

지열에너지자원 개발, 활용 기술의 동향 및 전망

송윤호, 이영민¹⁾

Status and Outlook of Geothermal Energy Exploitation Technologies

Yoonho Song and Youngmin Lee

Key words : geothermal energy resource(지열에너지자원), sustainability (지속가능성), 지열류량(terrestrial heat flow), 열전도(thermal conduction), geothermal heat pump(지열 열펌프)

Abstract : Geothermal energy is the natural heat of the Earth. Enormous amounts of thermal energy are continuously generated by the decay of radioactive isotopes of underground rocks and stored in the Earth's interior. Therefore, geothermal energy is one of the most important sustainable energy resources. Recent trends of geothermal energy exploitation technologies focus on the Earth scientific approach to geothermal heat pump system, enhanced geothermal system, aquifer thermal energy storage, underground thermal energy storage, and fluid/heat flow modeling for geothermal wells. Geothermal heat pump distribution in Korea is still in its starting phase in terms of areal utilization sense, we, however, expect to come up with national supply of over 1,000,000 toe by 2020.

1. 서론

2000년대 들어 우리나라에서도 지열에너지를 이용한 냉난방 공급이 폭발적으로 증가하고 있다. 그러나 전체적인 공급량은 아직도 지열 이용 선진국에 비해 무시할 정도의 수준에 불과하고 또한 무궁무진하게 부존하고 있는 심부 지열에너지자원을 이용한 발전이나 지역난방 공급은 아직까지 실용화되지 않고 있는 실정이다. 더욱이 지열에너지자원은 인류가 가지고 있는 가장 오래된 에너지자원 중의 하나이며, 현재 대수력을 제외한 신재생에너지자원 중에서 가장 많은 에너지를 공급하고 있음에도 불구하고 우리나라에서는 그 중요성이 상대적으로 낮게 평가되고 있다.

이와 같이 지열에너지자원의 중요성이 낮게 평가되고 있음의 원인으로서는 물론 본격적인 기술개발 및 보급이 뒤쳐진 때문이지만, 이와 더불어 지열에 대한 정확한 이해 자체가 일반대중에 게나 정책결정자, 심지어는 에너지 전문가들에게 부족한 것도 하나의 이유가 될 것이다. 여기서는 지열의 근원을 간단히 살펴봄으로써 태양열과 지열의 차이를 알아보고, 최근 선진국의 연구동향 그리고 우리나라에서의 전망에 대해 살펴본다. 외국의 개발사례에 대한 전반적인 고찰은 이미 몇몇 논문에서 자세히 다루어져 있으므로(예, 송윤호, 안은영, 2005) 여기서는 생략한다.

2. 지열에너지의 근원

지열에너지란 지구가 가지고 있는 열 에너지를 총칭하나 최근에 지열에너지는 인간에 의해 발견되고 개발된, 또는 개발될 수 있는 지구의 열을 지칭하는 의미로 자주 쓰인다. 따라서 지열에너지자원이란 지하를 구성하고 있는 토양, 암반 및 지하수가 가지고 있는 열 에너지자원으로 정의할 수 있으며, 여기서의 열은 그 온도의 높낮이와 관계없다. 즉 지하의 연중 일정한 온도만으로도 충분한 에너지자원이 되므로 따라서 지열에너지자원 특히 냉난방에 활용되는 천부 지중열을 소위 ubiquitous 자원으로 부를 수 있게 된다.

지구의 평균 지열류량(단위면적당 열방출량)은 전세계에서의 20,201개(대륙자료 13,249개; 해양자료 6,952)의 지열류량자료에 의해 결정되었는데, 대륙의 평균 지열류량은 67mW/m^2 이고, 해양의 평균지열류량은 101mW/m^2 이고, 전지구 평균 지열류량은 87mW/m^2 이다(Pollack et al., 1993). 이에 따른 열손실은 대륙이 $1.32 \times 10^{13}\text{W}$ 이고 해양이 $3.1 \times 10^{13}\text{W}$ 이다. 그리고 대륙에서의 열손실과 해양에서의 열손실을 합하면 전지구적 열

¹⁾ 한국지질자원연구원 지하수지열연구부
E-mail : song@kigam.re.kr
Tel : (042)868-3175 Fax : (042)863-9404

손실이 산출되는데 이는 $4.42 \times 10^{13} \text{W}$ 이다. 해양에서의 열손실이 전 지구적인 열손실의 약 70%를 차지하고, 대륙에서의 열손실이 약 30%를 차지한다. 해양에서는 확장되는 해령에서의 해양암권(oceanic lithosphere)의 형성에 의한 열손실이 대부분을 차지한다.

지표상에 가장 많은 열을 전달하는 것은 당연히 태양에너지이며, 이는 기온의 최고와 최저값이 태양에 의해 달궂어진 지표온도에 영향을 받는 것으로부터도 잘 알 수 있다. 태양으로부터 지구로 도달되는 복사열은 $1.75 \times 10^{17} \text{W}$ 에 이른다. 그중에 약 35%($6.1 \times 10^{16} \text{W}$)는 단파복사의 형태로 바로 반사되어 방출되고 나머지 65%($1.14 \times 10^{17} \text{W}$)만이 대기권, 수권, 암석권에 의해 흡수된다. 이렇게 흡수된 태양에너지 중 31%($3.53 \times 10^{16} \text{W}$)는 대기권에 의해 흡수되고 69%($7.87 \times 10^{16} \text{W}$)만이 지구표면에 도달한다. 따라서 태양으로부터 복사되는 총 열에너지 중 약 45%만을 지구의 열원으로 생각할 수 있는 것이다. 이렇게 지구표면에 도달한 태양의 복사열중 대부분이 지표의 장파복사에 의해 바로 방출되고 단지 1ppm도 안되는 양($3.2 \times 10^9 \text{W} - 3.2 \times 10^{10} \text{W}$)만이 지구의 지하에 저장된다 (Clauser, 2006).

이와 같이 지하로 흡수되는 태양에너지 값을 앞에서 살펴본 지구의 열손실($4.42 \times 10^{13} \text{W}$)과 비교하면 거의 무시할만한 수준임을 알 수 있는데, 더욱이 지각의 매우 낮은 열확산율($10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$) 때문에 지하 깊숙이 침투하지 못한다. 예를 들면, 지각의 낮은 열확산율 때문에 대기 온도의 계절적 변화와 일변화가 최대 지하 약 20m 정도까지만 영향을 준다는 것을 보면 태양의 복사에너지가 지각의 얇은 부분까지만 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 결론적으로 태양의 복사열은 지구 내부의 열적 상태에 큰 영향을 미치지 못한다는 것을 알 수 있다.

지각을 구성하고 있는 암석내의 방사성동위원소가 붕괴 시 열을 발생하며, 이때 발생한 열은 지구내부의 가장 중요한 열원 중의 하나이다. 지구의 중요한 열원이 되기 위해서는 방사성동위원소의 양이 충분히 많아야 되고, 반감기가 지구의 나이에 비해 너무 짧거나 너무 길지 않아야 된다. 이러한 조건을 만족하는 방사성 동위원소는 ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K 이다. 이들 방사성 동위원소에 의해 발생하는 현재의 열은 $2.75 \times 10^{13} \text{W}$ 이다 (Clauser, 2006). 한편, 지구내부의 열전도에 의한 열손실은 $4.42 \times 10^{13} \text{W}$ 이므로 따라서 방사성 동위원소에 의한 열과 열전도에 의한 열손실의 비는 $2.75 \times 10^{13} \text{W} / 4.42 \times 10^{13} \text{W} = 0.62$ 이다. 다시 말하면 지구내부 열의 2/3 가량이 방사성 동위원소의 붕괴에 의한 열이다. 대륙에서만 보면 상부지각 암석의 방사성동위원소의 붕괴에 의한 열이 40%정도 차지하고 나머지 60%의 열은 하부지각과 맨틀, 그리고 맨틀 아래에서 올라오는 열로 설명될 수 있다 (Pollack and Chapman, 1977).

3. 최근 연구동향

세계 각국의 지열학회들의 연합체인 국제 지열협회(International Geothermal Association; IGA)에서는 전 세계 각 나라의 지열에너지 개발 및 활용 현황, 자원 부존량 평가, 활용기술의 최

신 연구 개발 동향 등에 대한 정보 교류의 장을 마련한다는 차원에서 1995년부터 매 5년 마다 세계지열학술회의(World Geothermal Congress; WGC)를 개최 중에 있는데, 1995년에는 이탈리아의 Firenze에서, 2000년에는 일본의 Beppu 및 Morioka에서 열렸으며, 2005년의 WGC 2005는 터키 지중해 연안의 유명한 휴양지 Antalya에서 4월 24일부터 29일까지 개최하였다. 따라서 WGC 2005에 발표된 논문들은 최신 연구 동향에 대한 귀중한 정보를 제공하고 있다.

WGC2005에서 발표된 논문을 보면, 총 86개 나라에서 705편의 논문 발표 (구두발표: 329편, 포스터: 376편)가 이루어졌다. 이중 전세계 지열발전 현황, 지열 직접이용 현황, 부존량 평가 등에 대한 Keynote 발표가 세 개 session의 13편, 그리고 80개 나라의 지열개발, 활용, 연구 상황에 대한 Country report 등이 있고 각 주제별 세션에서 발표가 이루어졌다. WGC 2005에서 발표된 논문들 중 직접이용의 최신 기술 동향에 대한 것은 단연 지열 열펌프 활용을 위한 지구과학적 접근을 꼽을 수 있다. 또한 한때 경제성에 의문이 있어 주춤했던 고온암체(Hot Dry Rock; HDR) 기술이 좀더 포괄적인 의미의 Enhanced Geothermal System (EGS)라는 기술명으로 차세대 지열에너지 자원 기술로 확실히 자리매김한 것도 중요한 추세라 하겠으며 이러한 기술동향이 앞으로 우리의 연구개발이 나아가야 할 방향을 제시하고 있다. 전세계 지열에너지 부존량 추정, 지열발전 현황 및 직접이용 현황에 대해서는 송윤호와 안은영(2005)에 자세히 소개되어 있다.

특기할 만한 것으로, WGC 2005에서는 천부 지중열을 이용한 지열 열펌프에 대하여는 4개 session (포스터 제외)에 걸쳐 매우 많은 연구 결과 등이 발표되었는데, 주로 지속가능하도록 지열에너지자원을 개발하는 문제가 다루어졌으며, 원위지 지반의 열 물성과 수리상수 측정에 대한 많은 논문이 발표되었고, 대수층 축열 방식(Aquifer Thermal Energy Storage; ATEs)을 포함한 지하 열 저장(Underground Thermal Energy Storage; UTES)에 대한 사례 논문 등을 주로 들 수 있다. 이러한 모든 분야 중에서 가장 중요하게 다루어졌으며, 또한 단독적인 연구결과로 발표된 분야는 지하로부터 열을 추출하거나 주입할 때, 지하의 지하수 및 열 거동을 정확하게 시뮬레이션 하기 위한 모델링 및 모니터링 분야이다. 즉 지하로부터 가능한 한 많은 열에너지를 지속적으로 추출, 활용하기 위해서는 먼저 땅이 가지고 있는 열에너지 자원에 대한 정확한 평가가 선행되어야 하고 자원의 활용 중에 지하에서 발생하는 수리학적, 열적 변화에 대한 시뮬레이션을 통하여 성능을 예측하며, 이의 검증을 위하여 지속적인 모니터링을 수행하는 것이 중요함을 말해 준다.

4. 지열에너지자원의 지속가능성

지속가능성(sustainability) 또는 지속가능한 개발(sustainable development)이라는 개념은 단순히 에너지자원의 문제를 넘어서 21세기 인류 발전의 중요한 패러다임이다. 이러한 지속가능성

은 1987년 세계정상회의에서 정의된 이래로 “다음 세대의 수요를 손상시키지 않는 범위 내에서 현 세대의 수요를 충족시키는 개발”의 개념으로 사회 발전의 모델로 정착되고 있다. 한편 자원의 지속가능성은 “오랜 기간 동안(통상 50년) 현 생산 수준을 지속할 수 있는 생산 또는 개발 시스템”으로 정의될 수 있으며 (Rybach and Mongillo, 2006), 많은 재생에너지원이 지속가능성을 만족한다고 여겨지고 있다.

따라서 기본적으로 지열에너지자원 또한 지속가능성을 만족하나 적정 수준을 넘어선 개발로 지속가능성을 잃어버린 경우도 있다. 예를 들면 지열 저류층의 특성을 고려하지 않고 발전 후 열수를 지하에 재주입하지 않음으로써 생산량이 줄어드는 경우가 있어왔으며, 그 대표적인 예가 미국 California의 The Geysers Field이다. 또한 지하의 열적 특성(열 물성이나 지하수 부존 상황)을 고려하지 않고 좁은 간격의 시추공 배열과 과다한 순환량으로 지중 열교환을 강행한다면 오래지 않아 지하의 온도가 많이 변하게 되어 지열 열펌프의 냉난방 성능이 현저히 떨어질 수도 있다.

그러므로 후발 주자인 우리나라에서의 지열에너지 개발 및 활용은 선진국의 몇몇 시행착오를 거울삼아 지속가능한 형태의 개발을 가장 중요한 과제로 삼아야 할 것이며, 심부 지열수 저류층의 압력을 일정하게 유지할 수 있도록 저류층의 특성을 정확히 평가하고 사용후 지열수를 재주입하는 기술이나, 지열 열펌프 활용에서 지중 온도 및 지하수 거동 변화에 대한 정확한 시뮬레이션을 통한 최적 설계변수 도출 등에 대한 지속적인 연구가 필요하다 하겠다. 이러한 연구를 위해서 필수적인 우리나라 지반의 열물성 특성이나 지하수 부존특성에 대한 정보 축적이 병행되어야 함은 물론이다.

5. 우리나라에서의 전망

우리나라와 같이 화석연료의 97%를 수입에 의존하고 있는 나라에서는 국산 재생에너지 자원의 개발이 국가 안보 및 경제 차원에서 더욱더 중요한 의미를 가짐은 더 이상 강조할 필요가 없을 것이다. 특히 최근의 고유가가 지속되는 시점에서 재생에너지의 활용이 강조되고 있는데, 정부의 제2차 국가에너지 기본계획에서는 2011년까지 산·재생에너지가 국가 1차에너지 공급의 5%를 담당하도록 계획되어 있으나 3대 중점 대상인 풍력, 태양광, 수소에너지에 지원이 집중되고 있음은 안타까운 일이다.

우리나라 지열에너지자원의 공급 가능량은 우리나라와 지열에너지자원 부존 상황이 유사한 스위스의 개발 사례로부터 추산할 수 있는데(송윤호, 안은영, 2005), 스위스의 지열에너지 공급량이 매년 10% 증가한다고 하고, 우리나라가 2015년 수준의 스위스 보급량을 면적대비 동일량 수준으로 따라간다고 하면, 우리나라에서의 지열에너지 공급량은 연간 0.9백만 toe에 이르며 이는 2004년 우리나라 전체 1차에너지 소비량의 0.4%에 달한다. 여기에 2002년도 우리나라의 지하수 사용량 중 생활용수와 공업용수의 연간 사용량인 18억톤(하루5백만톤)으로부터(건설교통부, 2003)

이 중 20%의 열에너지만 냉난방에 이용하더라도 연간 130,000 toe의 에너지를 공급하게 되므로, 연구개발 및 보급에 대한 지원이 지속된다면 2020년까지 지열에너지자원으로 연간 1백만 toe의 에너지공급이 충분히 가능하여 국가 에너지 문제 해결에 일조함으로써 경제·사회적인 파급효과가 막대하다고 예상된다.

한편, 환경적인 면에서 볼 때, 지열에너지자원으로 1백만 toe의 에너지 공급시 0.1백만톤의 이산화탄소 배출이 예상되며(열펌프 동력) 이는 연간 등유대비 0.7백만톤, LNG대비 0.53백만톤의 배출량 감소 효과를 얻게 된다. 기술적인 면에서는 향후 50년 이상을 내다보는 지속가능한 자원의 개발 및 활용이라는 명제하에, 우리나라 지반의 물리적, 수리적 특성에 적합한 최적의 개발 및 활용 기술의 개발이 필요한데, WGC 2005에서의 발표논문 분석에서도 이러한 동향이 뚜렷이 나타나고 있으므로 우리나라 지질특성에 부합하도록 부존자원의 조사/탐사, 개발 및 활용에까지 일원화되고 집중적인 연구개발 지원체계의 확충이 선결과제임은 두말할 필요가 없었다.

우리나라의 경우 1990년대 말부터 지열 열펌프의 보급이 시작되었으며, 2004년부터는 관련법의 개정에 힘입어 보급 증가가 두드러지고 있으나 아직도 지중 열교환기 설치를 위해 많은 수의 시추공을 굴착해야 하는 초기투자비 과다 문제로 대중적인 보급은 쉽지 않은 실정이다. 특히 정확한 설계를 통해 초기투자비를 줄이기 위해서는 토양 및 암반의 열전도도, 원위치 지반의 열물성 시험 등이 필수적으로 선행되어야 하는데 아직 이러한 기술적 시도가 일반화되지 않고 있다. 따라서 지열 열펌프의 대중적인 보급을 위해서는 이러한 기초적인 분야에 대한 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

지열 직접이용의 또 다른 중요한 분야인 심부 지열에너지자원의 활용을 위해서 2003년도부터 한국지질자원연구원이 경상북도 포항지역을 대상으로 심부 지열수 자원의 탐사와 개발을 진행하고 있는데, 늦어도 2007년까지는 그 기술적 실용성 및 경제성에 대한 자료가 제공될 수 있을 것이다. 화산활동이 없는 즉, 지열지대가 아닌 지역에서 심부 지열에너지 개발 분야의 최근 세계적 연구 동향은 지하 5 km 깊이까지의 시추공 굴착으로 200 ℃ 내외의 온도를 갖는 암반에 고압의 물을 주입하여 인공적으로 파쇄대를 만들고 또 다른 심부 시추공을 통해 고온의 지열수를 회수하여 binary 발전을 수행하는 소위 EGS로, 현재 프랑스 알사스 지방의 Soultz-sous-forêts에서 EU, 프랑스 및 독일의 주도로 진행되고 있는 Soultz 프로젝트가 그 대표적인 사례이다(Laplaige et al., 2005; Dezayes et al., 2005; <http://www.soultz.net/>). 경상북도 포항 등지에서는 지온증가율이 40 ℃/km 까지 이르므로 탐사기술, 수리지질 기술, 암반공학 기술 및 시추기술에 대한 꾸준한 연구개발 투자가 이루어진다면 우리나라에서도 이러한 차세대 저온 지열발전 을 기대할 수도 있을 것이다.

사 사

이 논문은 에너지관리공단의 에너지자원기술 개발사업의 지원에 의해 작성되었다.

References

- [1] 송윤호, 안은영, 2005, 세계 지열에너지자원 활용 현황 분석과 향후 전망, 한국지구시스템 공학회지, 제42권, 4호, pp. 287-296.
- [2] 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, pp. 480-595.
- [3] Dezayes, C., Genter, A., and Hoojikaas, G.R., 2005, Deep-seated geology and fracture system of the EGS Soultz reservoir (France) based on recent 5 km depth boreholes, Proc. World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.
- [4] Laplaige, P., Lemale, J., and Decottegnie, 2005, Geothermal resources in France - Current situation and prospects, Proc. World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.
- [5] Pollack, H. N., and Chapman, D. S., 1977, Mantle heat flow, Earth Planet. Sci. Let., Vol. 34, pp. 174-184.
- [6] Pollack, H. N., Hurter, S. J., and Johnson, J. R., 1993, Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set, Reviews of Geophysics, Vol. 31, No. 3, pp. 267-280.
- [7] Rybach, L., and Mongillo, M., 2006, Geothermal sustainability - A review with identified research needs, Geothermal Resources Transactions, Vol. 30, pp. 1083-1090.