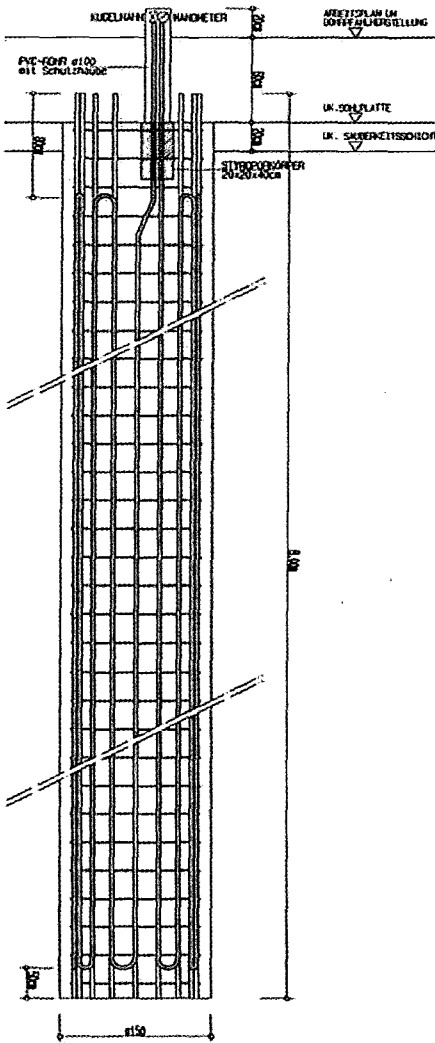
따라서 말뚝형 지중열교환기는 이러한 장단점을 고려하여 다른 지중열교환기나 열원을 복합사용

하는 형태로 사용되는 것이 적합하며 이러한 적용을 통해 공사비를 줄이고 시공도 간편하게 할 수 있을 것으로 판단된다.

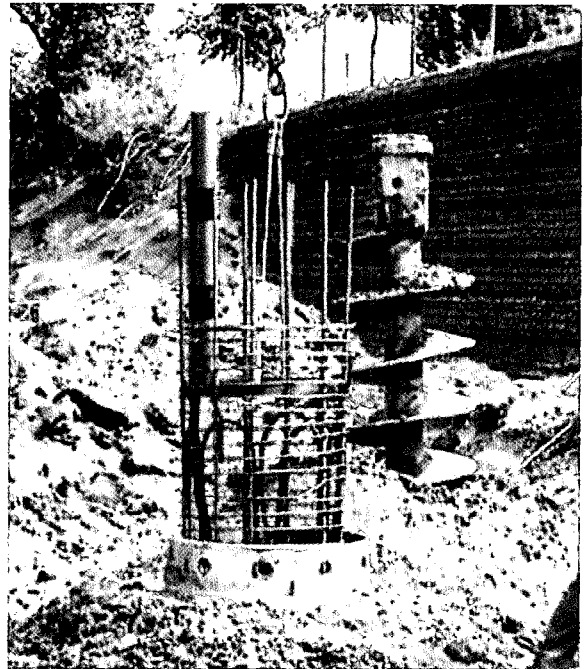
## 2.2 해외의 말뚝형 지중열교환기 개발 및 활용 사례

말뚝형 지중열교환기를 처음 적용한 사례는 신재생에너지 선진국인 독일에서 찾아볼 수 있는데 1990년대 중반부터 말뚝형 지중열교환기 개발에 착수하여 주로 대형 상업용건물 위주로 적용하고 있다. 그 중 대표적인 것이 Enercrete라는 말뚝형 지중열교환기인데 대구경 현장타설말뚝에 열교환 파이프를 설치하여 말뚝형 지중열교환기로 사용하는 기술로 그림과 같은 방식으로 설치되고 있다.

말뚝형 지중열교환기의 핵심기술은 열교환 파이프를 어떻게 설치하여 열교환을 원활하도록 설계하는가의 문제이다. 현장타설 말뚝의 경우 먼저 말뚝이 설치될 위치에 대구경(600~1500 mm)의 천공을 실시한 후 이 안에 철근망이 삽입되는



[그림 2] 파이프배관 단면도



[그림 3] 현장타설말뚝 열교환기 설치모습

데 이 철근망에 열교환파이프를 결속하여 안정적인 열교환이 가능하도록 열교환파이프를 배치하게 된다. 이런 다음 콘크리트를 타설하여 현장타설말뚝이 완성되고 열교환파이프도 기계실까지 연장되어 지열냉난방시스템을 구성하게 된다.

국내에서도 이러한 대구경 현장타설말뚝을 이용한 지중열교환기 설계 및 시공에 대한 소개가 지반공학회를 통해 이루어졌다. 그런데 대구경 현장타설말뚝을 이용한 지중열교환기는 우리나라의 건축환경이 독일과 달라 사용이 어려운 문제가 있다. 우리나라의 경우 대부분의 건축물에서 기초부에 PHC말뚝이나 강관말뚝을 사용하고 대구경 말뚝을 사용하는 사례는 극히 적다. 따라서 국내 건축물에 실제 사용되고 있는 PHC말뚝이나 강관말뚝에 적합한 지중열교환기를 개발해야 활용이 가능하다고 할 수 있다.

### 3. 국내에 적합한 말뚝형 지중열교환기 개발 및 활용방안

#### 3.1 국내 말뚝의 특성

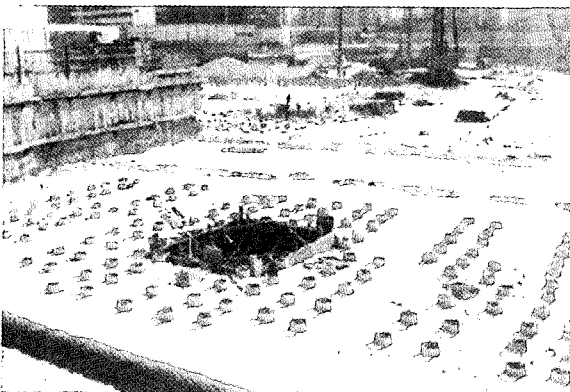
우리나라의 경우 아파트나 고층건물의 하부에 기초구조물로 주로 사용되는 말뚝은 PHC말뚝이나 강관말뚝이다. 그중에서도 특히 PHC말뚝이 공사비가 저렴하여 주로 사용되고 있다. PHC말

뚝은 외경이 대략 300~600 mm정도이며 내경은 200~450mm의 속이 빈 콘크리트 기둥이다. 따라서 PHC말뚝의 중공부에 지중열교환을 위한 열교환파이프를 설치하면 지중열교환기로 사용하기도 적합하다.

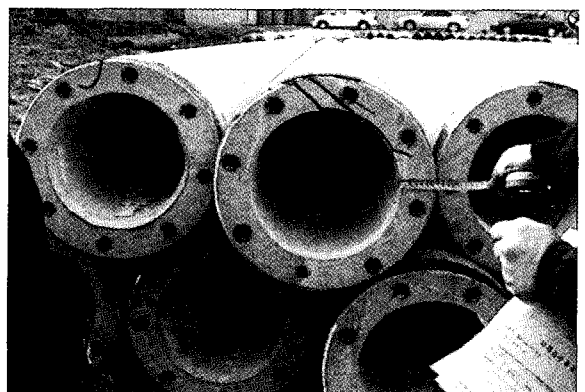
PHC말뚝을 지중열교환기로 이용할 경우의 장점은 다음과 같다.

- 시공비 절감
  - 앞서 살펴본 바와 같이 지하수공 굴착비의 절감을 통해 지중열교환기 설치비를 최대 50% 절감 가능
- 시공 단순화로 공기 절감
  - 별도공정없이 말뚝 공정에 지중열교환기설치작업이 포함되어 시공 단순화
- 효율 증대 및 성능 개선
  - PHC말뚝의 열전도율이 높아 열교환에 유리하며 성능향상
- 시공 부지 절감
  - 건물하부에 지중열교환기를 설치하므로 필요부지 절감
- 고층 건물 적용성 증대
  - 고층건물에 대부분 포함되는 말뚝을 이용하므로 고층건물 적용 유리

이처럼 PHC말뚝을 지중열교환기로 이용하는



[그림 4] 아파트 공사현장의 말뚝 타설 장면



[그림 5] PHC말뚝의 형태

것은 여러 가지 장점을 가지고 있어 기술개발의 필요성이 매우 높지만 또한 실용화를 위해 몇가지 해결해야 할 문제가 있는데 크게 다음과 같다.

- 그라우팅재료의 개발
  - 시멘트 혹은 콘크리트재료를 이용한 그라우팅재료 개발 필요
- 말뚝 및 그라우팅재료의 내구성
  - 지중열교환기의 하절기, 동절기 가동에 따른 온도변화가 발생하므로 이로 인한 피로도 파악
- 열교환 효율 증대 및 성능 개선
  - PHC말뚝의 길이가 수직폐쇄형 지중열교환기에 비해 짧아 열교환 효율 증대 필요

이러한 문제를 해결하기 위해 코오롱건설(주) 기술연구소에서는 산업자원부 산하 에너지관리공단의 지원을 받는 국책과제를 수행하여 중공말뚝형 지중열교환기를 개발하였다. 따라서 본 장에서는 국내에 적합한 중공말뚝형 지중열교환기 개발연구 및 그 결과에 대해 소개하고자 한다.

### 시멘트 그라우트의 열피로도

지열 냉난방 시스템은 재래의 냉난방 시스템 또는 보다 일반적인 공기식 히트펌프에 비해 많은 장점을 가지고 있다. 공기 열원식 히트펌프와는 달리 지열 히트펌프는 여름이나 겨울에 대기온도가 최고값을 기록하더라도 높은 효율과 능력을 유지할 수 있다. 이것은 지반의 저감효과 때문이다. 즉, 대기는 계절에 따라 온도 변화가 크지만, 지표에서 일정 깊이 이하의 지중은 대기의 온도 변화에 영향을 받지 않는 일정온도를 계속 유지한다. 따라서 지열 히트펌프는 겨울에는 열원으로 이용하여 난방하고, 여름에는 열 보관으로 냉방하는 효과를 얻는다. 대부분의 지열 히트펌프 시스템은 따뜻한 물을 제공할 수 있다. 즉, 지열 히트펌프 시스템은 일반적으로 난방과 온수 시스템에 비해 3~5 배 더 효율적이다. 지열 히트펌프를 이용하면 확실한 에너지 절감이 가능하다. 에너지 소비 감소율은 일반 시스템에 비해 난방시 30~

70%, 냉방시 20~50% 정도이다. 지열 히트펌프의 적용분야는 냉난방 공유, 온수 급탕, 스케이트장 유지, 하수도관, 인공호수, 동파를 막기 위한 물 순환 파이프, 슬래브 동결 보수, 교량 및 도로의 결빙 방지와 같은 것들이 있다.

지열냉난방 시스템에서 그라우트의 가장 중요한 역할은 지열교환기와 지반의 열적 단락이 발생하지 않게끔 하는 것이다. 실내의 열을 히트펌프를 통해 운반하는 냉매가 지열교환기를 통과할 때, 열은 그라우트와 지반을 통해 흡수 또는 소산된다. 만약 그라우트가 지열교환기나 지반, 암반과 확실히 결합된 상태가 아니라면, 그 경계면은 열적 불연속면이 되어 공기 또는 물에 의한 단열층으로 작용하게 된다. 실제 이는 지열냉난방 시스템의 효율을 크게 떨어뜨리는 주된 요인이 되고 있으며, 주된 원인은 그라우트의 건조수축, 다른 재료와의 열적 변형 불일치, 그라우팅 방법에 의한 시공불량 등이다.

본 연구에서는 지열교환기로 사용되는 시멘트 그라우트와 PE 파이프의 장기적인 열적 변화를 모사하여 열변형률이 서로 상이한 두 재료간의 분리현상과 장기적인 열적 거동을 알아보려고 한다.

### (1) 실험 개요 및 내용

지열교환기 열피로도 시험의 목적은 말뚝의 중공부를 이용한 지열 냉난방시스템의 개발을 위해 타설되는 시멘트 그라우트와 폴리에틸렌 파이프 간의 가열과 냉각으로 인한 피로도를 검증하기 위함이다. 시험재료는 폴리에틸렌 파이프가 삽입된 시멘트 콘크리트로 표 1과 같다.

시험은 2개로 모두 같은 크기의 콘크리트 몰드 안에 U자 형태의 폴리에틸렌(PE) 파이프가 내장

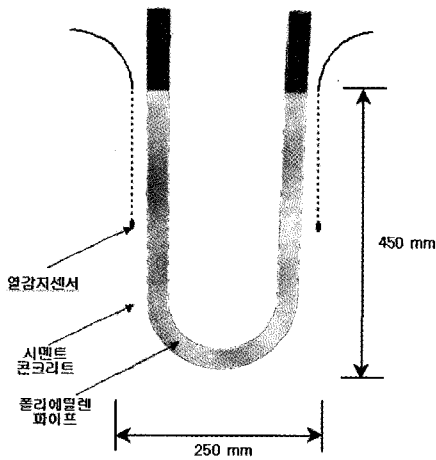
<표 1> 시험 개요

항목	내용
그라우트 종류	시멘트(레프탈, 표준사, 미세고무 분말 함유)
파이프 종류	폴리에틸렌 파이프
시험의 크기 및 개수	Ø25cm×50cm 실린더 2EA

되어 있다. 이 PE 파이프는 지열교환기로 가장 일반적으로 사용하는 재료로 지중에서 이 파이프를 통해 냉각수와 지반이 열교환을 할 수 있도록 하는 역할을 담당하며, 콘크리트와의 부착 정도에 따라 성능이 크게 좌우될 수도 있다.

2개 시료의 차이는 미세고무 분말의 콘크리트 내 포함 유무이며, 이렇게 달리 시험하는 이유는 고무분말이 콘크리트의 팽창성을 증가 시켜, PE 파이프의 열 변형량과의 차이를 줄여 서로 상이한 재료간의 열적 부착성 감소를 방지할 수 있지 않을까하는 의도에서이다.

계측하고자하는 항목은 온도변화에 따른 그라우

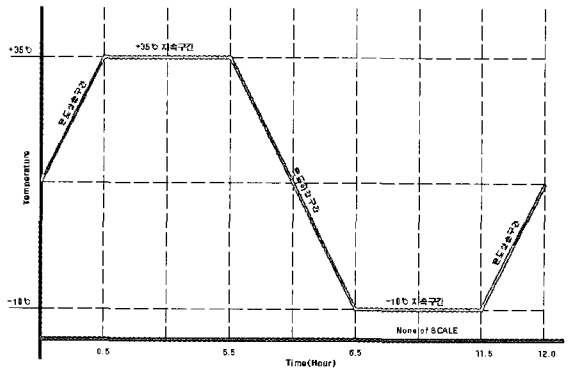


[그림 6] 시료의 재료 및 크기

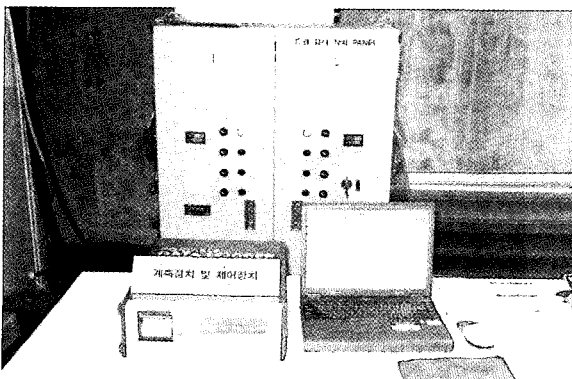
트와 파이프의 변형량 및 그라우트 내부 온도 측정하는 것으로, 온도범위는  $-10^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ , 사이클 및 소요시간은 1 사이클을 12시간으로 구성하여 1일 2 사이클로 50 사이클로 가동하는 것으로 50년 동안 냉난방을 하는 과정을 모사하였다.

실험과정은 아래의 순서로 실시하였다.

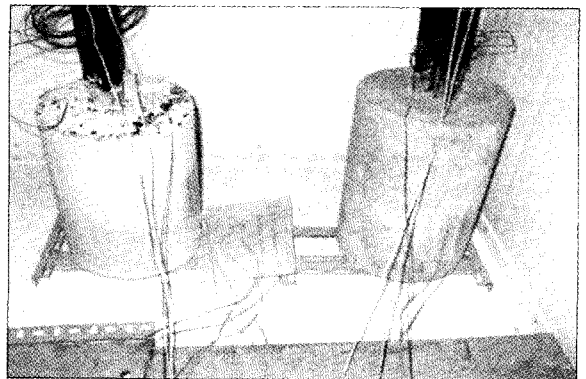
- ㉠ 스트레인게이지 및 Thermocouple 부착  
공시체의 그라우트와 폴리에틸렌 파이프의 변형률을 측정하기 위하여 소정의 위치에 스트레인 게이지를 1Gage 와 2Gage법으로 2개소, 2조를 부착하고 장기간의 온도변화에 게이지가 영향을 받지 않도록 N-1(Tokyo Sokki) Moistureproofing



[그림 7] 동결융해 사이클 및 소요시간



[그림 8] 계측장치 및 제어장치



[그림 9] 시료에 변형률계 설치

Material을 도포한다.

공시체 내부에 삽입되어있는 Thermocouple과 온도확인을 위하여 그라우트 외부에 Thermocouple을 설치한다.

㉠ 공시체의 거치 및 측정

공시체는 앵글을 사용하여 지면에서 5~10cm 이상 떨어져 지면에 부착되는 곳이 없도록 안치시키고, Lead Wire는 간섭을 받지 않도록 설치한다. 설치시의 Chamber 내부의 온도는 35℃로 유지되도록 하며 2시간이상 노출시켜 공시체 내부까지 온도가 전달 되도록 한 후 DATA를 수집한다. 이때의 측정간격은 30초당 1회(data line수 = 72,000 line)로 한다.

(2) 시험 결과

온도변화에 따른 시멘트 콘크리트와 폴리에틸렌 파이프의 변형률을 아래 그림 10과 그림 11로 표현하였다. Set A는 콘크리트와 고무분말을 섞은 시료이며, Set B 콘크리트만을 사용한 시료이다.

파이프의 열 변화에 의한 변형률 폭이 상당히 컸으며, 상대적으로 시멘트의 변화량은 적었다. 변형률 차이는 약 13배 정도이다. 파이프의 경우 지속적인 열적 변화에 변형 범위가 일정하였으나,

콘크리트의 경우에는 열 변화가 장기적일수록 팽창은 적어지나 수축 변형률이 점차 증가하였다.

고무 분말에 의한 콘크리트의 열팽창의 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.

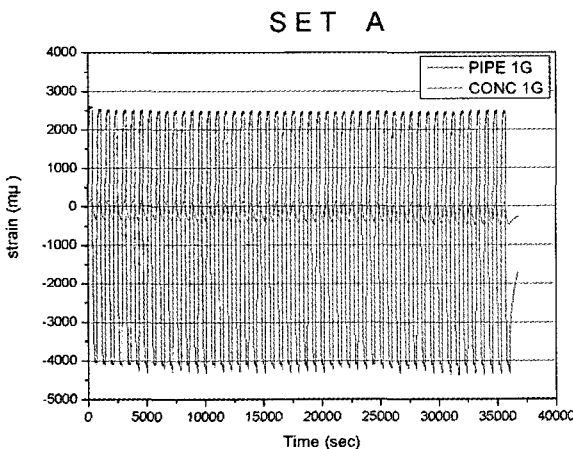
(3) 결론

50년간의 거동을 모사하는 -10~30℃ 구간의 열적 변화를 반복하는 지열교환기의 콘크리트와 PE 파이프간의 열적 상호 거동과 부착도에 대해 실험한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

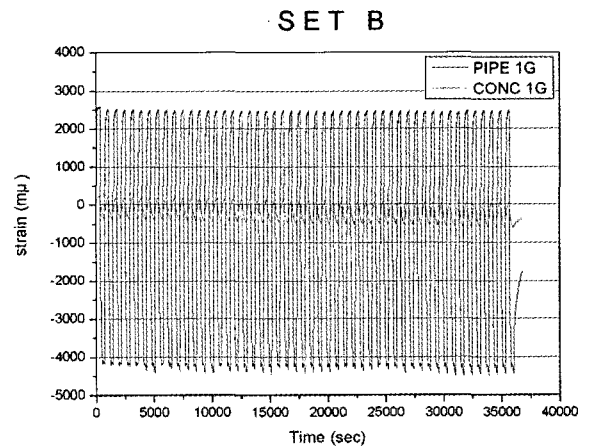
- ① 콘크리트의 고무 분말에 의한 열팽창 영향은 없다.
- ② 콘크리트와 PE 파이프의 열변형률 차이는 약 13배 정도이다.
- ③ 50년 주기의 모의 열피로도 시험 결과 콘크리트와 PE 파이프간의 부착도는 거의 영향이 없다

3.2 말뚝형 지중열교환기의 제작

일반적으로 수직폐쇄형에서 사용하는 열교환파이프는 U자형으로 제작되었다. 하지만 말뚝형 지중열교환기의 경우 길이가 짧기 때문에 최대한 많은 열교환파이프를 집어넣을 수 있도록 개발이



[그림 10] 시멘트+고무분말, PE 파이프의 변형률



[그림 11] 시멘트, PE 파이프의 변형률

필요하다. 이에 따라 여러 가지 형태의 열교환파이프를 검토하여 최종적으로 그림 12와 같이 스프링형태의 코일형 지중열교환기를 개발하였다. 이러한 형태의 열교환파이프는 U자형에 비해 최대 15배의 열교환 밀도를 가지게 되며 이로 인해 최대 3배까지 열교환이 가능한 것으로 예측되었다. 따라서 열교환파이프의 밀도에 따른 열교환능의 비교분석이 필요하게 되었고 이를 해결하기 위해 총 4개의 모형을 제작하여 PHC말뚝에 설치하고 성능평가를 실시하였다. 각 열교환파이프의 제원은 표 2와 같다.

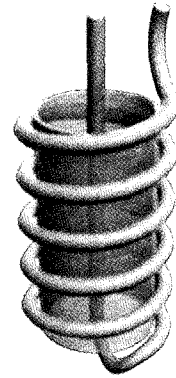
코일형 열교환파이프를 제작할 때는 파이프의 직경, 코일의 외경, 코일의 간격 등을 고려해야 하는데 이중에서도 우선 코일의 외경은 말뚝내부에 삽입가능한 규격이 되어야 하므로 우선 결정되어야 한다.

일반적으로 아파트 공사에서 가장 많이 사용하는 말뚝은 400~450 mm이기 때문에 실험을 위한 열교환파이프는 외경 400의 말뚝을 기준으로 제작하였다. 이 말뚝의 내경은 270로 불규칙한 내부면을 고려할 때 코일의 외경은 250이하여야 한다.

다음으로 파이프의 직경은 코일형으로 가공하고 충분한 유량을 확보하기 위해 외경 27 mm로 결정하였다. 마지막으로 코일간의 간격은 파이프의 밀도별 열교환특성을 비교 분석하기 위해 연속적으로 감겨있는 경우, 파이프직경의 1배, 2배, 3배 간격이 되도록 조정하여 제작하였다.

### 3.3 중공말뚝형 지중열교환기 설치 및 평가

말뚝형 지중열교환기의 성능평가를 위해 제작된

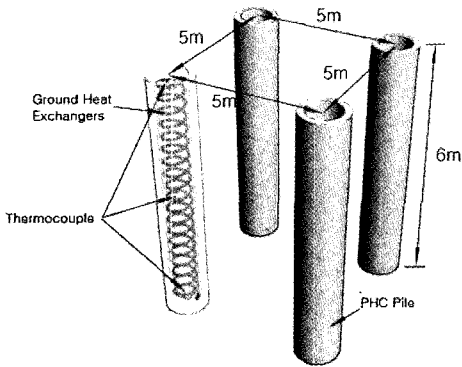


[그림 12] 말뚝형 지열교환기

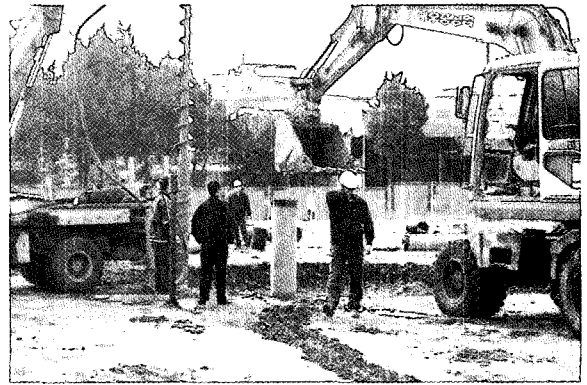
<표 2> 제작한 말뚝형 지열교환기 제원

재원 \ 종류	A	B	C	D
파이프 외경 $D$ (mm)	27 (20호)	27 (20호)	27 (20호)	27 (20호)
원통 외경 $D_s$ (mm)	165	165	165	165
전체 지열교환기 외경 $D_c$ (mm)	254	254	254	254
피치(Pitch) $P$ (mm)	27	54	81	109
열교환기 수직 길이 $L$ (m)	4	4	4	4
전체 파이프 길이 $L$ (m)	89.3	44.7	29.8	22.1
재질	HDPE	HDPE	HDPE	HDPE





[그림 13] 말뚝 및 지열교환기 설치 개요



[그림 14] 말뚝형 지중열교환기 시공사진

<표 3> 말뚝 지열교환기의 재원

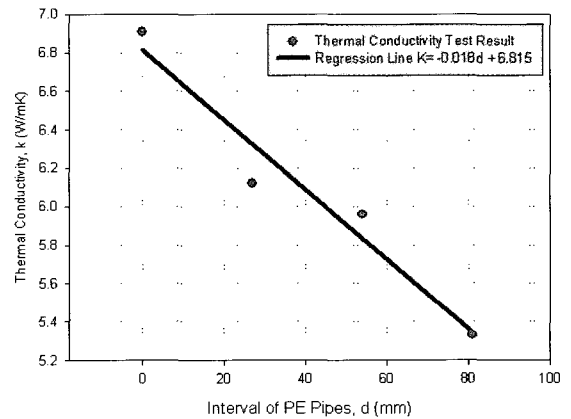
재원	개수	비고
PHC 말뚝	4개	각 말뚝 길이 6m, 간격 5m
지열교환기	4개	A, B, C, D 4가지 타입
Thermocouple	12개	각 말뚝당 3개씩
그라우트	시멘트 그라우트	모래 혼입

4개의 열교환기를 6 m 길이의 PHC말뚝에 설치하였다. 설치상대는 그림 13과 같다. 말뚝의 길이가 6m이며 코일형 열교환기는 4 m이므로 열교환기는 지중 2 m 이상의 깊이로 설치되며 이로 인해 지상의 온도변화로 인한 성능평가의 불안정성을 제거하고자 하였다.

말뚝과 열교환기사이의 빈공간은 일반 건물에 사용되는 표준배합의 콘크리트를 이용하여 그라우팅을 실시하였다.

이렇게 설치된 말뚝형 지중열교환기 4분에 대하여 각각 현장 열물성시험기를 이용하여 성능평가를 실시하였다. 현장 열물성시험기는 지중열교환기에 히터로 가열한 물을 순환시켜 입출온도의 차와 유량, 소요전력을 측정하도록 구성되었다. 이를 통해 열교환된 열량과 열전도율을 측정할 수 있다. 일반적으로 지중열교환기의 성능은 열전도율로 표시할 수 있다.

각 말뚝의 열전도율은 현장 열전도 시험기로 측



[그림 15] PE 파이프 간격과 열전도율의 관계

정을 하며, 말뚝의 열전도율을 측정하는 동안 12개의 열전대(Thermocouple)를 이용해 주변의 온도변화상태를 모두 계측한다. 이는 말뚝이 가열(또는 냉각)되는 동안 주변 말뚝의 온도 변화를 주시하기 위해서이며, 각 말뚝간의 열적 간섭 유무를 효과적으로 판단할 수 있다.

이러한 실험을 각 지중열교환기별로 48시간 이상 실시하여 분석한 결과 열교환파이프의 간격에 따른 열전도율은 그림 15와 같이 나타났다. 그림 15에서 살펴보면 열전도율은 대체로 코일의 간격에 비례하는 것으로 나타났는데 따라서 열교환파이프의 밀도가 높으면 그만큼 높은 열교환성능을 나타내는 것을 알 수 있다. 하지만 이를 투입된 열교환과

이프의 길이와 비교하면 오히려 간격이 넓은 것이 열교환파이프 길이당 열교환성능이 우월한 것으로

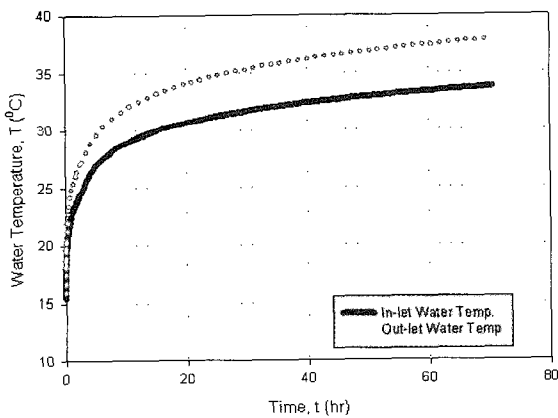
<표 4> 지중열교환기 제원 및 열 특성

항목	A	B	C	D
파이프 간격(mm)	0	27	54	81
가열전력(kW)	0.92	0.95	0.92	1.01
유량(l/min.)	40.20	41.12	40.77	34.21
열전도율(W/mK)	6.91	6.12	5.96	5.33
48시간 후 유입출수의 온도차(°C)	3.94	2.53	1.45	1.67

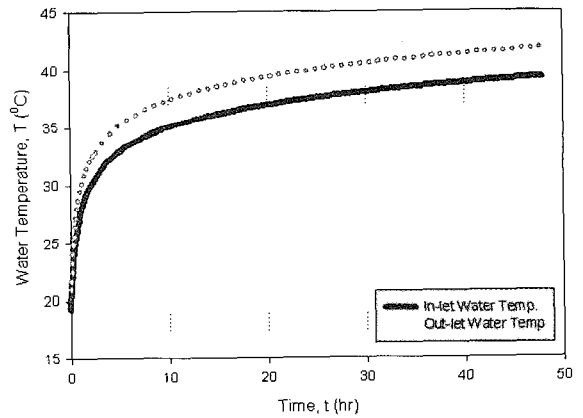
판단할 수 있다. 또한 대체적인 열전도율의 값이 6.9~5.3 W/mk로 나타났는데 이는 일반적인 수직 폐쇄형 지중열교환기의 열전도율 3.0 W/mk에 비해 2배 가량 높은 값이며 약 2배의 효율을 가지는 것으로 볼 수 있다. 이러한 실험결과는 실제 설계에서 지반의 열전도율과 말뚝의 개수, 투입되는 비용 등을 종합적으로 비교하여 열교환파이프의 간격과 소요길이를 선정해야 할 것이다. 이에 대해서는 추후 연구가 계속 진행되고 있다.

### 3.4 장기가동 시험 및 용량 산정 기준

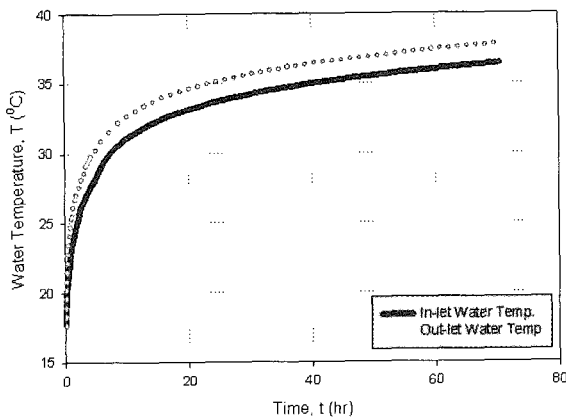
위의 실험결과를 근거로 중공말뚝형 지중열교환



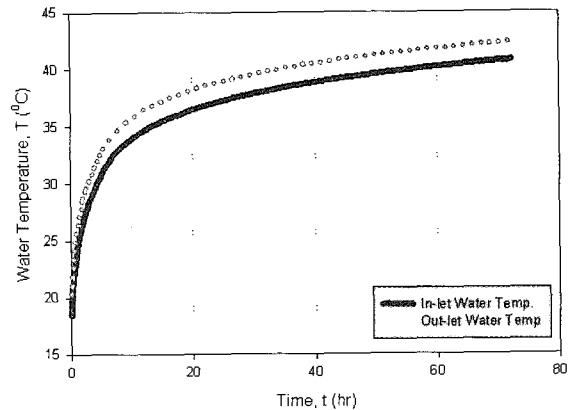
[그림 16] 지중열교환기 A의 열응답 특성



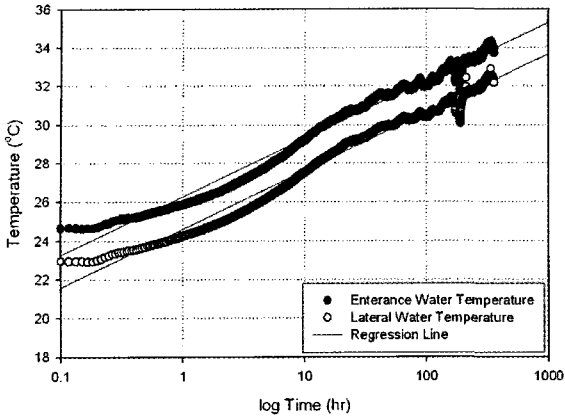
[그림 17] 지중열교환기 B의 열응답 특성



[그림 18] 지중열교환기 C의 열응답 특성



[그림 19] 지중열교환기 D의 열응답 특성



[그림 20] 시간에 따른 온도변화 곡선(지수 단위)

기의 용량을 산정하여 장기가동시험을 실시하였다. 일반적으로 국내의 냉방가동시간은 약 500~1,000시간 정도이다. 따라서 지중열교환기는 500시간 이상의 가동에도 성능범위를 유지해야 한다. 이를 확인하기 위해 설치된 말뚝형 지중열교환기에 예상되는 열교환용량 이상의 열을 500시간이상 지속적으로 가하여 열교환에 따른 지중열교환기의 운전상태를 분석하였다. 시험에 사용된 말뚝형 지중열교환기는 4m급 \* 4본(총 16개)이며 사용된 열원은 3 kW였다. 그림 20에서 보듯이 500시간의 가동에도 온도가 34°C에 머물러있으며 1,000시간 가동시에도 36°C 이하로 나타날 것으로 예측되었다. 일반적으로 지중열교환기의 가동범위는 히트펌프의 종류에 따라 달라지지만 대체로 36°C 이상이므로 충분한 설계성을 발휘하는 것으로 판단할 수 있다.

이러한 실험결과를 바탕으로 말뚝형 지중열교환기의 설계 기준을 정략적으로 산정하고자 시도하였다. 이 때 고려할 점은 말뚝형 지중열교환기의

<표 5>

항 목	설계 기준	비 고
지중열교환기 온도	500시간 연속 가열시 40°C 이하	40°C 이상 상승시 효율 저하 위험 방지
가열 용량	심도 m당 0.2kW	안전율 1.2 적용 간격 없이 배치시

용량을 과도하게 잡을 경우 열소산에 문제가 발생하므로 현장 실험 또는 경험치를 기준으로 아래 표와 같은 온도와 용량 범위에서 적용한다는 점이다.

또한 표에는 포함되지 않았지만 동결로 인해 말뚝 및 지중열교환기의 손상을 방지하기 위해 지중열교환기의 작동온도가 0°C 이상이 되도록 제한하여야 한다.

#### 4. 말뚝형 지중열교환기의 활용 전망

말뚝형 지중열교환기의 개발에 따라 건물기초부에 말뚝이 사용되는 많은 고층건물에 지열냉난방시스템의 적용이 시도될 수 있을 것으로 판단된다. 특히 고층아파트의 경우 고급화에 따른 냉난방수요가 증가하고 있고 에너지소모량도 큰 편이므로 말뚝형 지중열교환기를 이용한 지열냉난방시스템의 보급가능성이 높다. 일반적으로 지열냉난방시스템이 전체 냉난방부하의 100%를 담당하지 않고 일부만을 담당하는 것으로 가정하여 적용방안을 검토하면 기존 냉난방시스템과 유사한 초기투자비를 가지면서도 연료비는 30% 이상 절감할 수 있는 시스템의 구성이 가능한 것으로 분석되고 있다. 따라서 이에 대한 본격적인 활용연구가 수행되어야 할 것이다. 