



# 심부 단일 시추공 열교환기 기술의 세계적 동향

이태종  
한국지질자원연구원 지열자원연구실

## 1. 서론

현재 전세계적으로 화석연료 소비의 약 60%가 주택이나 사무실 등의 냉난방에 사용되고 있으며 따라서 그에 상응하는 이산화탄소의 배출량을 줄이는 것은 전세계적인 최우선과제로 손꼽히고 있다. 이에 따라 이산화탄소의 배출을 억제하는 신재생에너지에 대한 관심이 높아지고 있으며, 이중 지열은 연중 가동이 가능하고 어디서나 사용할 수 있는 유일한 유비쿼터스 신재생 에너지 자원으로서 중요한 역할을 담당할 것으로 기대된다.

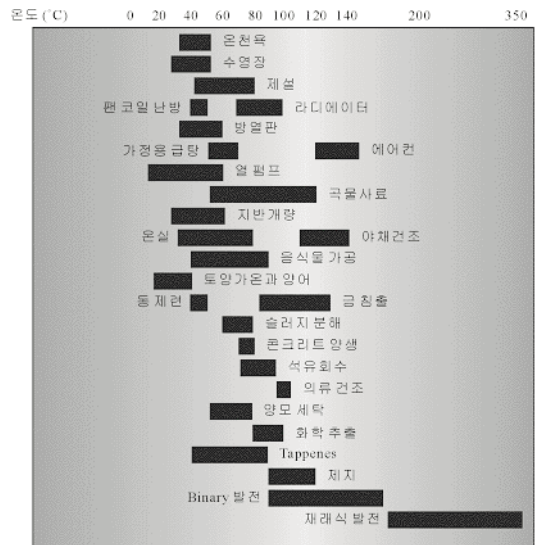
지열시스템은 심도에 따라서는 천부와 심부, 활용형태에 따라서는 폐쇄형과 개방형으로 분류할 수 있다. 이 중 천부 지중열의 활용은 주로 지중의 일정한 온도를 냉난방에 활용하는 개념으로 열펌프(heat pump)와 함께 사용하게 되며 열원으로 부터 열을 수집하는 지중열교환기의 형태에 따라 다양한 활용방법이 개발되어 있다. 한편, 심부 지열에너지의 개발 및 활용은 주로 심부 대수층으로부터 고온의 지열수를 생산하여 발전(發電) 혹은 지역난방, 시설영농 등에 활용하고자 하는 것으로 심부 시추에 의한 고온의 지열 대수층을 주된 목표로 삼는다.

이때, 생산되는 지열수의 온도에 따른 지열에너지의 활용은 크게 고온의 지열자원(>150 °C)의 경우에 지열발전(發電)을 통한 간접이용(indirect use)과 중저온의 지열자원(<150 °C)의 경우에 온천, 수영장, 급탕, 제설, 농작물의 건조, 유리온실, 양어, 지역난방 등에 활용하는 직접이용(direct use)으로 나뉜다. 직접이용에는 이 외에도 콘크

리트 양생, 슬러지 분해, 화학 추출, 제지 등 다양한 산업에의 응용도 포함되며 그림 1은 이러한 온도에 따른 지열의 활용을 도표로 나타낸 Lindal 도표(Lindal, 1973)를 나타낸다.

심부 지열에너지의 개발에 있어서 가장 큰 걸림돌은 심부 시추에 들어가는 막대한 비용과 실패의 가능성을 꼽을 수 있다. 지하 2 km 에서 깊게는 5 km에 이르는 심부 시추에 들어가는 막대한 비용과 시추 결과, 대수층을 만나지 못할 수도 있다는 불확실성이 심부 지열에너지의 개발에 투자를 어렵게 만드는 주된 요인이 될 것이다.

이러한 맥락에서 실패한 심부 시추공을 활용하기 위한 노력의 결과, 1994년에 독일의 기술자들에 의해 심부 시추공을 이용한 열교환 기술이 개



[그림 1] 지열유체의 이용방법을 나타내는 도표 (Lindal, 1973을 개선)

발되었다(Wetzel and Stutzke, 1999). 심부 시추공 열교환기(DBHE: deep borehole heat exchanger)라 불리는 이 기술은 단일 시추공에 동축(co-axial) 형태로 생산 파이프를 설치하여 파이프의 외벽과 시추공의 케이싱 사이를 통해 열매체가 지하 심부로 이동하면서 지반이 가지고 있는 열을 추출하고 이에 의해 뜨거워진 열매체를 시추공 중심에 설치된 생산 파이프를 통해 지상으로 양수하여 건물 등의 냉난방에 활용할 수 있도록 한다. 이전까지 심부 시추에 많은 예산을 투입했음에도 불구하고 대량의 지열수 확보에 실패할 경우에는 폐공처리를 해야 하는 추가적인 비용마저 감수해야 했으나, 이 기술의 개발로 심부 지열에너지 개발은 완전한 실패에서 벗어나 절반이나마 성공으로 이끌 수 있는 길이 열렸다고 할 수 있다.

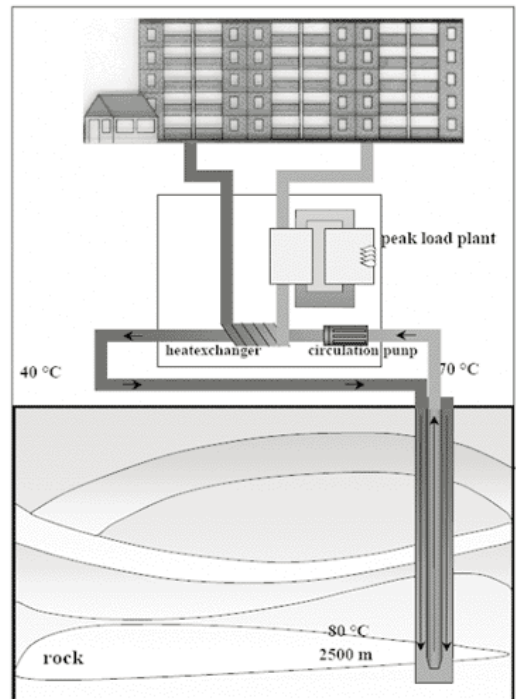
이 기술은 이후 독일의 Arnsberg, 스위스의 Weggis 와 Weissbad의 실패한 시추공에 적용되어 현재 가동 중이며, 독일의 Aachen 공대(RWTH Aachen)에서는 이 기술의 본격적인 개발을 위해 2004년 7월부터 순수한 DBHE의 설치를 위한 시추가 진행되어 현재 연구개발 중에 있다. 여기서는 우선 DBHE 기술을 소개하고 현재 DBHE 시스템이 설치되어 가동되고 있는 독일과 스위스의 설치 및 가동 예를 통해서 DBHE 기술의 세계적인 동향을 살펴보고자 한다.

## 2. 심부 시추공 열교환기(DBHE; deep borehole heat exchanger)

DBHE는 대략 1,500 m ~ 3,000 m에 이르는 시추공을 굴착하고 최종 심도에서의 바닥온도가 60 °C ~ 110 °C(Wetzel and Stutzke, 1999, Kohl et al, 2002)인 시추공에 설치한다. 시추공의 심도가 150 m ~ 200 m가 최대인 천부 지층 열 열교환기와는 달리 심도가 훨씬 깊기 때문에 U-tube는 사용될 수 없고 대신, 시추공 외벽을 지탱하도록 하는 케이싱의 안쪽에 생산 파이프를

삽입하는 동축(co-axial)배열을 이용한다. 이러한 동축 시스템에서 시추공 케이싱과 생산 파이프 사이의 공간을 통해 열교환 유체가 시추공 바닥을 향해 흘러 내려가고, 내려가면서 주위 암반으로부터 열을 공급받아 데워진 물은 다시 시추공 중심에 설치된 생산 파이프를 통해 지표로 양수된다. 이때, 생산파이프는 올라오는 도중의 열손실을 최소화하기 위해 열적으로 단열된 재료를 이용한다 (그림 2).

그림 2에서와 같이 DBHE 시스템에서는 순환펌프를 포함한 대부분의 기계장치들은 지상에 설치되므로 유지/보수를 위한 접근이 용이하고 간편하여 전체적인 시스템의 수명이 늘어나는 효과가 있으며, 또한 시추공 외부와 물질교환이 없는 자체 순환 시스템이기 때문에 환경오염의 우려가 없다. 거기에 열교환 유체가 시추공 내벽과 생산 파이프 내에 가득 차 있기 때문에 자분원리(artesian principle)에 의해 순환펌프의 전력사



[그림 2] 전형적인 DBHE 시스템 모식도(Kelly et al., 2005)

용 또한 매우 낮아 운전비용이 저렴하다는 장점도 있다.

천부 시스템과 마찬가지로 1차 순환수에 의해 지상으로 운반된 열은 열교환기를 통해 2차 순환회로로 옮겨진다. 생산되는 열은 자체로 고온이기 때문에 곧바로 지역난방 등에 공급할 수 있으며 때로는 에너지 활용을 극대화하기 위해 추가적으로 히트펌프를 사용하기도 한다. 생산된 열을 이용하여 여름철에는 흡착식(adsorption) 혹은 흡수식(absorption) 냉방 시스템과 함께 냉방에도 이용될 수 있다. 일반적으로 흡수식 냉방 시스템에는 75 oC 이내, 흡착식 냉방 시스템은 75 °C 이상의 온도가 가장 적절한 것으로 알려져 있으며 (Rafferty, 2003), 이는 우리나라의 평균 지온중 가을 25 oC/km를 감안하면 약 2.5 km 심도의 시추공에서 생산이 가능한 온도이다.

DBHE 시스템의 열추출율은 대략 20 ~ 54 W/m로 천부 지중열 시스템과 비슷한 수준으로 알려져 있다(Wetzel and Stutzke, 1999, Kohl et al, 2002). 하지만 최근의 연구에서는 현재 가동중인 DBHE 시스템이 추출 가능한 에너지에 비해 심각하게 낮게 평가되고 있다는 주장이 제기되었다. 즉, Kohl et al.(2002)은 가동중인 스위스 Weggis 시스템의 모니터링 자료를 이용하여 수치 시뮬레이션한 결과 2,300 m 심도 시추공을 이용한 열추출율은 최소한 85 W/m 이고, 유량을 최적으로 설계하면 열추출율은 이보다 더 클 것으로 전망했다.

### 3. 심부 시추공 열교환기 설치 사례

#### • 독일 Prenzlau 지열 플랜트

Prenzlau 지열 플랜트는 세계에서 최초로 co-axial 형의 심부 단일시추공 열교환기를 활용한 시스템으로 기록되어 있으며 폐공이 될뻔한 심부 시추공을 지역난방에 활용할 수 있도록 재활용한 전형적인 예라고 할 수 있다.

Prenzlau는 베를린에서 북쪽으로 약 100 km 떨

어진 곳에 위치하는 Brandenburg 주에 있으며 (그림 3) 인구 약 23,000 명의 작은 도시로 겨울철 평균온도가 3.8 °C로 매우 추위 난방 수요가 큰 지역에 위치한다. 독일의 북동쪽 지역에서의 지온은 대략적으로 1,000 m ~ 1,500 m 심도에서 40 ~ 55 °C, 1,500 m ~ 2000 m 심도에서는 55 ~ 80 °C의 분포를 보이며, 이러한 조건하에 위치한 Prenzlau 지열 플랜트는 독일이 서독과 동독으로 분단되어 있던 1987년에 완공되어 초기에는 약 42 °C의 지열수를 개발하여 501세대의 난방에 활용하였다.

개발 당시에는 1,050 m 깊이의 시추공을 통해 사암 대수층으로부터 지열수를 생산하여 난방에 활용하였으나 시스템의 설계 결함으로 인해 지열저류층에 심각한 손상이 발생하여 1989년에 운전을 중단하기에 이른다. 이후, 1991년에 수립된 열공급 종합계획에 의해 1994년에 이르러 기존



[그림 3] Prenzlau 지열 플랜트의 위치 (Wetzel and Stutzke, 1999)

에 실패한 시추공을 활용하여 새로운 Prenzlau 지열 플랜트가 가동을 시작했다. 새로운 지열 플랜트는 이미 존재하는 1,050 m의 시추공을 2.786 km까지 추가로 굴착하고, 이 중 약 950 m까지는 9 6/8 인치의 기존의 케이싱을 그대로 사용하고 그 하부는 최종심도까지 6 5/8 인치의 케이싱을 추가로 설치하여 구성하였다. 이때, 최종심도에서 온도는 108 °C였으며 유효 열교환 면적은 1,463 m<sup>2</sup>이다. 열교환 유체는 시추공의 내부의 열차폐된 생산 파이프와 케이싱의 사이를 따라 분당 5 ~ 65 m로 서서히 심부로 유동하며 열원으로 작용하는 시추공 주변 암반으로부터 열을 회수한다. 열교환 유체의 평균적인 시추공내 체류 시간은 4 ~ 10 시간으로 바닥까지 내려간 유체는 다시 시추공 중앙에 설치된 생산 파이프를 통해 지상으로 끌어올려져 판형 열교환기와 히트펌프를 포함한 지상 유닛에 열을 전해주고 다시 시추공을 따라 내려가는 순환을 반복한다.

Prenzlau 지열 플랜트에서는 지열 시스템과 더불어 겨울철 열 수요를 만족시키기 위해 보일러와 히트펌프를 함께 운영하는데 보통 여름철의 에너지 수요는 지열 시스템 만으로도 충분하다. 표 1은 DBHE 시스템을 포함한 전체 Prenzlau 지열 플랜트의 수익성 분석 자료로 지열시스템은 연중 전체 열 수요의 약 29.5%를 책임지고 있으며, 설비비용 중에는 지중설비가 약 75%로 대부분의 초기 투자비용은 시추를 포함한 지중설비에 들어가며 연중 투자비 회수율은 약 9%로 초기 투자비는 약 11년 후에는 모두 회수가 가능한 것으로 나타났다.

<표 1> 지열 플랜트 수익성 분석  
(Wetzel and Stutzke, 1999)

열 수요	연중 열 수요 : 11,500 MWh/a 평균 운수 수요 : 1,500 MWh/a
열 생산	지열 : 3,900 MWh/a 보일러 : 7,600 MWh/a
비용분석	투자비(지중설비) : 3,000,000 DM 투자비(지상설비) : 1,000,000 DM 연중 투자비 회수율 : 9% (회수기간 약 11년)

로 나타났다.

이러한 직접적인 수익에 더불어서 이산화탄소 배출량 감소라는 부가적인 이익도 창출되므로 초기 투자비 회수기간은 더욱 단축될 것이 분명하다. 즉, Prenzlau 지열 플랜트가 건설되기 전에 이 지역에서는 갈탄을 태워서 열을 공급하던 시스템으로 보일러를 병행하여 이용하는 현재 시스템은 이보다 약 20%의 이산화탄소의 배출 절감을 기대할 수 있다.

• 독일 Arnsberg의 수영장 시설

독일의 Arnsberg의 DBHE 시스템은 수영장에 서 필요로 하는 약 2.8 GWh/a의 열 수요 중 75%를 공급하고 있다. 지온증가율이 26 °C/km인 지중에 3,000 m 깊이의 시추공을 굴착하고, 최초 22인치로부터 최종 심도에서는 9 5/8 인치의 steel 케이싱을 설치하였다. 케이싱의 내부에 2 7/8 인치의 생산 파이프를 설치하고 약 10 ~ 20 m<sup>3</sup>/h의 유량으로 물을 순환시켜 약 250 ~ 350 kW의 열에너지를 생산한다. 이는 연중 운전시간을 8,500시간으로 가정했을 때 2.1 GWh/a에 해당되는 막대한 에너지이다.

• 독일 Aachen 공대(RWTH Aachen) 학생회관 SuperC 건물의 냉난방  
(<http://www.superc.rwth-aachen.de>)

독일의 Aachen 공대는 다른 모든 DBHE 활용 예와는 달리 순수한 DBHE 시스템의 연구 및 활용을 목적으로 심부 시추공을 굴착한 유일한 경우이다. 독일과 스위스의 다른 DBHE 시스템은 별도의 목적으로 시추가 이루어졌기 때문에 기초 자료가 매우 부족하지만 이 SuperC 프로젝트(그림 4)는 처음부터 DBHE의 활용을 위해 계획된 시추 및 시공이기 때문에 다른 지역에서 확보하지 못한 방대한 양의 기초자료를 확보하고 있어 (Speer, 2005) DBHE 시스템의 연구에 있어 매우 혁신적인 프로젝트라 할 수 있다.

학생회관인 SuperC 건물의 냉난방을 위해서

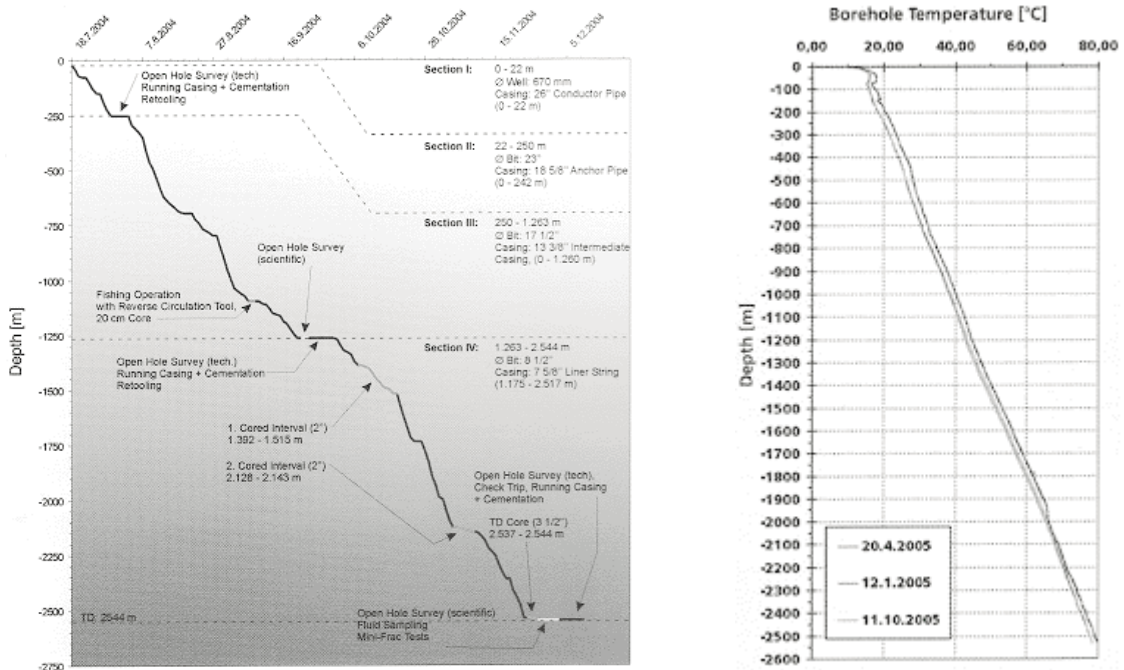
2,500 m의 시추공을 굴착하고 DBHE를 설치하여 생산온도 70 oC, 최대 450 kW의 열을 공급할



[그림 4] SuperC 프로젝트 (오른쪽 위 그림이 열의 수요처가 될 SuperC 건물이다)

수 있는 시스템 구축을 목표로 SuperC 건물이 지어지기 전인 2004년 7월에 시추가 시작되어 2004년 12월에 굴착이 완료되었다. 시추공의 구경은 지표에서 64 cm, 최대심도에서 19 cm로 계획되었다. 기초자료의 확보라는 측면에서 코어링을 통해 시추공 전체구간에 대해 코어를 획득하여 암석의 다양한 열적/물리적 성질을 측정하였고 건물 자체도 시추공의 위치에 건축하여 다양한 모니터링이 가능하도록 설계하였다.

시추는 최종적으로 2,544 m까지 굴착되었고 시추가 완료된 후 2005년 1월과 4월 그리고 10월의 3회에 걸쳐 온도검층을 실시한 결과 (그림 5), 시추 직후인 2005년 1월에는 시추시 사용한 이수의 영향으로 바닥온도가 72.5 °C로 측정되었으나 시추공이 안정된 2005년 4월에는 83.5 °C로 상승하였다. 이는 당초 목표로 하였던 바닥온도 85 °C까지는 미치지 못하였지만 상당히 타당하게 목표를 설정하였음을 보여주는 결과라고 할 수



[그림 5] 시추 공정표 (왼쪽) 및 온도검층 결과 (오른쪽)

있다. 이를 기초로 2006년에는 시추공 내부에 생산 파이프를 설치하였으며, 2007년 현재 가동중으로 보고되고 있으나 불행히도 아직 운전에 대한 자료를 공개하지 않고 있다.

생산된 에너지는 겨울에는 방열기와 천정을 통한 난방 혹은 바닥 난방에 이용될 것이며 여름철에는 흡착식 내방 시스템의 열원으로 이용될 것이다. 이 시스템에 의해 생산되는 에너지는 연중 약 625 MWt/a로 건물 열 수요의 약 80%를 충당할 수 있을 것으로 추정된다. 이는 연중 약 340톤의 이산화탄소 배출 절감에 해당된다.

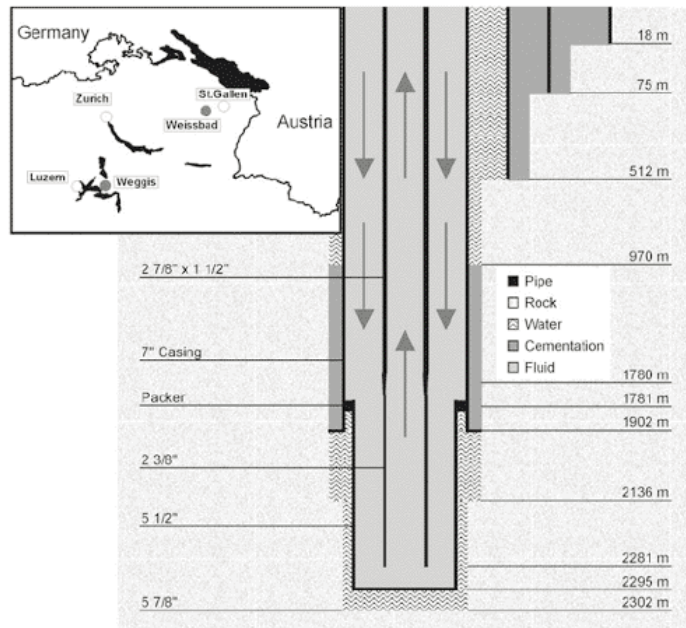
• 스위스 DBHE 지열 플랜트

스위스에서 DBHE를 설치하여 운영중인 곳은 현재까지 2곳으로 1994년에 운전을 시작한 Weggis 지열 플랜트와 1996년부터 운전 중에 있는 Weisbad 지열 플랜트가 그것이다.

우선, Weggis 지열 개발 프로젝트는 본래 심부의 사암과 역암으로 구성된 투수성이 좋은 퇴적층과 단층이 만나는 곳에서 대규모의 지열수를 개발

하고자 1993년에 2302 m의 심부 시추공의 굴착이 완료되었으나, 시추 결과 의외로 점토가 많아 이들이 공극을 막고 있어 심부에서 투수층을 발견하지 못하였다. 그러나 시추직후 수행된 온도검층 결과, 공저(2,133 m)에서 온도가 약 73 °C이고 평균지온경사는 약 30 °C/km로 나타났다.

당초 계획되었던 프로젝트에서 충분한 양의 지열수를 확보하지 못하였기 때문에 주변의 다세대 주택등에 열을 공급하고자 DBHE 시스템의 설치가 계획되었다. 이를 위해서 1,902 m까지 7인치, 1,780 m부터 시추공의 바닥심도인 2,295 m까지는 5 1/2 인치의 케이싱을 설치하고 열전달을 좋게하기 위해서 케이싱과 배면 암반의 사이를 그라우팅으로 채워 넣었다(그림 6). 이 케이싱은 주입부로 사용되고 열수의 생산은 시추공 중심에 설치된 파이프를 통해 이루어지도록 설계되었다. 생산 파이프는 1,780 m까지는 특수 고안된 재질의 파이프(내경 1 1/2 인치)를 이용하여 파이프 내부와 외부의 열교환이 이루어지지 않도록 하였고, 1,780 ~ 2,295 m까지는 steel pipe를 설치



[그림 6] Weggis DBHE 플랜트의 위치와 시추공 내 DBHE 설치 모식도 (Kohl et al., 2002)

하고 순수한 물을 열교환 유체로 사용하였다.

생산 파이프는 외벽을 따라 흘러 내려가는 차가운 유체와 파이프 내부를 통해 올라가는 뜨거운 유체 사이에 열교환이 이루어지지 않도록 해야 하며, Weggis에서는 이를 위해서 두 겹의 파이프를 이용하였다. 두 파이프 사이는 진공펌프를 이용하여 0.2 bar의 압력으로 두 파이프가 항상 밀착되도록 유지하여 파이프 사이의 공간에서 공기의 순환이 이루어지지 않도록 고안하였다.

이 시스템은 1994년에 완공되어 운전을 시작했으며, 운전 개시와 더불어 유입/유출되는 유체의 온도와 유량, 사용 전력 등에 대한 모니터링이 지속적으로 이루어졌다. 그림 7에 보인 것이 1995년 9월의 모니터링 자료로 유체의 순환과 회복 사이클의 전형적인 형태를 보인다. 유량(Q)의 곡선에서 유량이 0인 기간이 회복기간에 해당되고 0.48 ~ 0.91 m<sup>3</sup>/10 min (2.88 ~ 5.46 m<sup>3</sup>/h)의 유량을 보이는 기간이 가동 사이클에 해당된다. 가동중에 유출온도는 유입온도에 비해 약 4~5 °C 높은 것을 볼 수 있다.

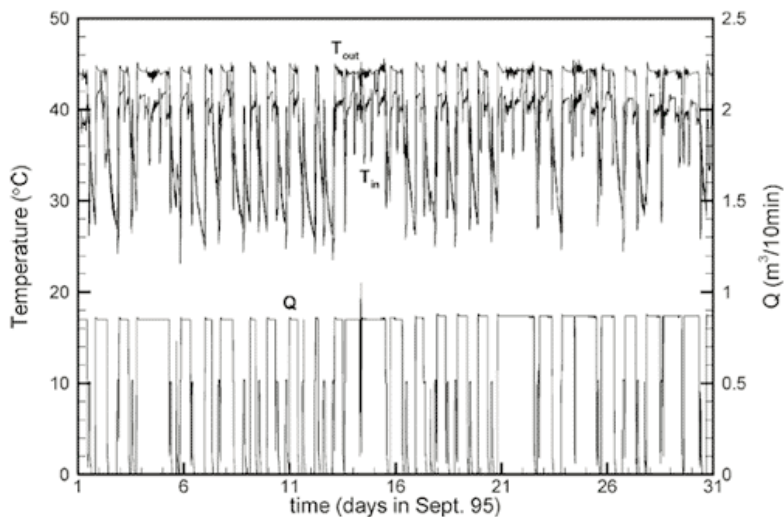
가동률은 겨울철에는 100%에 가까우며 온수만을 필요로 하는 여름철에는 20%에 그치며 1995

년 9월은 58%의 가동률을 보였다. 초기의 가동에 의해 Wiggis 플랜트로부터 추출한 에너지의 양은 1994/95의 난방기간에 112 MWh, 1995/96에는 약 238 MWh, 1996/97에는 약 223 MWh였으며, 이때 물의 순환에 필요한 에너지는 각각 17, 22, 20 MWh로 나타났다.

스위스의 DBHE 시스템의 두 번째 예인 Weissbad는 Zurich로부터 동쪽으로 약 62 km 떨어진 곳에 위치하며 심부 지열수 개발을 위하여 1993년에 심도 1.6 km 심도의 시추공을 굴착하였으나 온천지역 바로 에서 굴착이 이루어졌음에도 불구하고 심부 대수층을 만나지 못하였다. 이 시추공에 1,213.3 m까지 그라우팅을 하고 DBHE를 설치하여 운전중이며 1,200 m의 바닥온도는 약 45 °C 였다. 이 지열 플랜트에 대한 운전 데이터는 국제적으로 발표된 것을 찾을 수가 없었다.

#### 4. 심부 시추공 열교환기의 비용/편익 분석

그림 8은 DBHE 시스템의 비용과 편익 분석을 위해 지층의 특성 및 시추공의 깊이를 다양하게 변화시키며 시스템의 설치에 필요한 비용과 이로



[그림 7] 1995년 9월에 측정된 유입 및 유출 온도와 유량(Kohl et al., 2002)

부터 추출되는 열에너지의 비용을 시물레이션한 그림이다(Schaumann, 2002). 즉, 시추공 깊이 2,500 ~ 2,800 m, 암석의 열전도도 3.0 ~ 4.5 W/mK, 지온증가율 30 ~ 35 °C/km, 시추공의 바닥온도 85 ~ 108 °C, 가스펌프의 열용량 310 ~ 790 kWt을 가정했을 때, DBHE 시스템의 설치에 들어가는 총비용 중에서 각 시스템 유닛의 차지하는 상대적인 비율(a)과 2002년 독일의 유가를 기준으로 1 MWh 당 DBHE 시스템의 운영에 필요한 비용의 평균 및 표준편차를 그래프로 도시한 것(b)이다. (a)의 총비용 면에서는 지중에 설치되는 심부 시추공 열교환기의 설치비용이 약 47%로 가장 큰 비중을 차지하는 것을 볼 수 있다.

또한 그림 8 (b)의 그래프에서 DBHE는 연중 가동되어도 (6,000 ~ 8,000 h/a) 도시가스를 이용한 난방 (2004년 도시가스 가격을 기준 34 ~ 39 유로/MWh)보다 비용이 같거나 커서 도시가스에 비해 경쟁력이 없는 것으로 보이나 여름에 흡착식 혹은 흡수식 냉방에도 이용되고, 특히 최근과 같이 원유가격이 배럴당 100달러에 육박하는 고유가 상황에서는 DBHE 시스템의 채산성은 확보될 것으로 보인다.

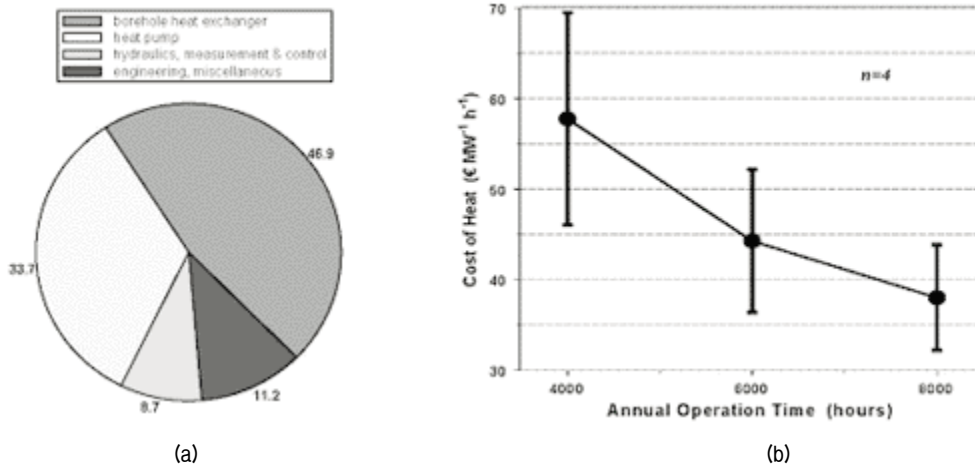
이에 더해서 이산화탄소의 절감에 따른 추가적인 이득을 얻을 수 있는데 이산화탄소 배출권의

가격은 매우 급격한 상승세를 보이고 있다. 즉, 2004년 말부터 The European Energy Exchange AG(EEX, <http://www.eex.de>)에서는 CO<sub>2</sub> 배출 규제에 따른 그날그날의 시장가격인 European Carbon Index를 발표하고 있으며, 2004년 12월 17일에 EU 할당량 거래가 시작된 이래 처음에는 CO<sub>2</sub> 톤당 8.45 유로이던 것이 2005년 6월 26일에는 23유로로 상승했다.

앞서 시물레이션 한 예제에서와 같이 열용량 310 ~ 790 kWt, 연간 운전시간 6000-8000 h/a인 시스템은 가스 보일러에 비해 연간 250-1,260 ton, 기름 보일러에 비해 연간 350-1770 ton의 이산화탄소 배출을 억제할 수 있고, 이는 2005년 6월의 가격인 23유로/ton으로 환산할 경우, 가스 보일러에 비해서는 연간 5,700 ~ 29,000 유로, 기름 보일러에 비해서는 연간 8,000~40,100 유로의 추가적인 이득을 얻을 수 있다.

## 5. 결론

심부시추공 열교환기 (DBHE)는 우선 지열 저류층을 찾기 위한 탐사 및 시추의 위험이 없다는 측면과 hydrothermal system과 같은 여타의 목적으로 기 굴착된 시추공을 이용하여 설치가 가



[그림 8] DBHE 시스템의 설비 비용의 비율(a) 및 1 MWh 당 설치 비용(b): (Schaumann, 2002; Clauser, 2006)



능하다는 측면에서 심부 시추의 실패에 대하여 일정부분 보상을 받을 수 있고 무엇보다 실패의 위험이 없는 매우 유용한 기술임에 틀림없다. 또한 지온증가율에 따라 추출가능한 열의 양이 다를 수는 있으나 이론상으로는 어디든 설치가 가능한 유비쿼터스 시스템으로 지열에너지의 개발 및 활용에 많은 기여가 예상되며 지반과 직접적인 물질의 교환이 없으므로 환경문제로부터도 자유롭다. 그리고 시추공안에 설치되는 장치는 케이싱과 파이프가 전부이므로 수명이 길며 유지/보수 비용도 거의 들지 않는다.

DBHE의 단점이라면 모든 지열시스템이 가지고 있는 문제인 초기투자비용이 높다는 측면과 지열수를 직접 개발하는 Hydrogeothermal system 보다는 생산할 수 있는 에너지가 적다는 것을 들 수 있다. 그러나 다양한 시나리오로 비용과 편익을 시뮬레이션해 본 결과, 단위 MWt의 열을 생산하기 위한 비용은 도시가스과 비슷한 수준이며 특히 요즘과 같이 배럴당 100달러에 육박하는 고유가 시대에는 도시가스에 비해서도 채산성을 확보할 수 있을 것이다. 게다가 막대한 양의 이산화탄소 배출 절감에 의한 추가적인 이득까지 고려한다면 충분한 채산성을 확보할 수 있을 것으로 보인다.

## 6. 사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 ‘지열수 자원 실용화 기술 개발’의 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

## 7. 참고 문헌

1. Clauser, C., 2006, Geothermal Energy, In: Heinloth, K. (ed), Landolt-Bornstein, Group VIII “Advanced Materials and Technologies” Vol. 3 “Energy Technologies”, Subvol. C “Renewable Energies”, Springer Verlag, Heidelberg-Berlin, 480-595.
2. Kelly J., Goodman, R., Jones, G. L., O’Neill, N., and Pasquali, R., 2005, Geothermal Energy Review of Northern Ireland, Final Report to INTERREG 3194/01.05, The CSA Group.
3. Kohl, T., Brenni, R., and Eugster, W., 2002, System performance of a deep borehole heat exchanger, Geothermics, 31, 687-708.
4. Lindal, B., 1973, Industrial and other applications of geothermal energy. In: Armstead, H.C.H., ed., Geothermal Energy, UNESCO, Paris, 135-148.
5. Rafferty, K. D., 2003, in: Dickson, M. H., Fanelli, M., Ed., Geothermal Energy: Utilization and Technology, UNESCO, Paris, 81-90.
6. Schaumann, G., 2002, Untersuchung der Wirtschaftlichkeit der geothermischen Wärmegewinnung in Deutschland im Vergleich zu konventionellen Verfahren sowie die Beurteilung der Erfolgsaussichten für die Geothermie bei heutigen Energiepreisen, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 0327114, Transferstelle für rationelle und regenerative Energienutzung (TSB), Bingen (<http://www.tsb-energie.de/service/publikationen/2002/tsb-geobericht.pdf>)
7. Speer, S. C., 2005, Design Calculation for Optimising of a Deep Borehole Heat Exchanger, Ph. D. thesis, RWTH Aachen.
8. Wetzel, H., and Stutzke, R., 1999, Geothermal Energy-Prenzlau (Germany), <http://www.agores.org/Publications/CityRES/English/Prenzlau-DE-english.pdf>