

## 전세계 지열부존량 평가에 대한 개관

송 윤호, 이 영민, 이 태종<sup>1)</sup>

### A Review on World Geothermal Assessment

Yoonho Song, Youngmin Lee, Tae Jong Lee

**Key words** : Geothermal (지열), Reserves (가채매장량), Resources (부존매장량), Assessment (평가)

**Abstract** : Assessment of geothermal resources like other earth resources is a starting point for decision makers or stakeholders to set up basic plan on its development and R&D policies. In this context, there have been various works on world geothermal assessment, to report different estimates from each other. In this paper, we first introduce the definition of geothermal potential mainly adopted from the article by Muffler and Cataldi (1978) and then summarize the estimates made so far referring the work by Bertani (2003). An updated estimates by Stefansson (2005) are also reviewed in terms of identified resources separately for high-temperature resources for power generation and low-temperature ones for direct-use. Recent estimate of US geothermal resources by MIT (2006) using a volumetric method with extensively accumulated data base is discussed. Finally, we introduce the first geothermal assessment in Korea recently made and discuss its importance.

#### 1. 서론

지열에너지자원은 여타 신재생에너지원과 달리 기초 부하(base load)를 담당하므로 안정적이며 또한 환경부담도 상대적으로 적어 경쟁력이 있음에도(Clauser, 2006), 우리나라에서의 개발 및 활용은 아직까지도 지열 열펌프를 이용한 난방 시스템의 보급 확대 수준에 머무르고 있다. 최근 들어 심부 지열수자원을 개발하여 지역난방에 공급하고자 하는 시도가 이루어지고 있고, 한편으로는 저온 지열발전을 도입하고자 하는 노력도 일부 있으나, 개발가능 에너지량을 판단하는 기초 자료인 우리나라 지열 부존량에 대한 정량적 평가는 그간 이루어지지 못하였다.

원유가가 극도로 높아져 세계 경제에 큰 부담이 되는 현시점에서 우리나라에서 추출가능한 지열의 부존량이 얼마나 될까라는 의문은 당연한 것이며, 다행히도 최근에 이에 대한 최초의 평가가 이루어졌다 (박성호 등, 2008). 이 논문에서는 부존량 평가에 대한 이해를 돕기 위한 목적으로, 지열에너지자원의 부존량에 대한 정의를 살펴보고 지금까지 전세계 지열부존량에 대해 발표된 결과를 정리하여 소개한다. 또한 비교적 최근에 시도된 진일보된 부존량 평가 방법과 그 결과에 대해 살펴봄으로써, 우리나라에서의 부존량 평가가 지니는 의미에 대해 말하고자 한다.

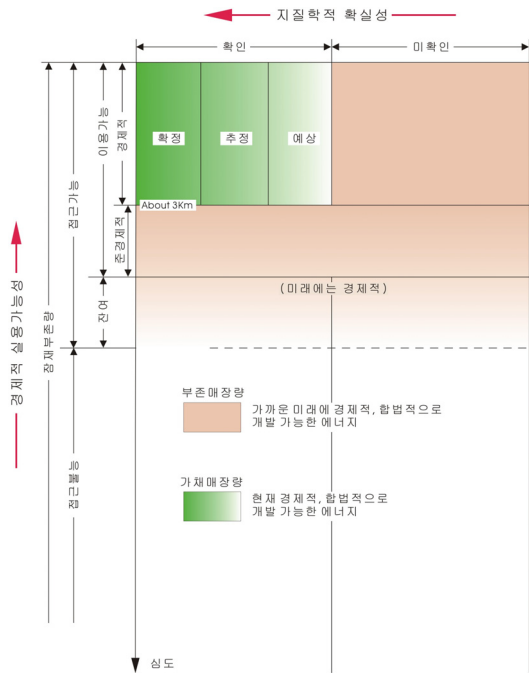
#### 2. 지열 부존량의 정의

지열 부존량의 정의에 대해서 표준화된 용어가 정립되어 있지 않은데, 대부분 부존량의 개념이 광물자원이나 석유/가스자원과 같이 특정 지역에 부존하며 이동성이 없는 지하자원에 적용되고 있기 때문이다. 반면 지열은 지하유체(증기, 지열수)의 대류나 마그마의 유동과 상관되어 이동성이 매우 높은 특성을 가지기 때문에 광물자원에 적용하는 개념을 그대로 적용하는 것은 무리가 있다. 그럼에도 불구하고 다른 방법이 없기 때문에 대부분의 경우 지하자원의 부존량 정의를 약간씩 변형시켜 적용하고 있는 실정이다.

가장 많이 사용되는 지열 부존량의 정의는 Muffler and Cataldi (1978)의 분류를 따르는데 (<그림 1> 참조), 이 또한 기본적으로는 광물자원에 대한 개념에서 가져온 것이다. 이에 따르면 일반적으로 지열의 잠재력(potential)과 관련하여 논의되는 지열자원 부존량은 접근가능한 잠재부존량(accessible resource base)을 말하며 이는 100년 미만의 어느 특정한 미래에 경제적 및 기술적으로 개발이 가능하게 될 자원으로서 특정 심도 구간 내 지하 압반이 가지고 있는 온도(혹은 열량)와 전체부피를 곱하는 방식(volumetric method)으로

<sup>1)</sup> 한국지질자원연구원 지하수지열연구부  
E-mail : song@kigam.re.kr  
Tel : (042)868-3175 Fax : (042)868-9414

평가된다.



<그림 1> 지질학적 및 경제적 확실성에 따른 지열 자원량의 분류 (modified from Muffler and Cataldi, 1978)

이러한 접근가능한 잠재부존량은 접근가능한 유효 잠재부존량(useful accessible resource base) 즉, 부존매장량(resources)을 포함하며 부존매장량은 또한 경제성있는 확정매장량(identified economic resource) 즉, 가채매장량(reserves)을 포함한다. 다시 말하면 <그림 1>에 나타난 바와 같이 지질학적 확실성에 따라서 예상매장량→추정매장량→확정매장량으로 분류할 수 있으며, 경제성에 따라서는 부존매장량→가채매장량으로 분류하게 된다.

### 3. 대표적인 지열 부존량 평가 결과

지열에너지자원의 부존량은 평가자 또는 평가 시점에 따라 상당한 차이를 보이고 있으나, 어떠한 경우에도 지구내부로부터 열을 추출하는 관점에서 이루어지고 있다.

접근가능한 잠재부존량의 평가결과로 먼저 미국 Electric Power Research Institute (EPRI, 1978)의 보고서를 들 수 있는데, 이에 따르면 대륙 지각의 3 km 깊이 이내에 저장되어 있는 지열의 총량은  $12 \times 10^{12}$  GWh<sub>t</sub> 또는  $43 \times 10^6$  EJ (Exa= $10^{18}$ )에 이른다. 이 양은 2001년도 전세계 에너지소비량 420 EJ을 생각한다면 인류가 약 100,000년 동안 사용할 거대한 양이다.

한편, 지열에너지자원 부존량 평가에 대한 서로 다른 많은 결과가 발표됨에 따라 국제지열협회(International Geothermal Association; IGA)에서는 대표적인 부존량 평가 결과를 정리하여 비교한 바 있다 (Bertani, 2003). 여기서 인용하여 분

석한 자료는 5개인데, 접근 방식의 상이함에 따라 그 값의 차이가 너무 커서 비교의 의미가 없을 정도이다. 따라서 Bertani (2003)는 이러한 5개의 자료를 토대로 2003년 현재의 생산량과 그 추이에 기초한 2020년의 예상치 및 잠재부존량의 최소, 최대값을 정리하였으며 이는 <표 1>에 보여진다.

<표 1> 전세계 지열 부존량 평가의 범위 (Bertani, 2003)

지열 발전				
	2003년 현재	2020년까지 예상	추정 잠재부존량	
			최소	최대
TWh/y	50	300	1,000	40,000
GW <sub>e</sub>	8	40	140	6,000
직접 이용				
	2003년 현재	2020년까지 예상	추정 잠재부존량	
			최소	최대
TWh/y	50	140 / 700	100,000	170,000,000
GW <sub>t</sub>	15	40 / 200	30,000	50,000,000

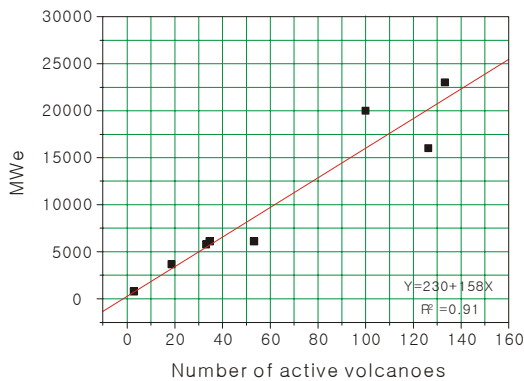
이상과 같은 잠재부존량의 평가는 실제 개발 가능한 양에 비해 상당히 과대평가되는 경우가 많은데, 그 이유는 실제 얻어지는 에너지의 양은 지열을 운반하는 매체인 지열유체의 부존상태, 저류층 압력 및 실제 생산온도 등에 좌우되기 때문이다. 반면, 특정 지열지대에서 실제 굴착된 시추공으로부터 측정되는 저류층의 정보로부터 시뮬레이션을 통해 부존량을 평가하는 경우 즉, 확장매장량의 개념으로 평가할 때에는 완벽한 평가를 위한 충분한 개수의 시추공이 존재하지 않은 경우가 대부분이므로 실제 매장량에 비해 과소평가되는 경향이 있다 (Stefansson, 2005). 특히 이 방법은 넓은 지역(예를 들면, 지구전체의 잠재부존량)에서의 지열 잠재력 평가로 확대 적용할 수 없는 단점이 있다.

### 4. 확인된 자원에 기초한 정량 평가

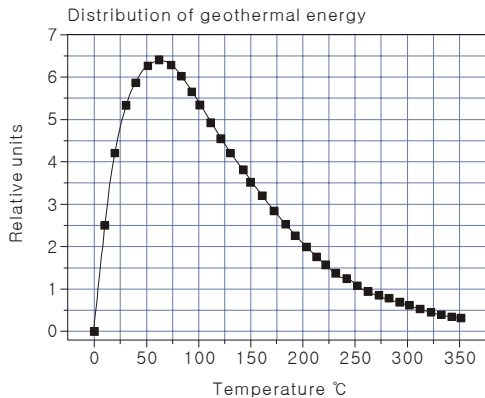
한편, Stefansson (2005)은 검증 가능하다는 측면에서 한 단계 진보한 방식으로 평가를 시도하였다. 먼저 지열발전이 활발한 8개 나라에서의 활화산 개수와 확인된 매장량의 상관관계를 구하여보니 상관계수( $R^2$ )가 0.91로 매우 높은 결과를 보여주었다 (<그림 2>). 이에 기초하여 전세계적으로 접근가능한 활화산의 수가 1,322 임을 감안해 지열 발전이 가능한 매장량을 약  $209 \pm 27$  GW<sub>e</sub>로 추산하였다. 물론 이는 온도 130 °C 이상으로 지열발전이 가능한 자원에 대한 부존량 평가이다.

지열발전과 달리 직접이용이 가능한 130 °C 이하의 지열수(온천수 포함)는 고온 지열수(증기)에 비해서는 비교적 전세계에 고르게 분포하고 있다. 미국과 Iceland의 지열수 분포 빈도는 온도가 증가할수록 지수함수적으로 감소하는 특성을 보이는데, 단위질량당의 에너지는 온도에 따라 증가하므로 특정 온도범위에서의 에너지량은 분포수에 그 온도에서의 에너지를 곱함으로써 얻을 수 있게 되며, 이에 기초한 온도별 에너지량의 분포도가 <그

림 3>에 보여진다 (Stefansson, 2005).



<그림 2> 지열발전이 활발한 8개 나라에서 활화산의 개수와 지열 부존량의 상관관계 (Stefansson, 2005).



<그림 3> 지열자원의 온도에 따른 에너지의 양 (Stefansson, 2005).

<그림 3>에서 보면 130 °C 이하의 지열자원 부존량이 전체의 68%를 차지함을 알 수 있다. 따라서 32%를 차지하는 고온 지열 부존량이 209 GW<sub>e</sub>임을 생각하고 열에너지의 약 10%가 전기에너지로 변환된다고 가정할 때, 직접이용가능 지열부존량은 4,400 GW<sub>t</sub>로 계산된다. 여기서 첨자 e는 발전 에너지, t는 열에너지를 가리킨다. Stefansson (2005)은 시뮬레이션에 의한 확정매장량은 volumetric 방법에 비해 4-5배 적으며, 잠재부존량은 추정매장량에 비해 5-10배 많은 경우들에 기초하여 <표 2>와 같이 부존매장량과 최소 및 최대 추정 매장량을 나타내었다.

이 표에서 보면 부존매장량은 6 TW<sub>t</sub> (=189 EJ/year)에 이르며 이는 전세계 연간 에너지 사용량(2001년도에 420 EJ)의 1/2에 가까운 양을 공급할 수 있음을 말한다. 물론 <표 1>에 나타난 바와 같이 평가 방법에 따라 1/4에서 10 배까지 그 부존량의 평가가 달라질 수 있지만 어떠한 경우에도 매우 방대한 양의 에너지자원이 우리의 발밑에서 개발을 기다림은 확실하다.

<표 2> 전세계 지열에너지자원 부존량 평가 (Stefansson, 2005).

	최소 추정매장량	부존매장량	최대 추정매장량
발전에 이용할 수 있는 자원량	0.05 TWe	0.2 TWe	1 - 2 TWe
직접이용 가능 자원량	1 TWt	4.4 TWt	22 - 44 TWt
전체 부존량	1.5 TWt	6 TWt	30 - 60 TWt

## 5. 최근의 부존량 평가 시도

최근의 미국 및 유럽에서의 지열개발은 지하 4-5 km 깊이의 화강암까지 굴착한 후, 고압의 물을 주입해 인공적으로 저류층을 생성하여 인접한 시추공을 통해 올라온 증기를 이용해 저온발전을 수행하는 EGS (Enhanced 또는 Engineered Geothermal System) 기술의 개발에 집중되고 있다. 이러한 EGS 기술은 프랑스 Alsace 지방의 Soultz 프로젝트가 대표적이며, 호주 및 독일에서도 활발히 진행되고 있음은 잘 알려져 있다.

이러한 EGS 시스템의 미국내 적용을 통한 에너지문제 해결방안을 모색하는 노력으로 미국에서는 Massachusetts Institute of Technology (MIT, 2006)의 주관으로 EGS기술의 적용성 및 경제성에 대한 종합보고서를 발간한 바 있는데, 이 보고서에서 미국내 지열자원 부존량에 대한 새로운 평가결과를 발표하였다. 물론 이 방법도 근본적으로 volumetric method이지만 1970년 이후로 축적된 모든 지열류량자료, 암반의 열물성자료 및 열생산물자료를 망라하여 좀더 정량적인 평가결과를 내었다는 데 의미가 있다.

<그림 4>는 MIT(2006)에서 사용한 부존량 산출 흐름도를 나타낸 것으로 지각내 열생산물 자료를 포함하여 지온증가율 측정자료가 없는 깊은 심도에서의 온도분포도 가능한 한 정확하게 반영하고 있다. 이러한 방식에 따라 지하 3-10 km 심도 범위내 미국 대륙에 부존하는 지열에너지의 총량은  $13 \times 10^6$  EJ 이상으로 평가되었는데, 회수율을 2%로 가정하였을 때 추출가능한 열량 즉, 부존매장량이  $2 \times 10^5$  EJ 이상으로 2005년도 미국 1차 에너지 사용량의 2,000배에 이른다고 하였다.

## 6. 토의 및 결론

지금까지 지열에너지자원 부존량의 정의, 전세계 부존량 평가에 대한 대표적인 결과, 그리고 최근의 부존량 평가 결과에 대해 살펴보았다. 지하자원 부존량 또는 매장량에 대한 평가는 자원개발 기술의 진보 및 경제적 관점에 따라 평가시점과 평가자에 따라 매우 상이한 결과를 보이고 있으며, 지열에너지자원 또한 지하자원의 하나라는 면에서 크게 다르지 않다. 그러나 어떤 방식으로든지 간에 정량적인 평가결과가 제공되어야 만이 정책결정자나 일반인이 지열자원의 중요성에 대해 정확히 인식하고 자원개발이나 활용기술개발 필요성에 대한 사회적 합의를 이끌어내는 단초를 마련할 수 있을 것이다.

다행히도 최근에 지금까지 축적되어온 우리나라

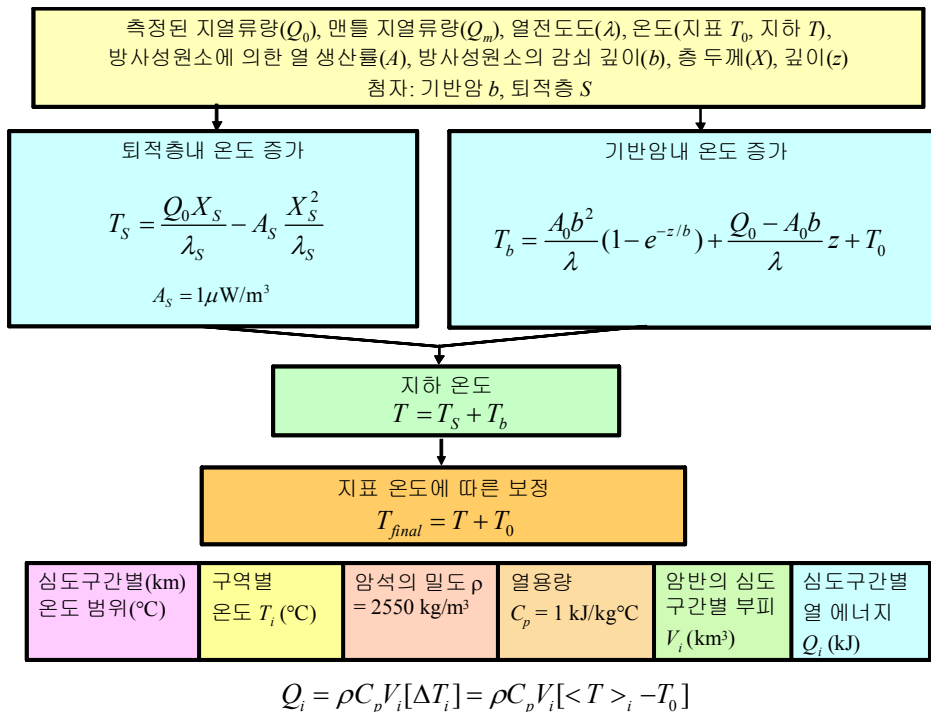
의 지온증가율자료, 지열류량자료, 암반 열물성자료 및 열생산률 자료를 가지고 <그림 4>에 보여지는 흐름도에 기초하여 우리나라 지열자원 부존량에 대한 최초의 평가가 이루어졌다 (박성호 등, 2008). 이에 따르면 우리나라 심도범위 1-5 km 지하에 부존하는 총 열량은 약  $1 \times 10^5$  EJ이고 회수율 2%를 가정할 때 연간 추출가능량은 약 46 GToe ( $10^9$  석유환산톤)에 이르러 2006년 우리나라 1차에너지 소비량의 200배에 달한다. 물론 아직까지 우리나라에서 1 km 깊이 이상의 심부 시추공 및 열생산률 자료의 수가 적어서 심도별 온도분포의 정확도가 부족한 점은 있겠으나, 이 결과가 우리나라 지열 부존량의 최초 정량 평가라는 면에서 큰 의미가 있다 하겠다. 앞으로 자료의 축적에 따라 평가 결과가 달라지겠으나 현재의 값에서 크게 벗어나지는 않을 것이므로, 우리나라에서 추출 가능한 지열부존량에 대해서 정량적인 결과로 인용되기를 기대한다.

### 사 사

이 논문은 에너지관리공단의 에너지자원기술 개발사업의 지원에 의해 작성되었다.

### References

- [1] 박성호, 이영민, 김형찬, 김종찬, 구민호, 2008, 한국의 지열에너지 부존량 산출, 신재생에너지 춘계학술발표회 (이 proceeding).
- [2] Bertani, R., 2003, What is geothermal potential?, IGA News, No. 53, pp. 1-3.
- [3] Clauser, C., 2006, Geothermal Energy, in K. Heinloth (Ed), Landolt-Bornstein, Group VIII "Advanced Materials and Technologies", Vol.3 "Energy Technologies", Subvol. C "Renewable Energy", pp. 480-595, Springer Verlag, Heidelberg-Berlin.
- [4] Electric Power Research Institute, 1978, Geothermal energy prospect for the next 50 years, Special Report ER-611-SR.
- [5] Massachusetts Institute of Technology, 2006, The future of geothermal energy - Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st century.
- [6] Muffler, L.J.P., and Cataldi, R., 1978, Methods for regional assessment of geothermal resources, Geothermics, Vol. 7, pp. 53-89.
- [7] Stefansson, V., 2005, World geothermal Assessment, Proceedings World Geothermal Congress.



<그림 4> 암반 부피를 기준으로 지열에너지 부존량(접근가능한 잠재부존량)을 계산하는 방법 (modified from MIT, 2006).