

Spiral Type Soil Heat Exchanger

이준석 과장

(주)삼미지오테크 기술연구소

1. 서론

인류의 발전과 함께 생활수준이 향상됨에 따라 이를 유지 및 발전하기 위해 에너지의 사용량이 크게 급증하였다. 무분별한 에너지사용은 지구온난화 및 자연환경 파괴를 야기 시킴에 따라 환경친화적인 산업구조의 형태를 갖는 에너지기술 및 기존제품의 고효율 고성능화가 필요하다.

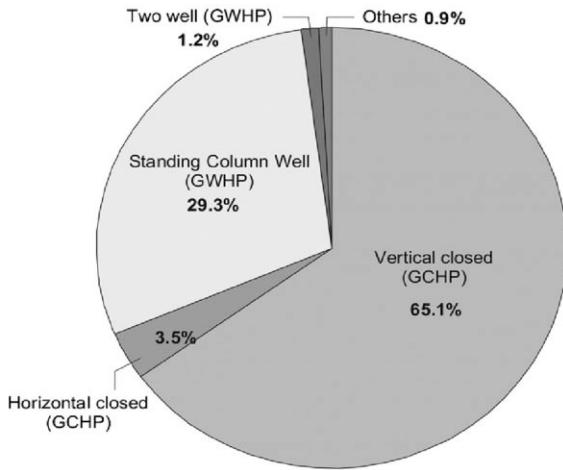
해외에서는 이미 오래전부터 지열에너지가 건물의 냉난방 에너지원으로서 매우 뛰어난 활용가치가 있다는 점을 인식하고, 일반 주거용 건물과 상업용 건물에 다양한 종류의 시스템을 설치하고 있다. 세계적으로 에너지 절약의 중요성과 생활수준의 향상에 따른 쾌적성 증대 및 환경적 측면에서 중요성이 증대되고 있는 신재생에너지 적용 냉난방 공조시스템인 지열에너지 시스템의 고효율화 및 시공비용 절감에 대한 기술 선점을 통하여 신재생에너지 적용 세계 공조 분야에서의 국가 기술력 확보의 중요성이 시급히 요구되고 있다. 또한 국내보다 에너지 사정이 좋은 미국이나 유럽 각 국에서는 70여년 전 부터 지열에너지 시스템 관련 요소기술 및 시스템 개발에 많은 투자

가 이루어지고 있는 점은 시사하는 바가 매우 크다고 할 수 있다.

에너지 절약적이며 환경 친화적인 지열에너지 시스템의 시장은 매년 10% 이상씩 성장하고 있으며, 이에 따라 지열에너지 시스템의 고효율화 및 시공비용 절감을 위한 지중열교환기 관련 첨단 기술 확보는 국가의 에너지절감 및 환경보호와 공조시장에서의 국제 경쟁력 확보를 위해 그 중요성이 매우 크다.

특히, 지열에너지 냉난방 분야의 선진 기술을 보유한 미국, 유럽과 후발국인 중국 등의 동아시아 국가에서는 이에 대한 정부적 지원 하에 집중적인 투자 및 개발이 진행되고 있으므로, 지열에너지 시스템의 핵심 요소기기인 고효율 지중열교환기 및 시스템 최적화 기술을 확보하여 후진국과의 기술적 차별화 및 선진국과의 기술적 격차 극복을 통한 지열원 냉난방 분야의 국내외적 경쟁력 확보가 절실히 요구되고 있음

그림 1은 최근까지 국내에 시공된 지열원 열펌프 시스템의 지중열교환기를 형식별로 구분한 것이다. 그림에서 나타나듯이 전체 시스템에서 수직형 지중열교환기 이용 시스템(standing column



[그림 1] 국내 시공된 지열시스템 형식별 비율

well)이 약 65% 이상을 차지하고 있으며, 최근에는 시스템의 안정성 측면에서 수요가 더욱 증가하고 있다. 이는 수직형 지중열교환기 보어홀(borehole)과 관련된 인프라가 이미 구축되어 있었으며, 여기에 지열에너지 시스템이 국내에 도입된 후 수직형 시스템과 관련된 핵심 기술 개발, 성능 Pilot연구, 설계 및 시공기준 구축 등이 정부 지원을 통해 일부 진행되었기 때문이다. 수직밀폐형 지중열교환기 설치비용은 전체 지열원 열펌프 시스템 설치비용의 약 40~50%를 차지하므로 고효율 지중열교환기의 개발, 최적설계 및 시공기술 개발은 지열에너지 시스템 초기설치비 저감 및 성능 향상을 위한 핵심 요소 기술로서 정부 주도에 적극적인 투자가 요구된다.

2. 본론

당사와 관련 연구진이 새롭게 고안한 내부나선형 HDPE 적용 고효율 지중열교환기는 지중열교환기의 성능을 향상시키고 지열에너지 시스템의 초기투자비 감소를 통한 지열에너지 시스템의 국제 경쟁력 확보와 보급 활성화를 위한 중요 핵심 기술이라고 할 수 있다. 따라서 국내 지열분야의

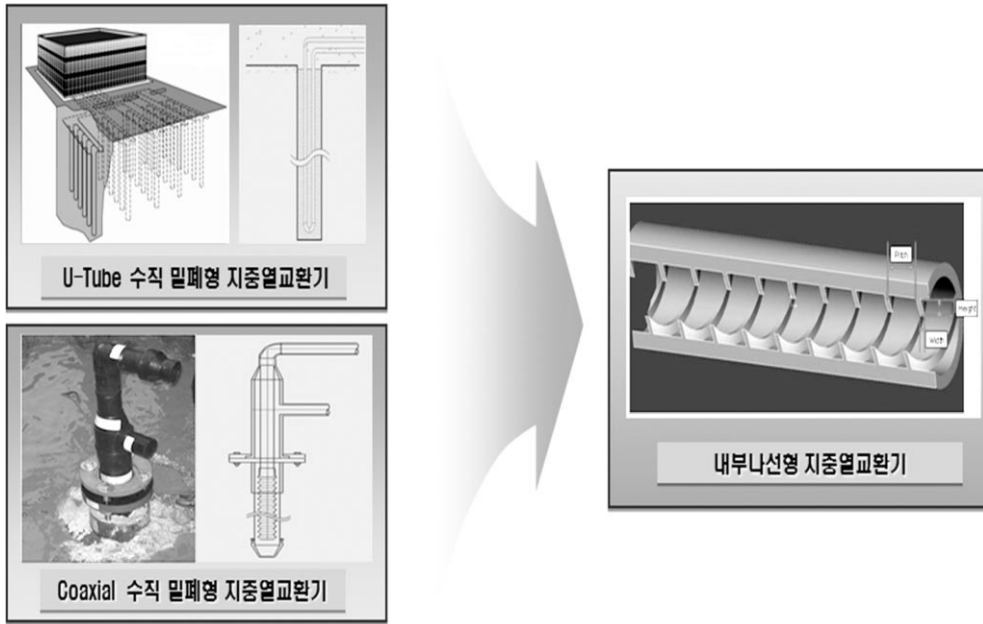
기술개발 방향과 지중열교환기 초기 투자비 절감 기술개발 그리고 민간에서의 요구 등을 고려했을 때, 새롭게 고안된 고효율의 내부나선형 HDPE 지중열교환기의 최적 설계 및 전열 성능 분석, 시스템 냉난방 성능 평가, 설계 데이터와 시공기준 구축 등에 대한 연구는 현 시점에서 매우 중요한 기술 개발 현안이다.

2.1 기술의 필요성

지열은 지표면 하부의 지중에 분포된 열을 말하는 것으로, 대기의 온도가 큰 폭으로 변하는데 반하여, 지표면으로부터의 깊이가 증가할수록 조금씩 증가하는 경향이 있으나 통상적으로 지중의 온도는 계절 변화에 관계없이 $15 \pm 5^\circ\text{C}$ 로 유지된다. 이열원을 이용하는 지중열교환 시스템은 지하로부터 열을 회수하거나 배출하도록 지중의 열과 열교환을 위해 지중에 매설되는 지중열교환기를 말한다. 하지만 지열에너지 시스템을 구축함에 있어서 종래에는 주로 지중열교환기를 지중에 매설하는 기술에 연구가 집중되었으며, 이에 따라 지중열교환기 자체의 열교환 성능을 증대시키려는 시도는 극히 제한적이었다. 따라서 보다 열교환 성능이 향상된 지중열교환기의 개발이 필요한 실정이다.

2.2 기술의 차별성

전 세계적으로 전열성능 향상을 위한 지중열교환기 개발 성과는 매우 부족한 실정이다. 해외에서는 지열에너지 시스템에 대한 여러 컨소시엄들이 구성되어 이에 대한 집중 투자 및 연구개발이 진행되고 있다. 미국에서는 EPA(Environmental Protection Agency)와 DOE(Department of Energy) 등이 주축이 되고 지열원 열펌프 제조업체가 참여한 지열원 열펌프 컨소시엄(Geothermal Heat Pump Consortium; GHPC)이 지열시스템의 보급을 위해 노력하고 있고, IGSHPA나



[그림 2] 국내외 지중열교환기 및 내부나선형 지중열교환기

ASHRAE 등에서는 지열원 시스템에 대한 기술 개발 및 노력을 진행하고 있다. 하지만 국내에서는 내부나선형 HDPE 배관과 같은 지중열교환기 내부 형상을 변화시켜 고효율의 지중열교환기를 설계/제작하고 공정개발과 시스템 Pilot 연구를 통한 신뢰성 확보를 도모하여 시스템의 고효율화 및 시공비 절감에 대한 연구개발은 진행된 바가 없다. 특히 유럽에서 개발된 Coaxial 수직밀폐형 지중열교환기는 지중열교환기의 효율 향상은 가능하지만 경제성이 확보되지 않아 크게 사용되지 않고 있다.

2.3 내부나선형 지중열교환기

내부나선형 지중열교환기를 수치모델링 하여 제작된 시작품은 그림 3과 같다.

내부나선형 지중열교환기는 직관형 파이프 구조의 지열파이프를 구비하고 지열파이프는 시공시 지중에 일정 깊이로 매설되며 내부에 유로를 구비한다. 그리고 유로를 구비한 지열파이프(지중

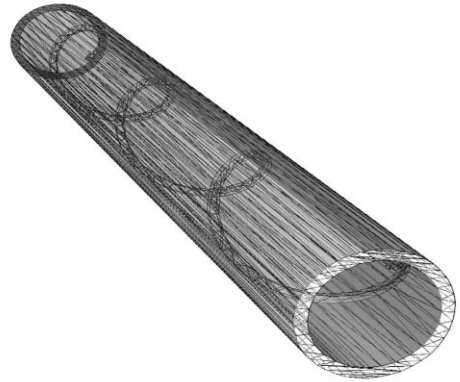
열교환기)의 내부면에는 깊이방향에 따라 나선으로 리브가 형성된다. 지열파이프 및 그 내부에 형성된 나선형 리브는 고밀도 폴리에틸렌(HDPE, High Density Polyethylene) 재질로 구성된다. 그러나 이 재질에 한정되는 것은 아니며, 탄소섬유강화플라스틱(CFRP) 재질 또는 유리섬유강화플라스틱(GFRP)과 같이 내구성, 열전도성(Thermal Conductivity) 등이 높은 재질이면 제한이 없다.

내부나선형 지중열교환기는 내부의 유로를 액상의 열매체(물, 부동액, 염수 등)가 유동하면서 지중의 열과 열교환 작용을 하되, 내부에 형성된 나선형 리브에 의해 열교환기와 열매체 사이의 접촉하는 면적이 증대되고 난류가 형성되어 지중열교환기 내부에서 열매체의 온도가 불규칙하게 변화함으로써 열전도율을 크게 향상시킬 수 있다.

나선형 리브는 지중열교환기의 길이 방향에 따라 연속된 나선형으로 구성되어야 하며, 지중열교환기의 길이 방향을 따라 그 내주면에 단속적인 나선형으로 구성할 수도 있다. 또한 단일나선



[그림 3] 내부나선형 HDPE Pipe 샘플1 (3D Print FDM)



[그림 4] 내부나선형 HDPE Pipe 도식

(single spiral), 이중이상 다중나선(multi spiral) 형으로도 구성할 수 있다.

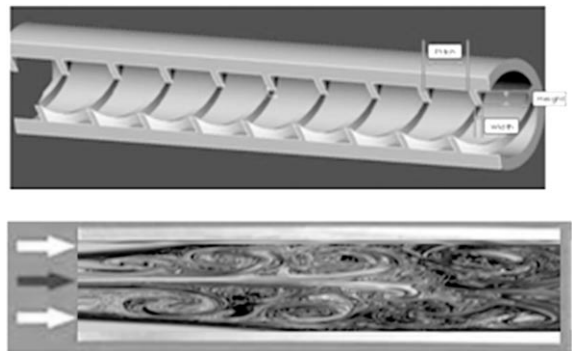
내부나선형 지중열교환기의 내부 열전도율은 나선형 리브의 피치(pitch)를 작게 할수록 좋다. 그러나 피치가 너무 작으면 유량 대비 배관의 압력강하가 크게 발생할 수 있으므로, 열매체의 원활한 유동성과 압력강하로 인한 열손실 등을 고려했을 때 지중열교환기의 직경에 대해 피치가 10~20배 정도인 것이 바람직하다. 즉 리브의 피치가 지중열교환기의 직경의 10배보다 작으면 발생하는 열매체의 접촉면적이 증대되어 열전도율 상승을 기대할 수 있으나 유량 대비 배관의

압력강하가 커지는 문제가 발생되며, 20배 보다 크게되면 열매체와 지중열교환기의 접촉면적이 일자형 단면을 갖는 종래의 지중열교환기와 차이가 거의 없어 열교환 효율의 상승을 기대하기 어렵다.

그림 5를 참조하면 종래의 내부 평활형 지중열교환기는 (a)와 같이 유량이 많지 않은 경우 층류식 열유동이 발생하여 열전달 효율이 떨어지는데 반해 내부 나선형 지중열교환기의 같이 지중열교환기의 내부를 나선의 리브로 형성한 경우에는 나선형 리브로 인해 적은 유량에도 (b)와 같이 난류형 열유동이 발생하여 높은 열전달 효율을 기



(a) 기존 지중열교환기 내부 열유동



(b) 나선형 지중열교환기 내부 열유동

[그림 5] 지중열교환기 내부 열유동

대할 수 있다. 즉 기존의 내부 평활형 지중열교환기의 경우 배관 중앙을 기준으로 일정하게 온도가 전달되지만, 내부 나선형 지중열교환기의 경우 나선으로 인해 온도가 불규칙하게 변화되어 열 전달량이 많아지게 된다.

2.4 성능평가

2.4.1 ESCR 평가(ASTM D 3350-10)

내부나선형 지중열교환기의 환경조건 영향에 따라 촉진되는 응력에 대한 균열성 시험을 수행하였다.

시험방법은 D 1693에 의거하여 시편을 제작하고, 노닐 · 페닐 · 폴리옥시에틸렌 · 에틸알콜

10% 수용액을 사용하고, $50^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 의 상기 용액에 시험편을 담가 20% 균열 발생시간을 구하였다. 이 경우 20% 균열 발생시간이 600시간 이상일 때는 600시간에 중지하는 방법으로 시험하였다.

2.4.2 ETSP 평가(AWWA C-901)

내부나선형 지중열교환기의 고온($80^{\circ}\text{C} \pm 2$)에서 열가소성 플라스틱 배관의 내압안정성평가시험을 진행하였다.

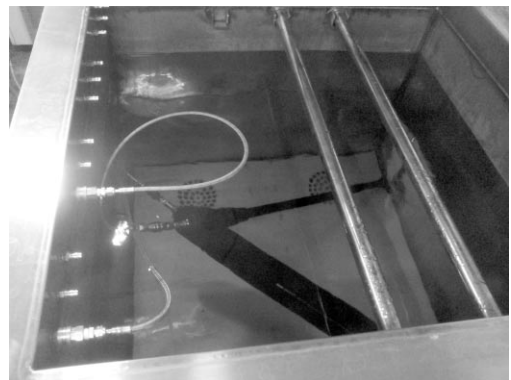
시험방법은 D 1598에 의거하여 시편 제작하며, AWWA C-901에 의거하여 $80^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 수조에 제작된 시편을 집어넣은 후 관의 내부 압력을 130 psi를 올려서, 170 시간 동안 압력 및 온도를

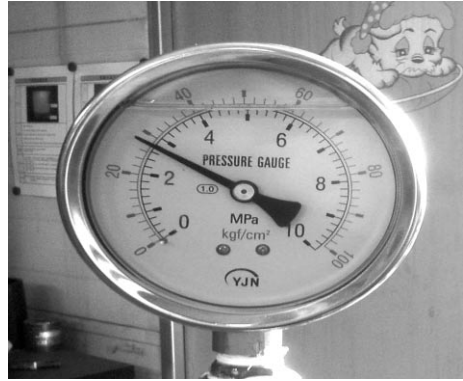


[그림 6] ESCR (내환경응력균열시험) 성능평가 (20%/600hr)



[그림 7] ETSP(열간내압크리프시험) 성능평가 (125psi/170hr)





[그림 8] STBS(단기수압성능시험) 성능평가 (500psi/23℃)

유지 하여야 하며 파괴 및 갈라짐 등이 없어야 하는 기준으로 시험하였다.

2.4.3 STBS 평가(AWWA C-901)

STBS 시험은 상온(23℃±2)에서 열가소성 플라스틱 배관의 내압 안정성을 평가하는 단기 성능 시험으로 시험방법은 D 1599에 의거하여 시험편 제작하며, AWWA C-901에 의거하여 SDR 11~9의 압력 및 시험 온도 조건 23℃±2℃를 따

르며 제작된 시험편에 물을 넣은 후 규정된 압력을 집어넣어 60~70초 사이에 연성 파괴가 일어나야 한다.

2.5 기대효과

고효율의 지중열교환기 개발로 지열시스템의 시공기간 및 비용감소로 인하여 민간 건설시장에서 지열에너지 냉난방 시스템의 보급이 확산되는 데

<표 1> 내부나선형 지중열교환기 공인시험기관 성능평가 결과

구분	평가 항목	평가 규격	평가 기준	시험값	평가 결과
원재료	밀도	KS M 3408-1	≥930 kg/m ³	957 kg/m ³	이상없음
	카본블랙함량	KS M 3408-1	2~2.5 wt%	2.1%	이상없음
	카본블랙분산	KS M 3408-1	≤3등급	2등급	이상없음
	휘발함량	KS M 3408-1	≤350mg/kg	269 mg/kg	이상없음
	산화유도시간	KS M 3408-1	≥20분	≥20분	이상없음
	용융질량흐름률	KS M 3408-1	가공후 변화값 ±20%	6%	이상없음
제품	내압시험 (20?, 12.4 MPa, 100시간)	KS M 3408-2	시험기간 동안 파괴가 없을것	이상없음	이상없음
	내압시험 (80?, 5.4 MPa, 165시간)	KS M 3408-2	시험기간 동안 파괴가 없을것	이상없음	이상없음
	충축복귀성	KS M 3408-2	≤3%	1%	이상없음
	파단점신장율	KS M 3408-2	≥350%	719%	이상없음
	산화유도시간	KS M 3408-2	≥20분	≥20분	이상없음
	용융질량흐름률	KS M 3408-2	가공후 변화값 ±20%	6%	이상없음

크게 기여할 수 있다. 또한 지중열교환기 설계 및 제조 기술 발전을 통한 선진국과의 기술 격차 감소 및 후발국과의 기술 차별화에 기여할 것으로 예상된다.

고효율 수직밀폐형 지중열교환기 설계 기초자료 구축으로 ‘제로에너지도시’, ‘에너지 자급자족 도시’ 등의 개념이 적용된 국내외 신도시 조성 사업 분야에 지열에너지 냉난방 시스템 적용을 위한 특화 기술로 활용이 가능할 것으로 보이며, 수직밀폐형 지중열교환기 고효율화와 함께 다른 형태의 밀폐형 지중열교환기(수평형, 에너지파일형, 슬래브형 등)의 고효율화와 설치비용 절감을 위한 기술로 확대 적용이 가능하므로, 지열에너지 시스템의 보급 활성화와 신뢰성 향상을 위한 기반 기술 확보에 기여할 것으로 판단된다. 지중열교환기 고효율화로 지열에너지 시스템의 성능과 신뢰성 향상을 이루고, 국가 에너지의 약 30%를 소비하고 있는 냉난방 공조분야의 에너지 절감에 크게 할 것으로 예상된다. 또한 지열에너지 냉난방 시스템의 성능과 효율 증대 및 시스템 개발 관련 국내 기술 개발 및 투자 활성화에 기여할 것으로 예되며, 산업화 시대를 거치면서 경제가 발전함에 따라 사람들의 삶의 질이 날로 향상되어 건

물의 냉난방 분야의 에너지 소비가 증가하고 있으므로, 고효율 지중열교환기 개발로 인하여 지열원 열펌프의 공조기기 산업분야에의 적극적 활용으로 국가 전력 피크 저감을 이룰 수 있어서 국가 경제·산업 측면에서 크게 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

3. 결론

내부나선형 지중열교환기는 내부에 나선형으로 리브가 형성됨으로써, 종래의 내부 평활형 지중열교환기의 구조에 비해 열매체가 파이프와 접촉하는 면적과 체류시간이 증대될 뿐만 아니라, 난류의 발생으로 파이프 내부에서 열매체의 온도가 불규칙하게 변해 열전도율이 크게 향상되고 이로 인해 열교환 효율이 증대되는 효과가 있다. 또한 지중열교환기 내부에 나선형 리브의 적용으로 구조적으로는 지중열교환기의 자체 강성 보강의 효과를 기대할 수 있어 시공부지의 지중 환경 변화에도 종래의 내부 평활형 지중열교환기에 비해 상대적으로 변형이 쉽게 일어나지 않을 정도의 충분한 내구성을 갖춘 신뢰도 높은 지중열교환기를 제공할 수 있다. 