

우리나라 심부 지열에너지 개발 및 활용 현황

이 태 종

한국지질자원연구원 지열자원연구실

1. 서론

지열에너지는 지구 내부가 가지고 있는 열로서 크기는 지구가 생성될 당시 축적된 원시에너지와 지구 내부의 방사성 동위원소의 붕괴에 의해 지속적으로 발생하는 열로 이루어진다. 지구 중심의 온도는 약 6,000°C가 넘어 지하로 내려갈수록 지온은 높아지게 되며 평균적으로 1 km 당 약 25 ~ 30°C 정도 높아진다. 이러한 지열 에너지는 미국, 필리핀, 인도네시아, 멕시코, 이탈리아, 뉴질랜드, 일본, 아이슬랜드 등의 화산활동이나 지각변동작용이 활발한 나라에서 150°C 이상의 지열수를 개발하여 지열발전소에서 전기를 생산하거나 대규모 아파트 단지 등에 지열수를 공급하여 지역난방에 활용하는 등 활발하게 지열에너지를 개발, 활용하고 있다.

한편으로, 최근에는 기술의 비약적인 발전에 힘입어 지하 4 km 이상 시추하고 지상에서 물을 강제 고압으로 주입해서 150°C 이상의 열수를 얻어내어 전기를 생산하는 개선된 지열 시스템(EGS, Enhanced 또는 Engineered Geothermal System) 기술이 개발되어 프랑스 알사스 지방 등에서 성공적으로 활용되고 있다. 이러한 EGS 기술은 화산지대가 아니거나, 땅속에 지열수가 부족하지 않더라도 지열에너지의 개발 및 활용을 가능케 하는 기술로서 지열에너지 자원이 진정한

유비쿼터스 에너지 자원임을 입증하는 기술이라 할 수 있다. 이러한 EGS 기술에는 정밀 지질조사 기술, 심부 탐사 기술, 심부 시추 기술, 수압 파쇄 기술, 심부 시추공 계측 및 모니터링 기술, 지반 응력 해석 기술, 지하 유체 거동 시뮬레이션 기술, 저온 발전 기술 등 첨단 기술들이 집약되어야 하며, 현재 전 세계적으로 EGS를 위한 관련 기술 개발에 박차를 가하고 있는 중이다.

비록 화산활동 등에 의한 고온의 지열에너지 자원이 부족하지 않지만 에너지의 97%를 수입에 의존하는 우리나라에서는 지하 심부에 잠재된 막대한 양의 순수 국산 청정에너지 자원인 지열에너지를 개발하여 활용이 필수적인 것이며 이를 위한 적절한 연구개발 및 투자가 이루어져야 할 시점이다.

국내의 지열에너지 개발을 위한 노력은 지난 2003년부터 한국지질자원연구원에서 추진중인 포항 심부 지열에너지 개발 사업이 거의 유일하다고 할 수 있으며 여기서는 포항 지열에너지 개발 사업에서 개발된 기술 및 성과를 중심으로 기술하여 향후 우리나라에서 EGS 발전을 통한 지열에너지 개발 가능성을 살펴보고자 한다.

2. 우리나라 온천 이용 현황

우리나라에서의 지열의 이용은 고대부터 사용되어오던 원시적인 형태인 온천으로서의 활용이 전

부이며 2007년 현재 전국의 온천이용 현황(행정자치부, 2007)을 살펴보면 전국의 온천지는 총 349개 지역이며 온천이용업소는 606개소, 온천이용객은 2005년도 기준으로 약 52백만 명에 이른다. 이러한 온천수를 개발하기 위한 온천 시추공의 시추 심도는 전국적으로 평균 683~738 m 깊이며 이중 가장 깊은 것은 2 km에 이르기도 한다. 온천수의 수온은 최하 25℃ 이며 최고는 부곡온천이 78℃ 로 가장 높다. 온천수 온도에 따라 분포를 살펴보면 전국 온천의 약 59%가 25 ~ 29℃ 범위의 온천수를 사용하고 있으며, 30 ~ 35℃ 범위에 약 13%, 35 ~ 40℃ 범위에 약 10% 이며 45℃ 이상인 것들도 18%를 차지한다.

3. 우리나라 지열자원 분포

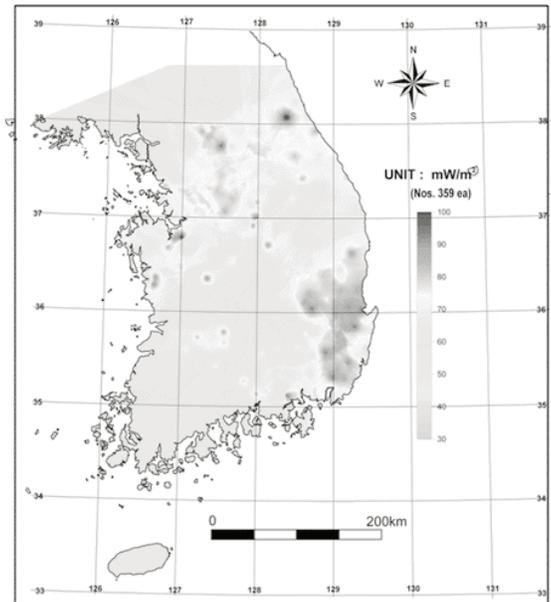
우리나라에서의 과학적인 지열연구는 일제강점기인 1920년대부터 시작된 온천자원조사가 시초로 국내의 우수한 온천에 대해 지질조사, 지화학조사, 지온측정, 물리탐사, 시추조사 등의 조사를 수행하였다.

온천조사가 아닌 지열조사는 1968년에 한일공동 연구로서 전국에 산재한 14개 광산의 시추공과 수평갱도에 있는 시추공에서 지온증가율(geothermal gradient)을 측정하고, 이후 지질조사소(한국지질자원연구원의 전신)에서 추가로 수집한 총 22개 광산에서 측정한 지온증가율과 암석의 열전도도를 측정하고 이 중 자료가 양호한 18개소의 지열류량(heat flow)를 계산, 제시한 것이 시초라 할 수 있다. 이후 1996년도에 당시까지의 시추공 온도검층자료와 지열류량 측정 자료를 총망라하여 전국적인 규모로는 처음으로 지온경사분포도, 심도 1 km 및 2 km에서의 추정 온도 분포도 및 지열류량 분포도가 작성되었다.

이후, 산발적으로 국내 지열자원에 대한 조사가 행해지다가 2003년 한국지질자원연구원에서 지열자원연구실이 발족되면서 기존의 온천시추 등의 자료를 수집하고 암석의 열물성을 측정하여

2007년 기준으로 총 359개의 지열류량 자료와 580개의 지온증가율 자료, 또한 1,560개의 암석 샘플에 대한 열전도도를 측정하여, 남한에 대한 지온증가율 분포도, 지열류량 분포도(그림 1), 그리고 지역별, 지질별 암석의 열전도도 분포도가 작성되었다. 이들 지열자원분포와 관련된 주제도는 매년 자료를 추가하여 갱신되고 있으며, 2007년 작성된 국내 심부 기반암의 열생산율(heat production) 분포도를 포함하여 2008년에는 지열자원 종합 DB 구축으로 이어질 것이다.

이렇게 축적된 자료를 바탕으로 우리나라 지하 1 km 에서 5 km 심도에서 EGS 기술을 통하여 추출가능한 지열에너지 자원의 총량을 산출한 결과 총 484억 TOE(석유환산톤)에 이르는 것으로 나타났으며 이는 2006년 우리나라 전체 1차 에너지 총소비량(2.33억 TOE)의 약 200배에 해당되는 막대한 양이다(박성호 등, 2008). 이 양은 전체 우리나라 면적에서 약 2%를 개발하였을 때를 가정한 것으로, 실제 개발 가능한 양은 수용처



[그림 1] 지열류량 분포도, 총 359개의 지열류량 자료 (이태중 등, 2007)

의 분포, 심부굴착기술, 열변환 기술, 열수송기술 등에 따라 달라질 것이며 따라서 이러한 심부 지열에너지 개발을 위한 핵심기술들의 개발이 시급하다 할 수 있다.

4. 포항 심부 지열에너지 개발

우리의 발 밑에 잠재한 이러한 막대한 지열에너지의 개발을 위한 노력은 국내에서도 이미 1960년대 말부터 그 타당성에 대한 연구결과로부터 이어져 왔으며, 이러한 지속적인 시도의 결과로 1991년에는 우리나라에서 처음으로 지구물리학적, 지구화학적 탐사기법을 총 동원하여 실제적인 지열개발 시추를 통해 지역난방에 까지 활용하기 위한 종합적인 연구개발 사업이 착수되었다(정승환 등, 1991). 이 사업은 경남 마산-창원 부근의 심부 지열수 부존 지역을 탐사하고 시추하여 실제 지역난방에 활용코자 계획되었는데 당시로서는 매우 깊은 심도인 1.5 km까지의 탐사를 목표로 항공자력탐사, 중력탐사, 방사능탐사 등 광역탐사기술을 비롯하여 심부 물리탐사, 지화학 탐사가 동원되어 대상지역의 지열부존 가능성 및 심부 과쇄대 발달 가능성을 확인하였다. 이 사업은 또 다른 대체에너지개발사업인 제주도 지열자원 탐사 및 최적활용방안 연구 (이상규 등, 1993)로

이어져 제주도 전역에 대해 지질과학 및 자원공학 기술이 종합적으로 동원된 조사가 이루어짐으로써, 제주도 서부 지역에서 지열부존 유망지역을 추출하고 시험시추공의 구체적인 위치를 제시하였다. 그러나 불행히도 이 두 사업은 고비용을 요구하는 시험 시추의 위험부담에 따른 정부의 인식부족으로 더 이상의 연구비 지원을 받지 못하여 확인을 위한 시추까지 연결되지 못하였다.

2003년에 이르러서 본격적으로 경상북도 포항시 흥해읍에서 지하 2 km 심도에서 75 °C 온도의 지열수를 개발하여 주변의 아파트단지의 지역난방 및 시설영농, 양어 등에 활용을 목적으로 하는 연구가 시작되어, 1.5 km 심도 시험 시추공에서 온도 51 °C, 하루 560 톤의 지열수의 개발에 성공하였고(그림 2), 본격적인 지열수의 개발 및 활용을 위해 현재 2.385 km 심도까지 대구경 개발시추공(최초 내경 12 인치, 최종 내경 6인치)의 시추가 완료되어 있다(그림 3).

이 연구개발 사업에서는 심부 지열수가 배태될 가능성이 있는 심부 과쇄대를 주된 대상으로 광역적인 지질조사, 물리탐사, 지하수 조사가 수행되었고 구체적인 시추위치 선정을 위해 심부 탐사 기술인 3차원 자기지전류탐사(MT; magnetotelluric survey) 및 인공송신원 가청주파수대역 전자탐사(CSAMT; controlled source audio-frequency



[그림 2] 포항 1.5 km 시험 시추공에서 개발된 지열수

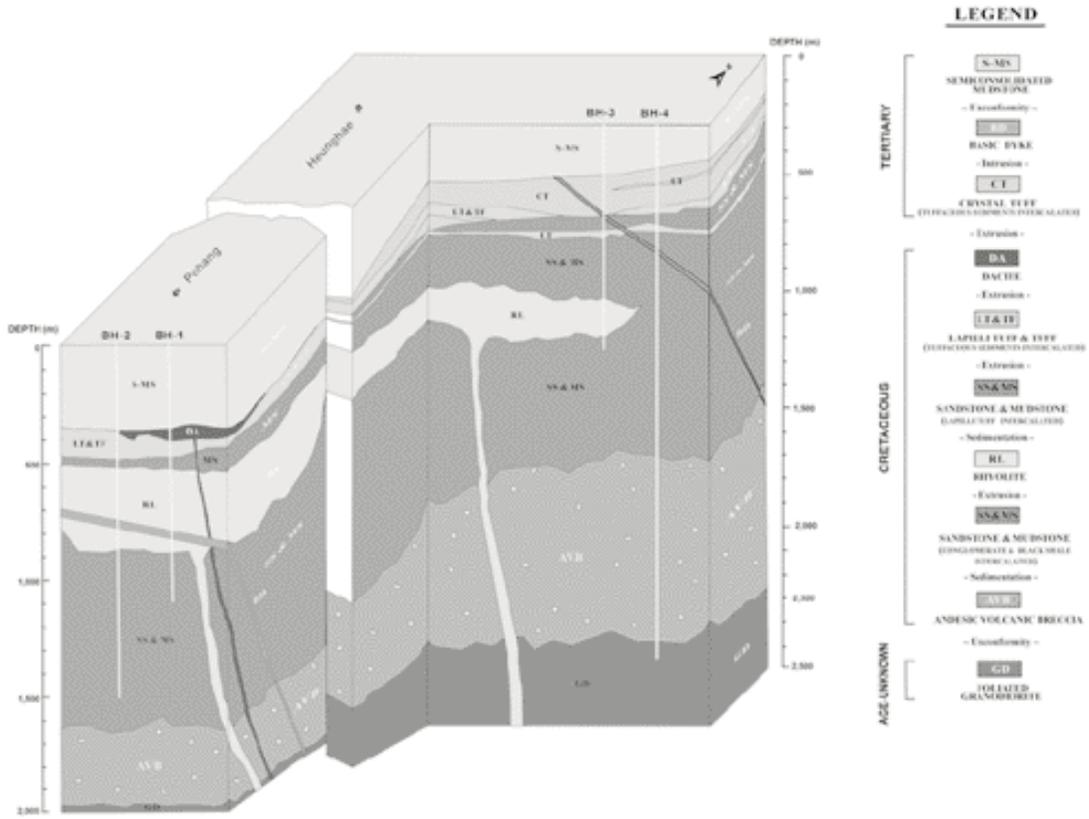


[그림 3] 포항 2.38 km 심부 시추공 굴착을 위한 시추 장비

magnetotelluric survey) 등이 수행되었다. 이러한 탐사자료 및 다양한 광역 조사의 종합적인 해석결과를 토대로 두 개의 시험시추공(BH-1, BH-2)이 시추되었다. 이 중 BH-1은 연구 목적으로 1.1 km 심도까지 전구간 코어링을 실시하여 심도에 따른 암석 샘플을 채취하여 이를 코어검층을 통한 지질구조 파악, 코어의 물성이나 열물성 측정 등에 활용하였다. 또한 BH-2는 시험 개발공으로서 1.5 km 심도까지 굴착되었으며, 양수 시험에 의해 온도 51℃, 하루 560 톤의 지열수 개발이 가능함을 확인하였다(그림 4).

이러한 과정에서 시추는 모두 순수 국내 기술에 의해 이루어졌으나, 이전까지 이루어진 국내 심부 시추는 온천개발을 위한 것이었고, 과학적인 근거나 자료의 축적이 거의 없는 상태에서 대부분 현

장감독의 ‘경험’에 의존하는 것이 대부분이었다. 따라서 심부 시추에 대한 수요도 한정되었거니와 경험에 의존하고 획득된 know-how에 대한 기록이 이루어지지 않아 기술축적이 이루어지기 어려운 환경에 있었다. 이러한 국내의 시추기술을 발전시키기 위해 사용한 이수의 밀도, 이수 제조를 위한 약품 사용량, 드릴비트의 종류, 드릴비트의 사용기간, 굴진속도, 작업시간, 투여 인력, 굴진 중 발생하는 제반 문제 등을 상세히 기록함으로써 향후 유용한 자료로서 활용코자 하였다. 이러한 노력에도 불구하고 국내 시추장비 및 시추기술의 한계로 인하여 2 km 심도의 대구경 개발공 시추에는 상당한 어려움이 있었으며 많은 시행착오와 기간이 소요되어 2.385 km의 대구경 시추공을 완성하였다.



[그림 4] 포항 심부 시추 및 지질조사 결과 작성된 3차원 지질 모식도 (송윤호 등, 2006)

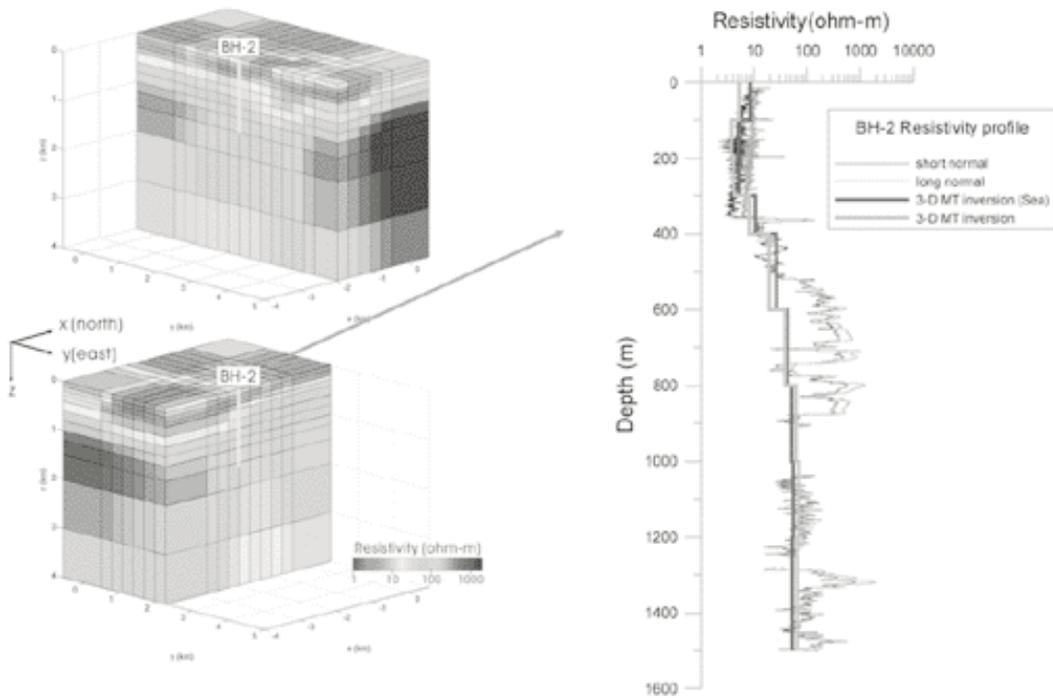
이는 국내 기술로 이루어진 최초의 2 km 이상 대구경 심부 시추로서 그 의의가 크다고 할 수 있으나, 자동화된 시추시설과 시추 중에 방향을 조절하고 원하는 심도의 원하는 위치까지 굴착하는 방향성 시추와 굴진 중에 시추공 주변의 각종 정보를 실시간으로 획득하는 LWD(logging while drilling) 기술까지 개발되어 있고 4 km 심도 시추공을 3개월에 완성하는 선진국에 비해서는 그 기술격차가 매우 크다. 향후 국내에서 EGS 기술 개발을 위해서는 무엇보다도 시급한 것이 선진 심부 시추기술의 개발이라 하겠다. 그림 4는 포항 흥해지역에서 심부지열에너지 개발사업과 관련되어 시추된 4개의 시추공 BH-1 ~ BH-4의 시

추조사 결과와 지질조사 결과를 토대로 작성한 흥해지역의 3차원 지질단면 모식도이다.

한편으로 기술개발에 의해 이미 세계적인 수준에 올라 있는 분야도 있는데, 지질 및 심부 탐사 기술이 그것이다. 지질에 있어서는 한국지질자원 연구원에서 국내의 지질 및 지열자원에 대한 다양한 자료를 축적하고 있다(그림 5). 특히, 심부 탐사 기술의 경우에는 가탐심도가 깊어 육상에서는 효용성이 가장 높은 것으로 알려져 있는 MT 탐사기술에서 이 연구개발 사업을 통해 3차원 자료획득 및 자료처리 기술을 현장에 적용하고 세계 최초로 3차원 지형 및 바다의 영향을 고려한 해석 기술(그림 6) 등 이미 세계적인 기술 수준에



[그림 5] 포항 흥해지역 부근 상세 지질구조 및 선구조 분포(이태종 등, 2007)



[그림 6] 바다를 고려한 3차원 MT 탐사 결과 및 검증자료와 비교

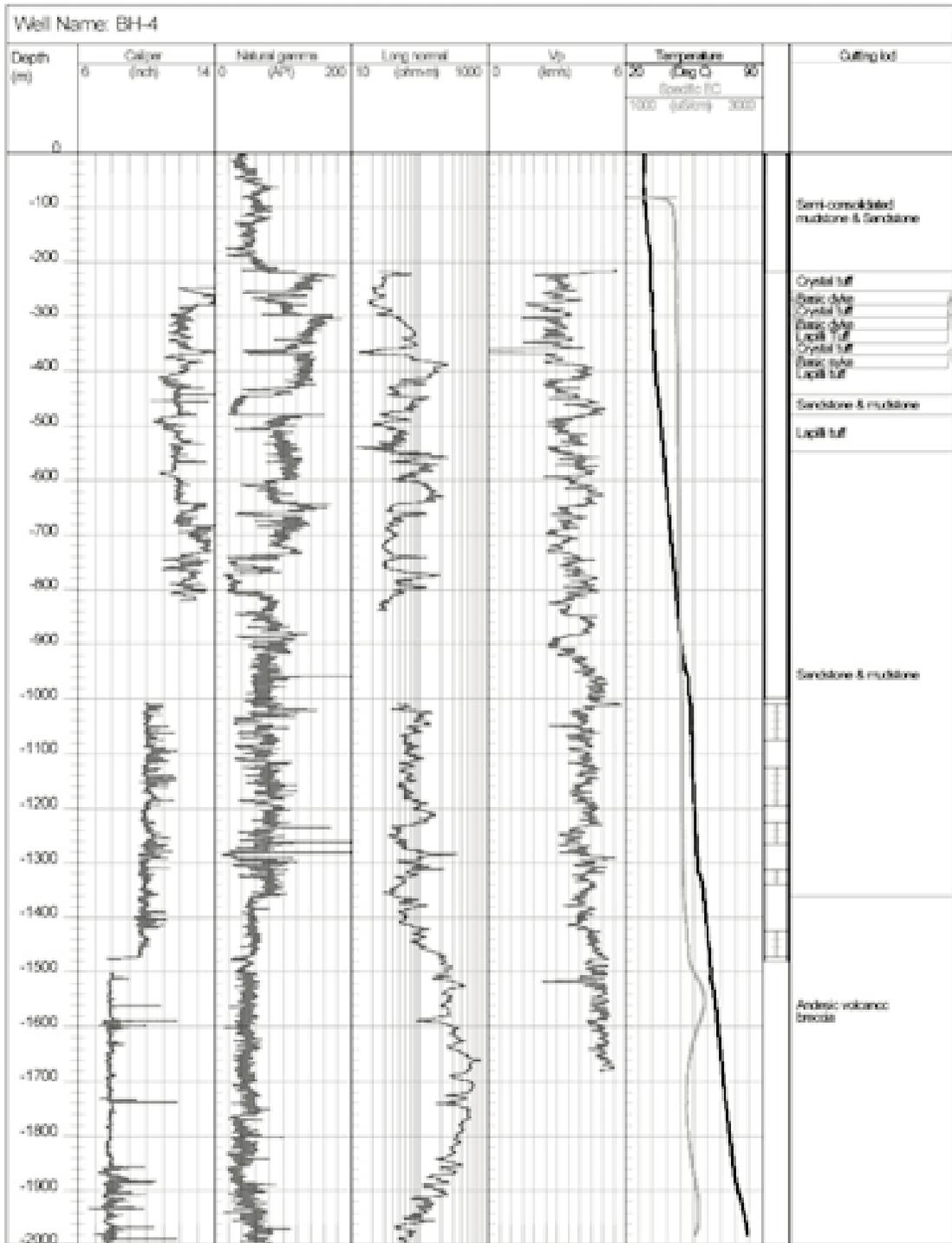
올라서 있다.

심부 시추공 조사 중 물리검층의 경우, 기존의 국내에서 보유하고 있는 검층 센서들은 모두 1 km 이내의 저온, 저압용으로 대부분 건설, 토목 분야에서 활용되거나 저온의 온천조사 등에 이용되던 것들이다. 이러한 센서들을 이용하여 2.383 km 시추공에 대한 다양한 물리검층을 시도했으나 검층센서의 온도 및 압력 한계와 센서를 시추공에 매달아 내리는 wire의 한계(최대 2 km)에 부딪혀 물리검층은 최대 2 km 심도까지만 가능했다(그림 7). 현재 한국지질자원연구원에서 3 km wire와 고온 고압 하에서 견딜 수 있는 센서의 도입을 추진 중에 있다.

이 외에도 동 연구사업에서는 시추 중 발생하는 이수의 밀도를 조절하여 안정적인 시추를 피하는 시추공 안정성 분석 기술, 지열수의 희토류 성분의 화학분석으로부터 지열수의 근원을 추적하는

기술, 양수에 의한 저류층 변동과 지열수의 유동 경로 추적을 위한 자연전위 모니터링 기술, 지하수위 모니터링, 지열 저류층 3차원 시물레이션 기술 등 다양한 기술의 개발에 매진하여 일부는 상당한 기술수준에 이르러 있다 (이태중 등, 2007).

이러한 기술개발과 더불어 현재 굴착된 2.385 km 심도 개발 시추공의 저류층 평가가 완료되고 본격적인 개발이 시작된다면 BH-2 시추공에서 이미 확보된 온도 51 °C, 하루 560 톤의 지열수와 함께 일차적으로 주변의 아파트의 대규모 난방에 공급되고 난방에 활용된 지열수를 다시 주변 시설영농이나 양어장 시설에 공급하여 활용하는 직렬이용방식(cascade utilization)으로 지열수를 활용하고, 또한 지속가능한 (sustainable) 지열수의 활용을 위하여 사용된 지열수는 다시 환원공을 통해 지하로 되돌려 보내는 순환활용시스템으로 구축될 계획이다.



[그림 7] 포항 2.38 km 심부 시추공의 물리검층 결과(송운호 등, 2006)

5. 결론

이상에서 과거로부터 현재까지 우리나라 지열수의 개발 및 활용 현황을 살펴보았으며 그러한 심부 지열에너지의 개발에 필요한 핵심기술들의 수준을 살펴보았다. 현재까지 우리나라에서는 지열에너지가 온천욕을 위해서만 활용되고 있으며 유일하게 포항지역에서 대규모 지역난방과 시설영농, 양어시설 등에 활용하기 위한 프로젝트가 진행 중에 있다.

비록, 1990년대부터 이어져 온 일련의 노력에 의해 일부 핵심 기술들은 세계적인 수준에 이르러 있기도 하고 현재 꾸준히 개발되고 있다고는 하나, 우리나라에서 심부 지열에너지를 활발히 개발하고 활용으로 이어지기 위해서는 아직 도입 혹은 개발되어야 할 기술들이 우리 앞에 산재해 있다. 특히, 지하 5 km 이내에 부존하고 있는 막대한 양의 지열에너지를 개발하기 위해서 필수적인 심부 시추기술 및 심부 저류층 평가 기술, 심부 모니터링 기술, 시뮬레이션 기술, 수압파쇄 기술, 고효율 저온 발전 기술, 저류층 운용 및 유지/보수 기술 등은 시급히 도입 혹은 개발되어야 할 과제로 남아 있다.

6. 시사

이 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 ‘지

열수 자원 실용화 기술 개발’의 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

7. 참고문헌

1. 박성호, 이영민, 김종찬, 김형찬, 구민호, 2008, 지열에너지 자원 활용을 위한 한국의 지열에너지 부존량 산출, UN이 정한 지구의 해 선포식 및 지구과학 한마당 축제, p. 142.
2. 송운호, 이창범 외 20인, 2006, 심부 지열에너지 개발 사업, 한국지질자원연구원 OAA2003001-2006(4), 과학기술부, 190p.
3. 이상규, 정성남 외 26인, 1993, 제주도 지열 자원탐사 및 최적 활용방안 연구 (I), 한국자원연구소 931K101-113AP1, 상공자원부, 235p.
4. 이태중, 송운호 외 15인, 2007, 지열수 자원 실용화 기술 개발, 한국지질자원연구원 GP2007-002-01-2007(1), 과학기술부, 161p.
6. 정승환, 진명식 외 23인, 1991, 마산, 창원 부근의 대규모 지역난방을 위한 지열에너지 탐사 및 개발 연구, 한국자원연구소 911K101-113AP1, 동력자원부, 172p.
7. 행정자치부, 2007, 온천담당자 및 전문기관 간담회 회의자료. 