

우리나라 지열자원 부존특성과 지열발전 잠재량

송 윤 호

한국지질자원연구원 지열자원연구팀 책임연구원

1. 서론

지열에너지자원은 기저부하를 담당할 수 있는 유일한 재생에너지원이라는 점에서 매력적인 에너지원이지만, 경제적으로 굴착이 가능한 깊이에서 충분한 온도와 유량이 확보되어야 한다는 점에서 여타 지하자원과 같이 지역적 편재성이라는 단점을 가지고 있어왔다. 그러나 최근의 시추기술 및 열역학 기술의 발달에 힘입어 비화산지대에서도 충분히 지열발전이 가능함이 프랑스 및 독일에서 입증되었고, 상업적인 발전소가 가동됨에 따라 우리나라에서도 관심이 높아져 2010년말에는 지열발전 pilot plant 건설을 위한 연구 과제가 착수되기에 이르렀다. 그러나 아직도 일반인은 물론이고 전문가들 사이에서도 우리나라에서 지열발전의 상업적 성공 가능성에 대해 의문을 품고 있는 경우를 종종 접하게 된다.

이 글의 목적은 우리나라에서의 지열발전 가능성에 대한 이해를 돕기 위함이다. 따라서 먼저 우리나라의 지열자원 부존 특성을 간단히 정리하고, 우리나라에서의 지열발전 잠재량에 대한 연구 결과를 살펴본다. 아직까지 우리나라에서는 지열발전과 관련한 법, 제도가 마련되어 있지 않고 또한 신재생에너지 공급의무화(Renewable Portfolio Standard; RPS) 제도에 지열발전이 포함되어 있지 않으나, 제도적 뒷받침이 이루어질 경우 우리

나라에서의 보급 전망도 소개한다. 이 글은 저자가 학술지에 게재한 논문이나 각종 잡지에 기고한 글들을 짧게 정리한 것이므로, 보다 자세한 내용은 인용문헌을 통해서 확인될 것으로 기대한다.

2. 우리나라의 지열자원 부존 특성

우리나라의 지열자원 부존 특성은 비 화산성, 저온 지열자원의 부존으로 정리된다. 이러한 이유로 최근까지 일부 전문가들 사이에서조차 우리나라에서의 지열발전은 불가능하다고 이야기되어왔다. 하지만 시추기술의 발달로 인해 화강암 지역에서 지하 5 km까지의 굴진이 가능해지고 binary cycle을 통한 중저온 지열발전이 전세계적으로 1 GW 이상 보급된(Bertani, 2010) 현재에는 지열발전도 언제 어디서나 가능한 ubiquitous 에너지 자원 활용 기술로 받아들여질 수 있게 되었다.

지금까지 발표된 자료로부터 지하로 내려갈 때 온도가 증가하는 정도를 나타내는 지온증가율(geothermal gradient)의 우리나라 평균값은 25.1 °C/km이고, 지표면에서 발산되는 지열의 크기를 나타내는 지열류량(terrestrial heat flow)의 평균은 60±11 mW/m²이다 (Kim and Lee, 2007). 지열류량의 경우 전세계 대륙의 평균값인 65±11 mW/m² (Pollack et al., 1993)에 비해 낮아 우리나라가 고온 지열자원 부존 측면에서

부족한 편이라는 것을 입증하고 있다. 또한 지표에서 발산되는 열의 약 2/3를 공급하고 있는 화강암내 방사성 원소에 의한 열생산률(heat production rate) 또한 평균값이 $2.041 \times 10^{-6} \text{ W/m}^3$ 로(Lee et al., 2010) 역시 화강암의 대표적 열생산률로 사용될 수 있는 세계 일부 시료의 평균값인 $2.65 \times 10^{-6} \text{ W/m}^3$ 에(Beardsmore and Cull, 2001) 비해 낮다.

그러나 이러한 비교는 전국에서 얻어진 자료의 평균값을 대상으로 한 것이고 지역에 따라서는 큰 차이를 보여주는데, 예를 들어 경상북도 포항 지역에서는 지온증가를 평균 $33^\circ\text{C}/\text{km}$, 지열류량 평균 78 mW/m^2 을 나타내고 있으며 한국지질자원연구원이 굴착한 2.383 km 깊이의 BH-4공에서는 2 km 깊이까지의 평균 지온증가율이 $38^\circ\text{C}/\text{km}$ 에 이르고 있다. 이러한 이상치는 포항지역 지표에 두껍게 분포하는, 열전도도가 낮은 신생대 3기 퇴적층에 의한 열보존 효과에 더해 심부로부터 더 많은 열원이 공급되기 때문인데 열원이 되는 메카니즘에 대한 연구는 현재 진행 중이다. 따라서 지역에 따라서는 경제적으로 개발가능한 심부 지열자원이 부존할 가능성이 높기 때문에, 단순히 비 화산지역이고 평균적으로 지열류량이 낮다고 하여 우리나라에서 지열발전이 불가능하다

고 결론지어서는 안 될 것이다.

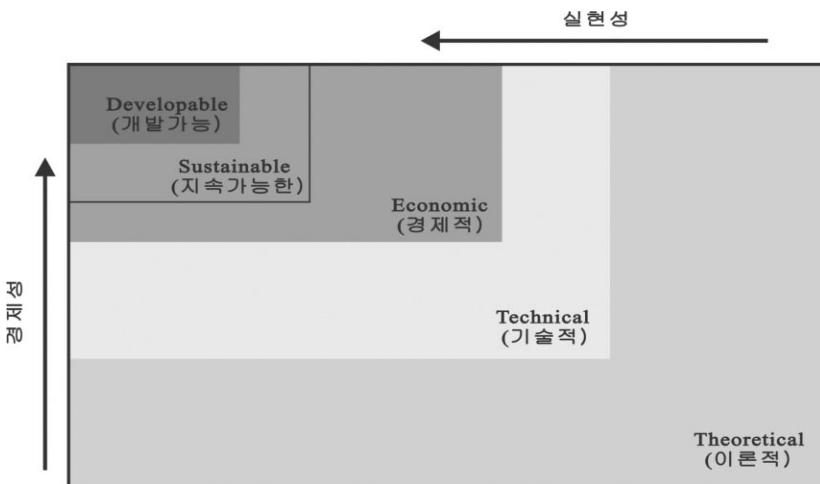
3. 지열발전 잠재량

2000년대 들어 한국지질자원연구원을 시작으로 체계적인 심부 지열개발이 추진되면서 우리나라의 지열자원 부존량 산출의 필요성이 제기되기 시작되었다. 송윤호(2008)는 전세계적으로 사용되는 지열자원 부존량의 개념을 정리하고 비교하였으며, Lee et al. (2010)은 최근까지 한국지질자원연구원에서 수집, 분석되었던 우리나라 암반의 물성 및 열물성 자료와 온도 검층 자료를 이용해 깊이 5 km까지의 열에너지 부존량을 산출하였다. 신재생에너지백서2008(에너지관리공단, 2008)에서 서술하는 우리나라 지열자원의 부존량 분석도 Lee et al. (2010)과 동일한 자료에서 출발한 것이다.

그러나 이는 지하 5 km 심도까지 부존하는 열에너지의 총량 개념이며, 실제 개발 및 활용 기술을(직접이용 또는 지열발전) 고려한 것이 아님에 유의하여야 한다. 즉, 지하 1 km 하부에 40°C 의 온도가 있다고 해도 이는 발전에 활용할 수 없을 뿐만 아니라 충분한 지하수가 부존하지 않는다면 가장 간단한 활용 방안인 온천에도 이용할 수 없다.

즉, 단순히 열이 있다는 것이 인간에게 유용해야 한다는 전제를 포함하는 '자원'의 개념에 포함될 수 없다. 따라서, 지하에 부존하는 지열자원은 어디까지나 활용가능한 자원량의 개념에서 그 부존량을 평가하는 것이 타당한 방법일 것이다.

지열을 지하에 부존하는 에너지자원의 하나로 고려할 때에는 부존량(resources) 또는 매장량



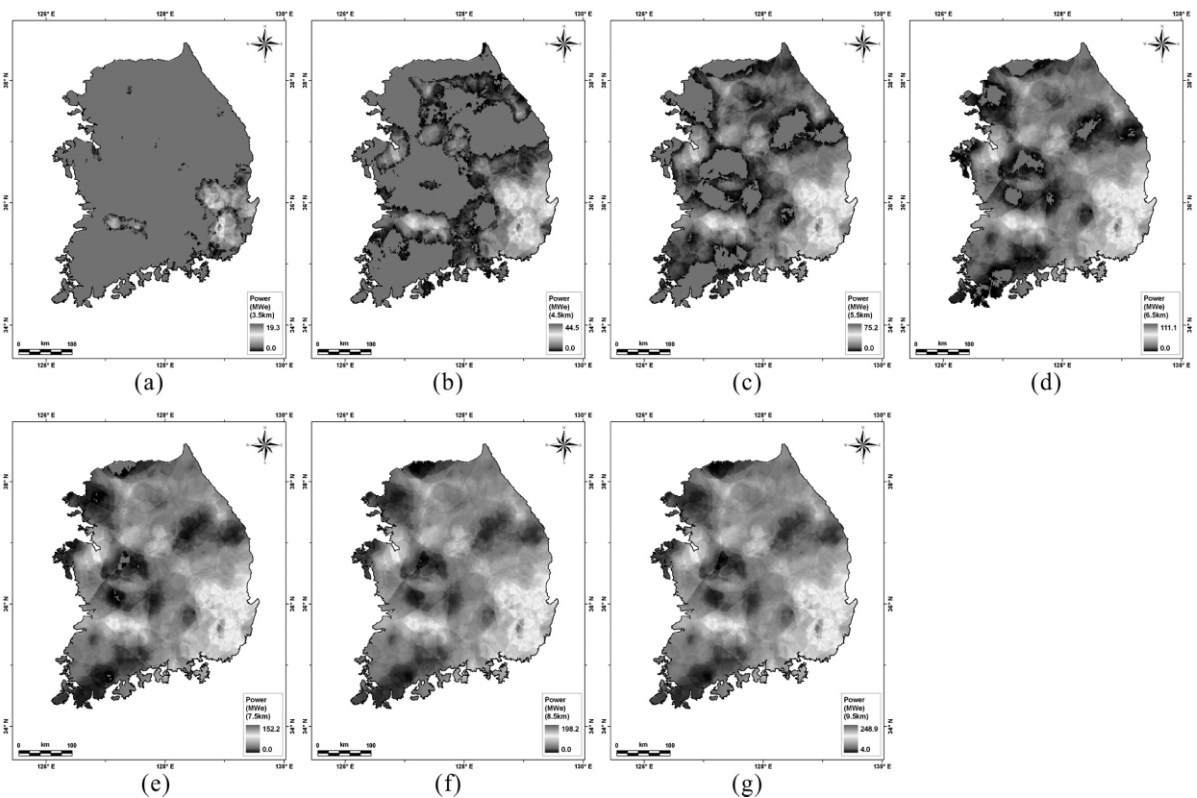
[그림 1] 지열자원의 잠재량 분류 (after Rybach, 2010).

(reserves)의 개념이 적용될 수 있으나, 전기를 생산하거나 열에너지를 공급하는 에너지원으로 생각할 때에는 종종 잠재량(potential)이라는 개념으로 다루어진다. 이 두 가지 접근방법은 종종 구별 없이 사용되고 있는데, 지금까지 이루어진 전 세계적 규모의 지열에너지 부존 추정량은 대부분 이론적 잠재량(theoretical potential)으로서 현재 또는 어느 특정한 미래에 실현 가능한 기술로 개발할 수 있는 기술적 잠재량(technical potential), 그리고 더 나아가 경제성을 고려한 공급가능한 잠재량에 대해서는 아직까지 뚜렷한 기준이나 연구결과가 나와 있지 않다.

지열의 잠재량에 대해서 Rybach (2010)는 좀 더 정리된 개념을 발표하였는데, 이는 그림 1에 나타난 바와 같이 이론적, 기술적, 경제적, 지속가

능한, 그리고 개발가능(developable) 잠재량으로 구분된다. 현실적으로는 기술적 잠재량이 추정 매장량의 근거가 될 것이며, 여기에 석유가 등의 외적인 요인과 발전차액지원제도와 같은 제도적인 지원에 따라 달라지게 되는 경제성을 만족할 경우에는 경제적 잠재량이 된다. 새롭게 도입된 개념인 지속가능한(sustainable) 잠재량은 50년 정도 동일한 생산량이 유지될 수 있는 수준으로 적절히 생산을 조절해야 하는 부분이다. 마지막으로 개발가능 잠재량은 지정학적 및 사회적인 입지 조건을 고려하고 정책적인 면까지 포함되어 실제 현재 상황에서 개발할 수 있는 에너지 양을 말한다.

송윤호 등(2011)은 2010년에 발표되었고 2011년에 지열관련 양대 국제기구인 국제지열협



[그림 2] 심도별 우리나라 EGS 지열발전의 이론적 잠재량 (송윤호 등, 2011). 총 6,975 GW로 나타난다. 회색으로 표시된 지역은 지표온도+80 °C보다 낮아 발전에 사용될 온도를 갖추지 못한 지역이다.

회(International Geothermal Association; IGA) 및 국제에너지기구(IEA) 지열실행합의(Geothermal Implementing Agreement; GIA)에 의해 공인된 방법을 따라 우리나라에서 인공지열저류층 생성 기술(Enhanced 또는 Engineered Geothermal System; EGS)에 의해 발전이 가능한 이론적 및 기술적 잠재량을 산출하였다. 이 Protocol은 Beardsmore et al. (2010)이 제안한 이래 국제기구 공인과정에서 약간의 수정이 가해졌으며, 앞으로도 새로운 이론 또는 평가 결과에 따라 달라질 여지가 있지만 근본적인 기술 항목의 변화는 없을 것으로 생각된다. 이론적 및 기술적 잠재량 산출은 아래의 순서를 따르며 자세한 사항은 송윤호 등(2011)에 기술되어 있다.

- 1) 지하 10 km 깊이까지의 온도, 지열류량 및 열 부존량 계산
- 2) 지하 10 km 깊이까지 EGS 발전의 이론적 잠재량 평가: 30년간 가동 전체
- 3) 지리적, 생태적, 법 및 제도적 조건을 고려해 현재 기술로서 개발 가능한 기술적 잠재량 평가: 여기서는 6.5 km 깊이, 암반으로부터의 열 회수율 0.14, 지열수의 온도 강하가 10 °C 일 때 까지만 발전

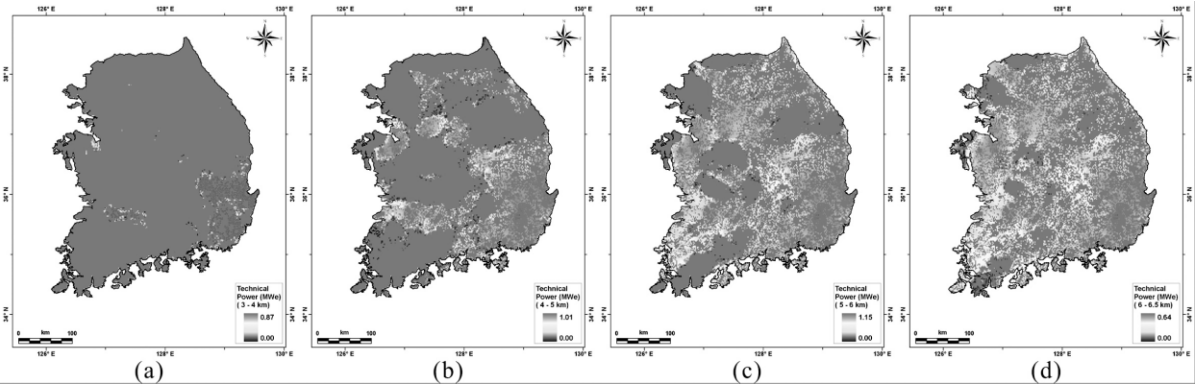
이러한 기준에 따라 산출된 단위 km 깊이 범위별 이론적 및 기술적 잠재량 분포도가 각각 **그림 2** 및 **그림 3**에 보여진다. 이론적 잠재량 분포도에서 회색으로 표시된 부분은 그 심도 범위에서의 온도가 지표온도+80°C 보다 낮아 발전에 활용할 만한 열에너지가 부존하지 않는 지역이다. 여기서 ‘지표온도+80°C’를 하한선으로 설정한 이유는 현재 가동 중인 binary 발전기술의 입출구 온도차를 고려한 최소 발전가능 온도이다. 한편, 기술적 잠재량 분포도에서 회색으로 표시된 부분은 온도가 낮은 부분에 더해, 도시지역이나 공원, 습지 등의 보호구역 및 지형이 급하게 변화하는 등 개발이 불가능하다고 판단되는 지역을 나타낸다. 이러한 개발 불가능 지역을 제외하면 전체 면적의 약

40.7%가 개발 가능지역으로 남는다.

그림 2 및 **그림 3**에 나타난 이론적 잠재량 및 기술적 잠재량의 총량은 각각 6,975 GW와 19.6 GW로 나타난다. 이론적 잠재량은 우리나라의 2010년 총 발전용량의 약 92배에 달하는 막대한 양으로 그야말로 이론적인 잠재량일 뿐이다. 보다 현실적으로는 기술적 잠재량을 고려해야만 하는데, 원래의 저류층 온도보다 10°C 낮아지게 되면 수명을 다한다고 가정할 경우 19.6 GW에 달한다. 그러나 최초로 비해 지열수의 온도가 10°C 이상 낮아진다고 해도 발전 설비의 일부만 교체하고 계속적으로 발전이 가능하므로(물론 용량은 줄어들지만) 이를 기술적 잠재량이 아니라 경제적 잠재량 산정에 포함시킨다면 기술적 잠재량은 56 GW로 늘어나게 된다.

그림 1에 나타난 바와 같이 좀 더 실질적인 개념 즉, 경제적 잠재량 및 개발가능 잠재량의 경우 현재 또는 미래 특정시기의 전 세계 또는 국가별 에너지 공급 및 경제상황, 법 및 지원제도 등에 따라 그 정의 자체가 많이 달라지게 된다. 예를 들어 경제적 잠재량에는 ① EGS 지열발전소 건설비용의 75% 가량을 차지하는 시추공 굴착 비용을 줄이기 위해 심도를 6 km 까지로 제한하고, ② 온도의 하한선도 120°C까지로 높이는 것들이 고려될 수 있다. 한편, 개발가능 잠재량에는 정부 차원의 보급 지원 계획과 제도적 장치(RPS상의 REC 가중치, 보조금 및 risk guarantee 제도 등) 및 지방자치단체의 유치 인센티브 등이 복합적으로 고려되어야 할 것이다.

우리나라의 지열발전 전문가들은 이러한 모든 사항을 고려하여 2030년까지의 보급계획 roadmap을 제안한 바 있으며, 이것이 온실가스 감축기술로드맵에 반영되었다(한국에너지기술평가원, 2011). 이 로드맵에서는 2030년까지 20 MW급의 EGS지열발전소가 전국적으로 10개 곳 건설되는 것을 목표로 삼고 있는데, 가동율을 85%만 가정하더라도 연간 발전량은 약 1,500 GWh, 이산화탄소 배출 감소량은 석탄화력발전



[그림 3] 3-6.5 km 깊이 범위의 지열발전 기술적 잠재량 (송윤호 등, 2011). 총 19.6 GW에 달하며, 회색으로 표시된 지역은 도시지역, 습지, 지형 등의 이유로 개발이 불가능한 지역이다.

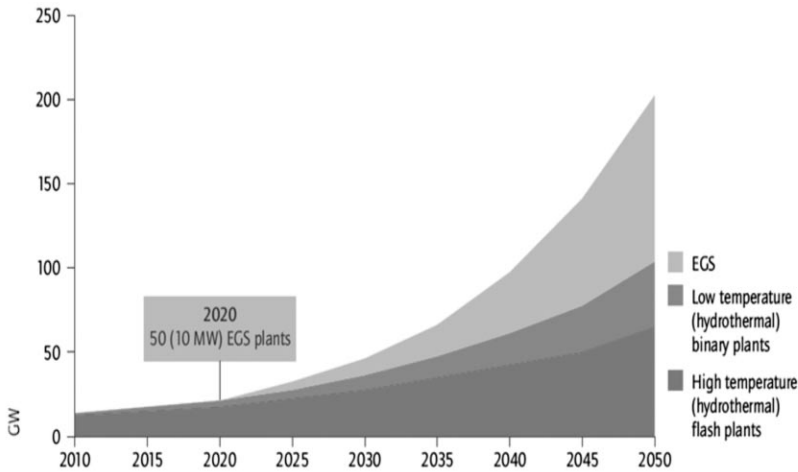
대비 연간 140만톤에 이른다. 2030년까지 전국적으로 200 MW의 지열발전소 보급 목표는 언뜻 보기에 다른 재생에너지원에 비해 매우 미미한 수준으로 생각될 수도 있다. 그러나 기저부하를 담당할 수 있는 유일한 재생에너지원으로서 가동율 90% 이상을 보이고 또한 열 수요처에 인접해서 건설할 수 있으므로 발전 후 남은 열을 난방이나 온실용으로 공급하는 열병합 발전이 가능하다는 점에서 경쟁력은 충분하다. 더욱이 전 세계적으로 EGS 지열발전의 보급이 급성장할 것으로 전망되므로 국내에서 축적된 기술력과 경험을 가지고 해외 시장으로 진출할 가능성도 높아진다.

4. 결론

국제에너지기구가 2011년에 발간한 지열 로드맵에는 2050년까지 전 세계적으로 발전 용량 200 GW의 지열발전이 보급될 수 있으며 그 중 절반이 EGS로 가능하다고 전망하고 있다(그림 4; IEA, 2011). 발전량으로는 연간 1,400 TWh에 이를 것인데, 이는 전 세계 총 발전량 전망치의 3.5%를 차지하며 이를 통해 연간 8억톤의 CO₂ 배출 절감이 가능하다고 보고 있다. EGS 지열발전은 2020년도에 500 MW (10 MW급 50개)에서 출발해서 2030년 이후로 증가세가 두드러질

것으로 예측하고 있으며, 이는 시추기술 등의 발달에 힘입어 2030년에는 EGS가 자체 경제성을 확보할 것으로 보기 때문이다. IEA 지열 로드맵에서는 이러한 전망이 현실화되기 위해서 2020년까지 10 MW급의 EGS 지열발전소가 적어도 전 세계적으로 50개는 설치되어야 한다고 강조하고 있다(그림 4). 즉, 단순히 장밋빛 전망으로가 아니라, 기술 로드맵의 입장에서 중요한 milestone으로 이를 규정하고 있는 것이다.

우리나라에서도 2010년 말에 비화산지대에서 EGS 지열발전소 pilot plant 건설을 위한 과제가 착수되어 현재 경상북도 포항시 북구 흥해읍 일원에서 심부 시추공이 굴착 중에 있다. 내륙에서 석유개발이 이루어진 적이 없기 때문에 시추 장비 도입에서부터 시추 착수까지 상당히 많은 비용과 시간이 소요되었지만, 일단 착수되었기에 이의 경제성을 입증할 수 있는 결과가 나올 것으로 기대된다. 앞에서 서술한 바와 같이 우리나라에서도 충분한 기술적 잠재량이 있으므로 적극적인 개발 노력 여부에 따라 전문가들이 목표한 바와 같이 2030년까지 전국적으로 200 MW의 지열발전소 보급은 충분히 가능할 것이다. 단, 어떠한 새로운 에너지원도 개발 초기에는 자체적으로 경쟁력을 확보할 수 없으니 만큼 정부차원에서 법적, 제도적 지원제도 확충에 시급히 나서야 할



[그림 4] 국제에너지기구 지열 로드맵상의 전 세계 지열발전 보급 전망 (IEA, 2011)

것이다. 우리나라와 같이 화산이 없는 독일에서 이미 5개의 지열발전소가 가동 중이고 수십 개의 프로젝트가 활발히 진행될 수 있는 동기가 무엇인지 다 함께 생각해봐야 할 것이다.

참고문헌

1. 송윤호, 2008, 지열에너지자원 부존량 및 경쟁력에 대한 고찰, 한국지구시스템공학회지, 45, 293-304.
2. 송윤호, 백승균, 김형찬, 이태중, 2011, 우리나라 EGS 지열발전의 이론적 및 기술적 잠재량 평가, 자원환경지질, 44, 513-523.
3. 에너지관리공단, 2008, 신재생에너지백서 2008, 지식경제부, 470p.
4. 한국에너지기술평가원, 2011, 온실가스감축 기술 전략로드맵 2011 - 지열, 86p.
5. Beardsmore, G. R., and Cull, J. P., 2001, Crustal heat flow - A guide to measurement and modeling, Cambridge University Press, 324p.
6. Beardsmore, G. R., Rybach, L., Blackwell,

D., and Baron, C., 2010, A protocol for estimating and mapping the global EGS potential, GRC Transactions, 34, 301-312.

7. Bertani, R., 2010, Geothermal power generation in the world: 2005-2010 update report, Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-30 April 2010.

8. International Energy Agency, 2011, Technology roadmap - Geothermal heat and power, http://www.iea.org/papers/2011/geothermal_roadmap.pdf.
9. Kim, H. C., and Lee, Y., 2007, Heat flow in the Republic of Korea, J. Geophys. Res., 111, B05413, doi:10.1029/2006JB004266.
10. Lee, Y., Park, S., Kim, J., Kim, H. C., and Koo, M.-H., 2010, Geothermal resource assessment in Korea, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14, 2392-2400.
11. Pollack, H. N., Hurter, S. J., and Johnson, J. R., 1993, Heat flow from the Earth's interior: Analysis of global data set, Reviews of Geophysics, 31, 267-280.
12. Rybach, L., 2010, "The future of geothermal energy" and its challenges, Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.