

# ZERO ENERGY KOREA를 위한 건물 일체형 지중 열교환기 개발

김 양 섭\*, 유 형 규\*\*

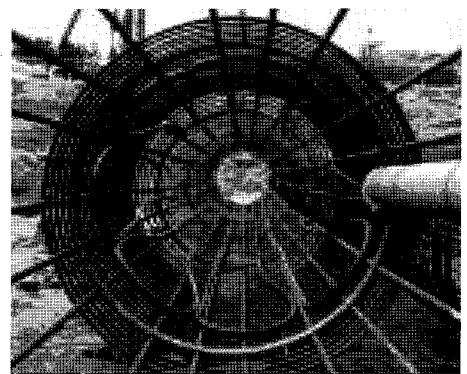
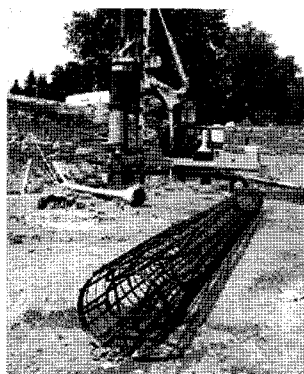
\*대림산업(주) 상무, \*\*대림산업(주) 기술연구소 선임연구원

## 1. 건물 일체형 이용한 지중 열교환기

지열시스템의 에너지절감효과는 지중 열교환기를 통해 안정적인 열원(Heat source, Heat sink)을 확보할 수 있는 장점이 있으나, 지중 열교환기의 매설을 위한 지반의 천공비용이 북미나 북유럽 같은 외국에 비해 높은 것이 단점이다. 지열시스템은 지중 열교환기 시공을 위한 천공 비용이 전체 공사비의 약 40% ~ 50%를 차지하는 것으로 알려져 있다. 이로 인해 지열시스템의 초기투자비가 증가하고, 단순투자회수기간 측면에서 기존 공조시스템에 비해 불리하여 지열시스템의 보급에 걸림돌이 되기도 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 지중 열교환기를 별도로 설치하는

방식이 아니라, 기존 건물의 기초와 같은 구조물을 지중 열교환기로 사용하려는 시도가 활발히 이루어지고 있다.

건물 구조물을 이용한 지중 열교환기를 처음 적용한 사례는 신재생에너지 선진국인 독일에서 찾아볼 수 있으며, 영국, 오스트리아, 스위스 등 유럽 전역에 다양하게 적용되고 있다. 유럽에서는 1990년대 중반부터 건물 구조물을 이용한 지중 열교환기 개발에 착수하여 주로 대형 상업용건물 위주로 적용하고 있다. 영국은 옥스퍼드 대학 내 Keble College 신축 건물에 전체 말뚝의 25%에 말뚝형 지중 열교환기를 시공하였으며, 스위스는 말뚝형 지중 열교환기를 개발하여 1997년 쾰리히 공항 신터미널에 직경 1m ~ 1.5m인 말뚝 300본



[그림 1] 영국 옥스포드(Kebel College)

이상에 적용하였다. 건물 구조물을 이용한 지중 열교환기를 시공하는 업체는 유럽 지역의 업체는 ARUP, SKANSKA, Enercrete, GEOTHERMIE 등이 있으며, 이중 Enercrete사는 건물의 기초로 사용되는 대구경 현장타설말뚝 등 다양한 건물 구조물에 열교환 파이프를 설치, 지중 열교환기로 사용하는 기술을 상용화하고 있다. 그림 1과 그림 2는 유럽지역에서 실제 적용된 건물일체형 지중 열교환기 사례들이다. 일본의 다이세이 건설도 그림 3과 같이 현장말뚝형 지중 열교환기를 개발하여 건물에 적용하고 있다.

국내에서도 대구경 현장타설말뚝을 이용한 지중 열교환기 설계 및 시공에 대한 소개가 지방공학회 등을 통해 이루어졌다. 또한 2004년 6월 ~ 2006년 5월에 수행된 산업자원부 과제(고성능

저가형 지중 열교환기 개발)에서는 건물의 기초인 PHC 파일 중공 부위를 이용하여 지중 열교환기로 사용할 수 있는 가능성을 제시하였다.

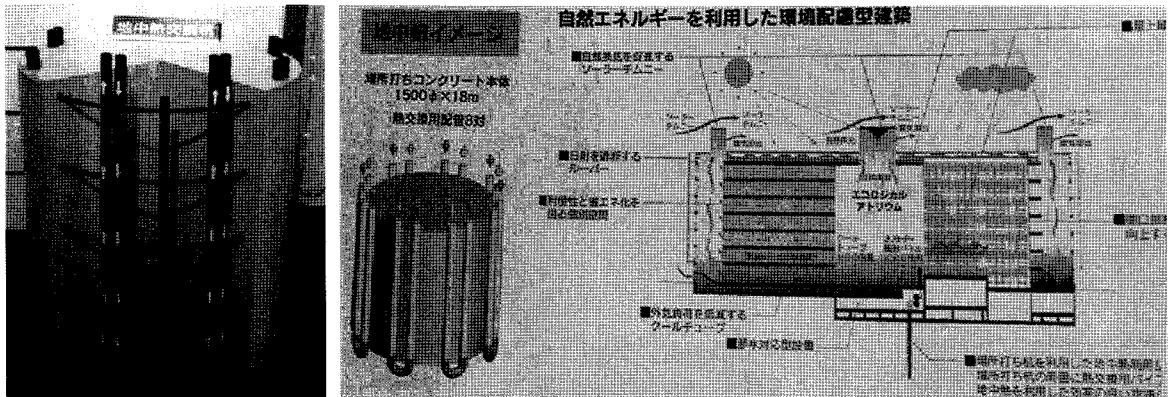
본고에서는 기존 PHC 파일을 이용한 지중 열교환기의 성능을 보완하기 위해 당사에서 수행한 연구 결과를 소개하고자 한다.

## 2. 건물 일체형 지중 열교환기 설계

건물 일체형 지중 열교환기를 이용한 지열시스템은 살아있는 나무의 뿌리가 토양 속 영양분을 흡수하여 수십 수백년을 살아나가는 것처럼, 건물의 기초 또는 구조물이 지중의 에너지를 흡수하여 건물 운영에 필요한 에너지를 얻는다는 점에서 유사한 특징을 가진다. 여기에 태양광 발전시스템과



[그림 2] 독일 하노바(은행)



[그림 3] 일본 다이세이 건설 현장 말뚝형

<표 1> 당사 공동주택 현장 PHC 파일 시공현황

현장	세대수	파일 직경	PHC 갯수	PHC 총길이	평균길이(m)	세대당 PHC길이
A	1,302	400	8,141	46,909	5.8	36.0
B	1,018	500	1,700	14,117	8.3	21.8
C	677	400	610	4,465	7.3	157.6
D	674	450	366	4,245	11.6	6.3
E	592	400	4,371	66,339	15.2	288.4
F	1,532	500	5,473	61,008	11.1	39.8
G	1,150	500	3,419	29,417	8.6	25.6

지 도입하여 히트펌프의 동력으로 사용한다면, 광합성을 하는 식물처럼 다른 모습의 완전한 생명체로 변모할 수도 있을 것이다. 지중의 에너지를 보다 효과적으로 흡수하기 위해서는 건물과 통합되는 지중 열교환기기의 설계가 매우 중요하다.

### 2.1 PHC 파일

공동주택에 사용되는 PHC 파일은 외경이 300mm ~ 600mm, 길이가 5m ~ 15m이고, PHC 파일의 길이가 지지 암반층이 보다 짧은 경우에는 파일과 파일을 이어서 사용하는 등 현장에 따라 다르기 때문이다.

표 1은 당사 공동주택 현장을 대상으로 PHC 파일 시공현황을 조사한 것으로, 외경 400mm ~ 500mm, 평균 길이 최소 5.8m에서 최대 15.2m 까지 적용하는 것으로 나타났다. 동일 현장일 경우에도 위치에 따라 편차가 다르게 나타났으며, 최대 40m까지 시공하는 경우도 있다. 조사 대상 현장의 PHC 파일 총 길이를 세대 수로 나누어 계산하면 최소 한 세대 당 6.3m에서 최대 288.4m 까지로 나타나 PHC 파일을 지중 열교환기로 사용할 수 있는 가능성이 큰 것으로 나타났다.

### 2.2 그라우팅 재료

기존 지열시스템에는 HDPE 파이프와 흙 또는 암반을 서로 밀착시키기 위하여 벤토나이트를 주로 사용하지만, PHC 파일 내부와 열교환 파이프 사이는 각 재료의 표면이 매끄럽기 때문에 벤토

<표 2> 그라우트 재료의 열전도율

그라우트 재료		열전도율 W/mk
모래 또는 자갈	건조	0.77
	습윤	2.50
시멘트	건조	0.43 ~ 1.25
	습윤	0.83 ~ 2.12
벤토나이트		0.66 ~ 0.78
습윤상태의 점토 또는 흙		1.67

나이트이외에 시멘트 콘크리트, 모래, 콩자갈 등을 사용할 수 있다. 연구문헌을 토대로 각 재료의 열전도율을 표 2에 정리하였다. 모래 또는 콩자갈을 그라우트 재료로 사용할 경우 그라우트 재료 내부의 공극으로 지중의 열을 코일형 열교환 파이프로 전달하는데 장애 요인이 될 수 있으나, 재료가 습윤을 유지하는 경우에는 다른 그라우트 재료보다 열전도율이 우수한 것으로 조사되었다.

### 2.3 열교환 파이프

PHC 파일 중공에 삽입되는 열교환 파이프는 중공 내에서 코일형태로 설치 유지되는 것이 지중에서 유체가 머무르는 시간이 길어져 지중 에너지를 최대한으로 이용할 수 있기 때문에 가장 이상적이다. 열교환 파이프가 코일형태를 유지하기 위해서는 파이프 재질 선정이 매우 중요하다. 일반적으로 기존 수직밀폐형에 사용하는 HDPE 파이프는 단단하고 내구성이 우수하지만, 연성이 부족하

여 코일형태로 성형이 어렵다. 따라서 HDPE 파이프와 내구성과 열적특성이 비슷하면서도 연성이 뛰어난 재료로는 현재 공동주택 바닥난방에 사용하고 있는 PB(Poly Butylene)파이프이다.

### 2.4 지중 열교환기 설계

이상의 설계 요건을 검토하여 작성한 지중 열교환기 설계안은 그림 4와 같다. 열교환 파이프와 PHC 파이프 사이의 그라우팅 재료는 왕사 또는 콩자갈로 선정하였고, 표 2에 따라 그라우팅 재료의 열전도율을 높이기 위하여 습윤 상태를 유지할 수 있도록 지하 유출수 또는 시수를 투입할 수 있는 별도의 파이프를 추가하였다.

지중 열교환기가 지표보다 지중 하단과 열교환이 잘 이루어지도록 열교환기 하단 피치 간격은 조밀하게, 상단 피치 간격은 성기계 설계하였으며, 실제로 피치 간격은 PB 파이프 자체의 무게와 탄성으로 시공과정에서 피치 간격이 조정되게 하였다.

## 3. 건물 일체형 지중 열교환기 시공

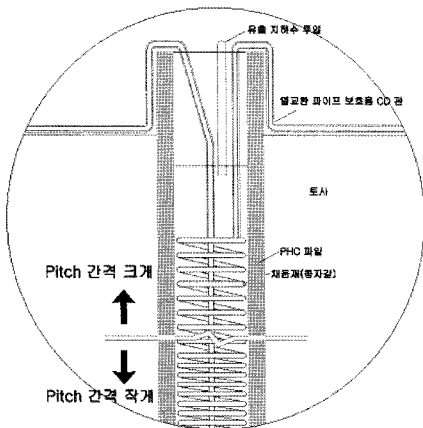
### 3.1 지중 열교환기 시공 과정

코일형 지중 열교환기의 성능을 평가하기 위하여 PHC 파이프 시공 중인 당사 공동주택을 선정하여 시험시공을 실시하였다. 그림 5는 코일형 지중

열교환기를 시공한 OO 현장 지열 천공 배치도 및 시험 설치 위치를 나타낸 것이다.

코일형 지중 열교환기를 설치할 PHC 파이프의 길이는 상호 성능 비교를 용이하게 하기 위해 10m 내외로 동일하게 선정하였다. 또한 시공성 평가를 위하여 그라우팅 재료에 따라 PB 파이프는 15 A와 22 A 두 가지로 제작하여 총 10개를 제작하였다. 제작된 각각의 지중 열교환기는 직선 길이로 약 230m 정도이다. 제작 시공된 지중 열교환기 내용은 표 3과 같다.

그림 6은 PHC 파이프 지중 열교환기 시공 과정을 나타낸 것이다. PB 22 A가 시공중 꼬임이 발생하는 15 A보다 시공이 매우 용이하였다. PB 22 A는 PHC 파이프 10m 중공에 삽입하는 시간이 채 10분이 걸리지 않았다. 시공된 내부를 관찰한 결과 하단에서는 파이프 피치가 조밀하게, 지표 가까이에서는 성기계 설치된 것을 확인하였다. 이후 A, B, C Type에 대해서는 콩자갈, 왕사, 모래 그라우팅 실시 후, 물다짐을 실시하였다. D Type에는 레미콘을 이용하여 콘크리트를 채웠으며, E Type에는 벤토나이트를 채웠다. 콩자갈, 왕사, 모래 등은 비교적 채움 시공이 용이하였으나, 벤토나이트는 채움과 동시에 파이프가 부력에 의해 위로 떠올라 파이프 내를 물로 채워 시공하였다. 그라우팅 재료와 PB 파이프의 시공 측면에서 볼 때, PHC 파



[그림 4] 코일형 열교환 파이프 시공 상세



[그림 5] 지중열교환기 시공 전경

일은 PB 파이프 곡률을 감안하여 외경 450mm(내경 310mm), 열교환 파이프는 시공시 꼬임이 발생하지 않는 22 A, 그라우팅 재료는 채움후 물다짐이 가능한 습윤된 왕사 또는 모래를 사용하는 것이 가장 좋은 시공성을 나타내었다.

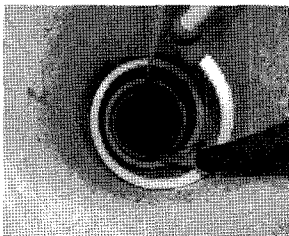
### 3.2 지중 열전도도 테스트

시공된 각 지중 열교환기의 지중 열전도도 실험

결과, 왕사 또는 모래 그라우팅을 습윤상태로 유지한 B와 C Type의 열응답 특성이 가장 우수한 것으로 나타났으며, 콘크리트를 그라우팅으로 사용한 D Type과 벤토나이트를 그라우팅으로 사용한 E Type은 열응답 특성이 가장 낮은 것으로 나타났다. 실험결과를 표 4에 나타내었다. A Type은 실험과정에서 파이프 내로 흐르는 유량에 문제가 발생하여 결과값을 나타내지 못하였다.

<표 3> OO 현장 지중 열교환기 제원 및 그라우트 재료

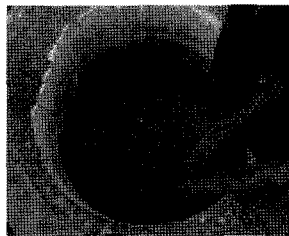
구분	PB 호칭경	PB 파이프 길이	PHC 길이	그라우트재료	지하수투입
A1	22 A	230 m	10 m	콩자갈 5 mm 이상	Y
A2	15 A	230 m	10 m		
B1	22 A	230 m	10 m	왕사 (2 ~ 5) mm	Y
B2	15 A	230 m	10 m		
C1	22 A	230 m	10 m	모래 2 mm 이하	Y
C2	15 A	230 m	10 m		
D1	22 A	230 m	10 m	콘크리트	N
D2	15 A	230 m	10 m		
E1	22 A	230 m	10 m	벤토나이트	N
E2	15 A	230 m	10 m		



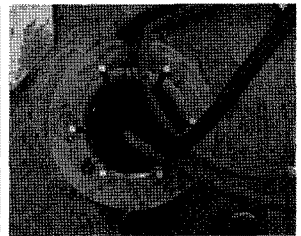
a) 열교환 파이프 설치



b) 왕사 그라우팅



c) 물다짐



d) 설치 완료

[그림 6] 지중 열교환기 설치

<표 4> 열전도율 실험 결과

구분	열전도율(W/m°C)	비고
A Type	-	콩자갈 5mm 이상
B Type	32.3	왕사 (2 ~ 5)mm
C Type	36.6	모래 2mm 이하
D Type	27.8	콘크리트
E Type	19.6	벤토나이트

기존 수직밀폐형 지중 열교환기의 지중 열전도도가 일반적으로  $3 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  정도이고, 산업자원부 연구 과제에서 6m 길이 PHC 파일에 코일 피치를 파이프 직경의 1 ~ 3배 간격에 따라 실험한 결과가  $5.3\text{W/m}^\circ\text{C} \sim 6.9\text{W/m}^\circ\text{C}$ 로 나타난 것과 비교하면 본 연구의 결과는 매우 고무적이다.

#### 4. ZERO ENERGY KOREA를 위하여

본고에서 소개한 PHC 파일을 이용한 지중열교환기는 국내의 많은 공동주택 및 고층건물에 지열시스템을 보다 쉽고 경제적으로 적용될 수 있는 방안의 하나이다. 단, PHC 파일을 이용한 지중열교환기는 파일의 수량이 건물의 구조 설계에 따라 결정되기 때문에 건물 전체 부하에 맞게 이용하는데 한계가 있으므로 설계시 이를 고려하여 기존 시스템과 유기적인 조화를 이루어야한다. 또한 완전한 시스템으로 상용화되기까지는 코일파이프 내 유체 흐름시 압력 손실, 파이프의 최적 길이 산정, 코일열교환 파이프의 제작 방법, 피팅류의 개선, 적정 이격 거리를 고려한 용량 설계 등의 연구가 추가로 필요하다.

지열시스템은 현재 선정된 11개 신재생에너지 분야 중에서 가장 경제성이 뛰어난 시스템이다. 그러나 지열시스템을 세대 내에 적용하는데 있어 가장 큰 걸림돌인 누진세로 인하여 현재 대부분의 건설사에서는 지열시스템의 적용을 관리사무소, 경로당, 또는 주민공동시설 등 단지 내 공용부에 적용하는데 그치고 있는 실정이다. 그러나 지열시스템을 보다 적극적으로 사용하기 위해서는 공동주택 세대 내에 적용하는 방안을 다양하게 검토하고 시도하는 것이 바람직하다.

그 하나는 공동주택의 급탕 시설을 지열시스템

을 이용하여 공동으로 사용하는 방법이다. 국내 공동주택 거주자들은 빠른 난방효과와 간헐 난방을 선호하고 급탕용량까지 포함되어 있기 때문에 개별 가스보일러 용량이 커지는 경향이 있다. 그러나 지열시스템을 공용 급탕 시설로 이용하고, 개별 가스보일러는 난방 전용으로 사용하게 되면, 각 세대의 개별 가스보일러 용량을 줄일 수 있다. 또한 공용 급탕 시설에는 동시 사용율을 적용할 수 있어 개별 가스보일러 설치시보다 설비 용량이 감소되므로 초기투자비를 낮출 수 있다. 또한 급탕 가열에 사용하는 전력은 옥상 전체에 태양광 발전 설비를 이용하여 대부분 충당할 수 있다.

또 하나는 현재 당사에서 추진하고 있는 Eco-3L House를 조기에 상용화하는 것이다. Eco-3L House는 기존 건물이 사용하는 에너지의 약 20% ~ 30% 만으로 냉난방이 가능한 초에너지 절약 건물이다. 이러한 경우 앞서 언급한 급탕용량 이하로도 세대 냉난방을 충당할 수 있다.

향후 다양한 기술개발이 이루어짐에 따라 점차적으로 지열시스템은 기존 냉난방 시스템과도 그 경제성을 견줄 수 있는 단계에 다가갈 수 있을 것이다. PHC 파일을 이용한 지중 열교환기의 개발은 그 과정의 첫걸음이라고 할 수 있으며, Eco-3L House와 같이 현행 기준 및 제도에 머무르지 않는 성능의 건물과 서로 조화를 이룰 때 그 가치는 더욱 크게 나타날 것이다.

현재 정부와 민간에서 이루어지고 있는 다양한 노력들이 빠른 시일 내에 결실을 맺고, 지열시스템뿐만 아닌 각종 신재생에너지 분야에서 경제적이고 효율적인 방안들이 연구 개발되면 현재 우리가 얘기하고 있는 Zero Energy House가 아닌 Zero Energy Korea가 되는 것도 멀지 않은 것으로 기대한다. 