

착정공 온도검층의 이용

Temperature Log in Boreholes

염병우(Byoung - Woo Yum)* · 김형찬(Hyoungh - Chan Kim)*

요 약 : 온도검층은 시추공내의 물의 온도를 측정하는 물리검층의 한 방법으로, 온도검층을 통하여 공내의 열적 상황과 물의 흐름에 관한 정보를 얻을 수 있다. 한국자원연구소에서 수행한 400개의 온도검층결과 중 공저온도, 심도 및 각 지역의 연평균 기온으로부터 평균 지하증온율을 26.6°C/km로 계산하였으며, 이 값은 앞으로 지속적으로 보정하여야 할 값이다. 또한 세 가지의 대표적인 온도검층 결과를 제시하여 검토, 해석하였다. 첫 번째는 동질의 화강암저반에서 측정된 온도검층 결과로서 심도가 증가함에 따라 온도는 단순 1차 증가를 보이는 예이며, 두 번째는 공내에서 온도의 측정으로 파쇄대를 추정할 수 있는 예를 들어 설명하였고, 세 번째는 양수시험 전후에 실시한 온도검층의 예와 양수정에서 일정한 양으로 양수할 때 관측정에서 연속적으로 온도검층을 실시한 예이다. 우리 나라 결정질 암석내의 대수층은 파쇄대 대수층이 주를 이루며, 인접한 공간의 영향관계를 알기 위하여 다양한 시험이 필요하다. 이 때 시간과 돈을 절약할 수 있는 간단한 양수시험 혹은 주입시험과 더불어 온도검층을 실시함으로써 정성적인 연결성을 예측할 수 있다.

Abstract : Temperature log is an effective method for evaluating the thermal situation and ground water flow path within boreholes. When pumping is proceeding, the continuous temperature logs in a neighboring hole are very helpful to assess connectivity between holes. Mean geothermal gradient is calculated as 26.6°C/km from 400 bottom hole temperatures, their depths, and the annual mean temperature at each location. Various examples of temperature logs in crystalline rocks are described: first examples show linear increases in homogeneous granitic rocks. Another one illustrates that isolated aquifers have connected each other after a borehole is completed. Slopes of temperature gradient indicate ground water inlet and/or outflow within a borehole. The other log concludes that thermal response in observation borehole induced by pumping is related to the location of interconnected fractures.

서 언

온천공이나 지하수공과 관정 등 취수를 목적으로 착정공을 완성하였을 때, 다양한 물리검층을 통하여 경제적으로 공의 지질 상황을 파악할 수 있다. 여러 물리검층의 방법 중 온도검층은 공내의 물의 온도를 측정함으로써 지하수와 오염물질의 이동과 근원을 밝히는데 중요한 역할을 하며, 특히 온천공의 경우 공내 온도검층을 통하여 온수의 배출이 일어나는 대수층을 파악할 수 있고, 공저온도와 수중 모타펌프를 이용한 용출온도간의 비교로써 그 타당성을 검토할 수 있다. 온도검층은 조사공 주변의 1~30 m내외의 연구규모를 가지며, 지하수의 흐름으로 야기된 온도변화와 파쇄대의 존재여부를 파악하고 해석하는데 도움을 준다(Paillet, *et al.*, 1993). 또한 온도검층은 공내 물의 전기전도도측정에 선행하거나 동시에 측정하여 이를 보정하는데 쓰인다(Keys and MacCary, 1971; Keys, 1990).

온도검층은 말 그대로 시추공의 심도별 온도를 측정하는 것을 의미하며, 최초의 써미스터를 이용한 온도 측정은 1740년

프랑스의 벨포르(Belfort) 인근의 광산에서 측정되었다(Bullard, 1965). 우리나라에서는 1987년까지 온천공의 공내 온도검층은 긴 전선으로 연결된 온도 센서부분을 공내로 강하하여 측정하였다. 이후 프루브(probe, 써미스터부)와 강철로 보호된 전선 1,000 혹은 2,000 m, 원치부, 그리고 강하속도와 측정 등을 조절하는 중앙 연산부로 구성된 자동 온도 검층기들이 도입되어 현재 사용 중에 있다. 대부분의 온도검층에서와 마찬가지로 금번 연구에서 사용한 자료들은 일본 오요(OYO)사의 제품과 영국 로버트슨(Robertson)사의 제품을 이용하여 연속 측정된 결과이며, 두 제품 모두 온도 센서는 써미스터타입(glass-bead thermister type)이다.

온도검층에 의해 측정된 온도는 센서의 바로 인접 부근의 물이나 공기의 온도이므로 기록된 온도는 인접의 암석이나 이에 배태된 지하수의 온도를 의미한다. 공내 물의 흐름이 없거나 공내에서 물과 인접 암석간에 온도 평형이 이루어져 있다면 이 온도는 암석의 온도를 의미한다.

온도검층은 물을 공내로 들여보내거나 내보내는 심도구간의 위치를 포함한 공내 물의 흐름(이동)에 관한 유익한 정보를 제공해주며, 더 나아가 투수성 분포와 상대적인 수두에 관한 정보를 줄 수 있다. 온도센서는 좁은 범위 안의 공내 물이나 공기의

*한국자원연구소 환경지질연구부(Environmental Geology Division, KIGAM, Kajung-dong 30, Yusong-gu, Taejeon 305-350, Korea)

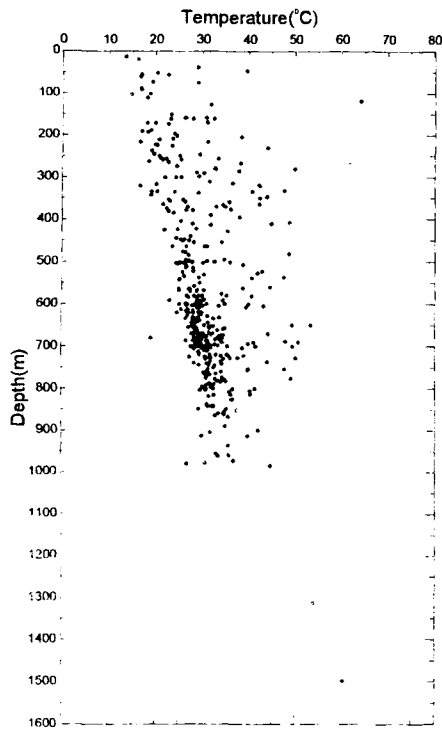


Figure 1. Bottom hole temperatures of deep-seated boreholes in Korea plotted against their depths.

온도에만 반응하지만 이 때 기록된 온도는 인접한 암석과 암석 내 물의 온도를 지시할 수 있다(Keys and MacCary, 1971; Keys, 1990). 공내의 물의 흐름이 없는 경우 혹은 공내 물의 온도와 인접 암석의 온도가 평형에 도달한 경우 측정된 온도는 그 심도에서의 암석의 온도를 지시할 수 있다.

한국자원연구소는 1987년부터 온천법에 의거 지방자치단체에 온천 발견신고를 접수한 측정공에 대하여 온천공조사를 실시하여왔다. 지난 10년간의 약 400여개의 온도검층의 결과를 분석한 결과 10~1,500 m 심도에 발달한 대수층의 파악이 온도검층을 통하여 가능케 되었다. 금번 연구에서는 균질한 화강암에서 측정된 결과와 양수정에서 양수를 진행시키고 동시에 관찰정에서 온도검층을 반복적으로 실시하였을 때의 관찰 결과, 그리고 양수시험 전후에 양수정의 온도 분포의 변화 등 다양한 예제를 실었다.

지하증온율

지각의 온도는 일반적으로 그 심도가 증가함에 따라 지하 수 km까지는 단순 증가 양상으로 간주할 수 있다. 이같은 증가비를 지하증온율(geothermal gradient)이라 한다.

먼저 우리 나라의 지하증온율에 대한 고찰을 하면, Yum (1993)은 193개 측정공의 공저온도와 심도 및 각 지역의 연평균 기온으로부터 지하 증온율을 계산하고, 이 중 46개의 측정치를 온천지역에서 관측한 이상치(異常值)로 간주하여 제외시키고 우리 나라의 평균치를 구한 값은 28.3°C/km이었으며, 이 값은 과대 평가된 값이라 논하였다. 이후 김형찬(1996)은 370개 시추공 자료에 의하여, 암상에 따른 지온분포와 지하 증

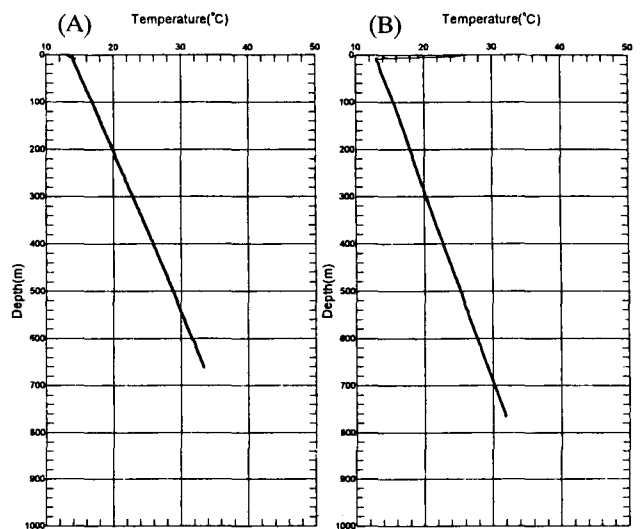


Figure 2. Temperature logs from boreholes of homogeneous Cretaceous Daebo granite(A) and Jurassic granite(B) showing linear trends.

온율을 세분하고, 퇴적암지역에서 지하증온율이 가장 높으며 (26.2°C/km), 화성암(25.3°C/km), 변성암(23.6°C/km) 순으로 지하 증온율이 높다고 기재하였으며, 특히 퇴적암 지역에서 획득한 자료의 대부분이 경상계 퇴적암류지역에서 측정된 결과들로서 이 시추공들이 화강암과 관련한 온천 시추공들이므로 순수한 의미의 퇴적암으로 간주할 수 없는 것으로 판단하였다.

Figure 1은 지금까지 한국자원연구소에서 측정된 측정공 400개소의 공저 온도와 심도를 표시한 것이다. 이 자료와 우리나라의 연평균 기온(기상청, 1995)을 토대로 단순 증가의 평균 지하 증온율을 계산하던 26.6°C/km이나, 이 자료들은 온천조사의 일환으로 측정된 자료이므로 화강암지역에 편중된 자료이며, 화강암은 다른 암석에 비하여 열전도율과 열생산량이 높기 때문에 이로부터 우리 나라의 평균 지하증온율을 계산하는 데는 무리가 따르므로 이에 대한 계속적인 자료의 보완과 새로운 값의 도출이 요구된다. 그러나 이 값들로부터 우리 나라의 기반암을 이루는 변성퇴적암류와 퇴적암류에서 관찰된 값은 영국의 기반암의 평균값인 약 20°C/km 내외(Downing and Gray, 1986; Wheildon and Rollin, 1986)로 추정되며, 화강암류의 증온율은 이보다 높은 26°C/km이다. 후자의 경우는 전세계의 평균 증온율인 25~30°C/km(Dickson and Fanelli, 1990)와 유사한 값이다.

Figure 2는 지하 증온율이 직선(linear)적인 예로서 각각 전북 김제시 상동동(A)과 충북 음성군 대소면 수태리(B)에 소재한 굴착공의 온도검층 결과이다. 화강암의 저반에 시굴한 두 공은 각각 대보 화강암(A)과 유라기(혹은 삼첩기) 열리상 화강암(B)에 위치한다. 두 공간의 지하 증온율의 차이는 두 저반의 열적 성속도와 열생산량을 의미하며, 지열 잠재성은 대보 화강암이 큼을 알 수 있다.

공내 온도의 변화

온도검층을 실시함으로써 연속적인 공내의 온도 상황이 파악

되며, 대체로 두 가지 종류의 수리지질 조건에 따른 공내의 물 흐름을 알 수 있다(Beck and Balling, 1988). 첫번째, 때로는 강제 대류라고 불리기도 하는 지역의 전반적인 흐름을 알 수 있고, 두 번째로는 시추작업에 의해 유입된 흐름을 알 수 있다. 두 번째 흐름 중에는 시추수가 투수성이 높은 매질에 강제로 들어 갔다가 열적 균형을 깨뜨리며 공내로 돌아오는 경우가 있다. 이 현상은 비교적 짧은 기간에 일어나는 일시적인 현상으로 간주할 수 있으며, 그 정도는 수일에서 수주일 이내이다. 두번째 흐름 중 또 다른 경우로는 시추 전에는 연결되어있지 않았던 두 대수층을 시추공이 연결하였을 때 일어나는 현상이 있다. 시추작업은 엄밀한 의미에서 살펴볼 때 서로 다른 수두를 가진 대수층을 연결하기도 하는 등, 전혀 수리지질학적 연관이 없는 구간들을 연결시키는 상황을 의미한다. 이 현상은 대수층의 압력과 온도의 평형 등과 관련하여 상당 기간동안(때로는 2~3년) 안정을 이루지 못하는 경우도 허다하다.

예로서 경북 예천군 감천면 관현리에 위치한 굴착공의 온도검층을 보기로 한다(Figure 3). 이 공은 확인심도 962 m인 공으로 일일 10 m³정도 자분하는 공으로, 그림에서 살펴볼 때 온도구배의 변화는 4곳정도이다(상부로부터 (a), (b), (c), (d), (e)(공저)로 표시). Figure 3(A)은 다른 온도검층 그림들과 같은 규격이며, (B)는 온도축을 확대하여 온도의 변화를 상세히 볼 수 있도록 한 그림이다. 이를 하부로부터 해석하면 공저의 대수층의 물(e)이 공내로 유입하여 대수층(d)과 혼합한다. (d) 대수층으로부터 나온 물은 주로 공내 상부로 흘러 (c)대수층까지 영향을 미친다. (d), (e)대수층들의 공내 유입량은 그리 많지 않은 것으로 판단된다. (c)대수층은 이 공의 주 대수층으로 온도는 26.5°C 내외이다. (c)대수층의 물은 크게 보아 자분에 영향을 미칠 정도로 큰 압력을 가지며, 상대적으로 더 큰 압력을 지닌 (d)대수층의 물과 만나 급격한 온도 증가 구간을 갖는다(3.7°C/10 m). 즉 이 구간은 (c)대수층의 물이 (d)대수층의 영

향하에 있는 구간에서 만나 온도의 급격한 차이를 보이는 혼합현상으로 해석된다. 상부의 대수층 구간들인 (a), (b)는 케이싱의 영향하에 있으므로(280 m 심도까지), 위의 설명과 같은 분명한 관계를 보이지는 않으나, 대체로 (c)대수층의 영향하에 있음을 시사한다. 이같은 해석은 하부의 대수층 물의 압력(hydrostatic pressure)이 상부 대수층의 그것보다 높다는 가정하에서 기술한 것이며, 이 그림은 시추작업에 의하여 연관이 없는 대수층들이 공을 통하여 연결되었을 때 나타나는 전형적인 현상이다.

양수에 의한 온도의 변화

여기서는 두 가지 예를 들어 양수시험과 연관한 온도검층의 결과를 살펴보기로 한다. 첫번째, 착정공이 완성되고 일정 기간이 지난 후, 공내 물의 상태가 안정되어 있을 때 검층한 결과(Figure 4(A))와 동일한 공에서 72시간 연속 장기양수시험을 실시한 직후 측정된 공내 온도검층 결과(Figure 4(B))의 비교이다. 이 그림들로부터 착정공의 대수층이 공저에 있음을 알 수 있다. 실제로 이같은 실험을 실시케 된 배경은 공저온도보다 높은 양수온도가 관측되어 공저온도보다 높은 양수온도가 있을 수 있는가 하는 의문을 풀기 위하여 실시하였다. Figure 4(A)는 2 m 간격의 투영이며, Figure 4(B)의 경우 공저온도의 빠른 확인을 위하여 센서의 하강속도를 높여 10 m 간격의 투영을 하였다. 검층결과에 의하면 공저 774 m에서 30.94°C를 확인하였으며(Figure 4(A)), Figure 4(B)의 경우 공저 774 m에서 31.05°C를 기록하여 양수후 0.11°C의 증가를 보였다. 양수온도가 31.4°C

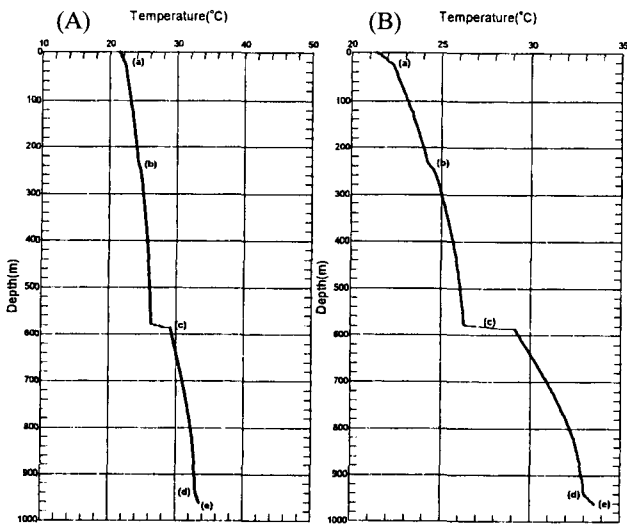


Figure 3. Temperature log of outflowing borehole with normal (A) and exaggerated(B) temperature axis. Small letters indicate abrupt changes of temperature assuming inlet and outflow of ground water within borehole.

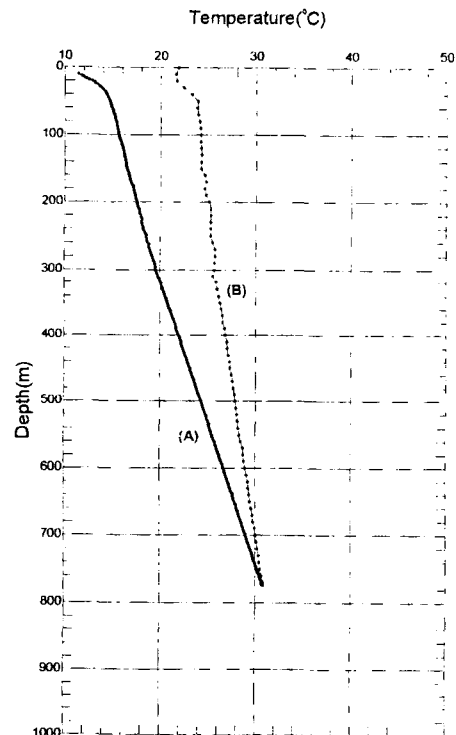


Figure 4. Temperature logs before(A) and after(B) constant rate 72-hours pumping test.

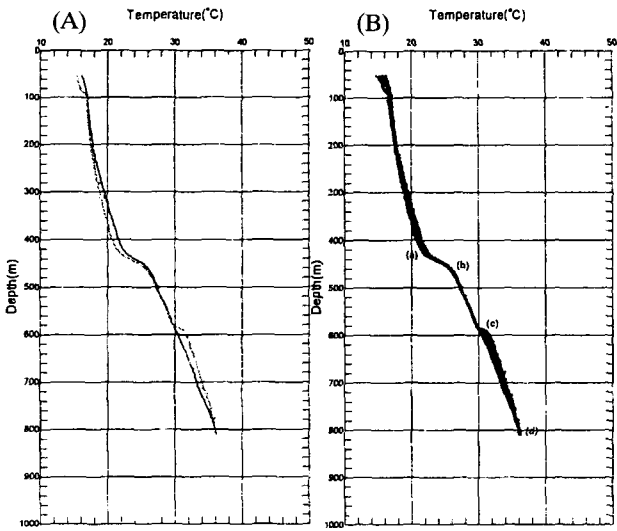


Figure 5. Temperature logs before(solid line in (A)) and after (dashed line in (A)) constant rate pumping test. Several temperature logs are continuously conducting during the pumping test(B). Small letters indicate abrupt changes of temperature, in which (c) point emerges when the pumping started.

인 점을 감안할 때 양수시험후 수중모터 펌프의 인양 및 검층 시간동안 공저온도가 감소하였을 가능성이 매우 높다. 대수층의 상태에 대하여는 다음과 같이 두 가지 경우를 생각할 수 있다. 첫번째, 굴착공이 대수층을 완전히 관통하지 못한 경우와 두번째, 공저에서 기울어진 파쇄대를 만나 하부로부터 활발한 물의 공급이 일어나는 경우를 들 수 있다. 그러나 첫번째 경우는 파쇄대의 두께가 매우 커야 상부와 하부의 온도차가 일어날 수 있으므로 두 번째 설명이 더욱 타당성을 갖는다. 특히 이 지역은 지표에서 사교되는 절리와 단층의 발달이 확인된 곳이므로 두 번째 설명이 타당하다. 양수시험에 사용된 수중 모터 펌프의 발열이 고려 대상이 될 수 있으나, 40마력의 모터를 사용하여 800 m³/day의 양수량으로 실험을 실시하였으므로 전선과 모터에서의 발열에 의한 영향은 지극히 미미한 수준이다.

두번째의 예제는 500 m 심도의 양수정에서 850 m³/day 으로 48시간 양수시험이 진행중일 때 795 m 심도의 관측정에서 연속적으로 공내 온도검층을 실시한 경우이다. 이 시험의 목적은 110 m 떨어져 있는 양수정과 관측정간의 연결성(connectivity)을 시험하는 것으로 그 결과는 Figure 5와 같다. Figure 5(A)는 양수시험 실시 전에 측정된 결과(실선 부분)와 양수 종료시의 결과(점선 부분)이며, Figure 5(B)는 양수시험 동안 연속적인 측정의 결과이다. 먼저 그림 Figure 5(A)(실선 부분)에서 볼 때, 이 공의 파쇄대 지점은 Figure 5(B)의 (a)와 (b)지점, 그리고 공저를 생각할 수 있으나, Figure 5(B)에서는 새로운 파쇄대 구간인 (c)지점이 나타난다. 즉, 공내 안정 후 측정된 온도검층에 의하면 (c)지점은 안정된(static)상태를 의미하나, 실제 양수가 진행되면 공 밖으로 물을 유출(outlet)시키는 파쇄대구간으로 간주할 수 있다. Figure 5(B)에서 볼 때 지표로부터 (c) 지점까지는 양수가 진행될수록 온도의 하강이 일어나는 구간이며, (c)지점으로부터 공저까지는 온도의 상승이 일어나는 구간

이다. 이 검층 결과로부터 두 공간에는 파쇄대로 연결되어 있음을 알 수 있다.

토의 및 결론

착정공을 완성한 후 온도검층을 실시함으로써 우리는 공내의 온도분포와 시추공내의 지하수의 흐름에 관한 정보를 얻을 수 있다. 여기에 더하여 양수정에서 양수시험을 실시하고 인근의 관측정에서 지속적인 온도검층을 실시함으로써 두 공간의 파쇄대대의 수리학적 연결성을 확인할 수 있다. 요사이 지하수공과 온천공의 개발로 서로간의 간섭현상이 두드러지는 바, 이와 같은 시험을 통하여 정성적인 연결성에 대한 확실한 정보를 얻을 수 있다. 결정질 암석에서 여러 착정공의 파쇄대들간의 연결성은 지하수공/온천공의 영향 유무 판단뿐 아니라 추적자시험에서도 유용하게 적용될 수 있다. 예를 들면, 소금(NaCl)을 추적자로 사용할 경우 온도검층과 더불어 전기전도도검층을 실시하여 수리상수의 도출이 가능하며, 방사성 원소를 사용할 경우 감마선검층 등이 사용될 수 있다.

사 사

이 논문에 인용된 자료는 한국자원연구소 환경지질연구부에서 수행한 온천조사의 결과에서 발췌한 것으로 자료의 인용을 허락하여 주신 한국자원연구소 강필중 소장님, 임정웅 책임연구원님, 김원영 부장님께 감사드리는 바이다.

참고문헌

기상청, 1995, 기상연보.
 김형찬, 1996, 한반도의 지온 특성과 암상과의 연관성 연구, 충남대학교 대학원 석사학위논문, p. 52.
 Beck, A. E. and Balling, N., 1988, Determination of virgin rock temperatures, in Handbooks of Terrestrial Heat-Flow Density Determination with Guidelines and Recommendations of the International Heat Flow Commission, R. Haenel ed., Kluwer Academic Pub., Dordrecht. pp.
 Bullard, E. C., 1965, Historical Introduction to terrestrial heat flow, in Terrestrial Heat Flow, Lee, W. H. K. ed., Amer. Geophys. Un., Geophys. Mon. Ser., 8, p. 1-6.
 Dickson, M. H. and Fanelli, M., 1990, Geothermal energy and its utilization, in Small Geothermal Resources, A Guide to Development and Utilization, Dickson, M. H. and M. Fanelli eds. UNITAR/UNDP Centre on Small Energy Resources, Rome, p. 1-27.
 Downing, R. A. and Gray, D. A., 1986, Introduction, Chapter 1., in Geothermal Energy - The Potential in the United Kingdom, Downing R. A. and D. A. Gray eds., A volume commemorating the 150th anniversary of the British Geological Survey, p. 1-7.
 Keys, W. S. and MacCary, L. M., 1971, Application of borehole geophysics to water-resources investigations, U.S. Geological Survey Tech. Water Resources Inv., Book 2, Chapter E1, p. 126.

- Keys, W. S., 1990, Borehole geophysics applied to ground-water investigations, U.S. Geological Survey Tech. Water Resources Inv., Book 2, Chapter E2, p. 150.
- Paillet, F. L., Kay, R. T., Yeskis, D. and Pedler, W., 1993, Interpretating well logs into a multiple-scale investigation of a fractured sedimentary aquifer, *The Log Analyst*, Jan-Feb 1993, p. 24-40.
- Wheildon, J. and Rollin, K. E., 1986, Heat Flow, Chapter 2., in *Geothermal Energy-The Potential in the United Kingdom*, Downing R. A. and D. A. Gray eds., A volume commemorating the 150th anniversary of the British Geological Survey, p. 8-20.
- Yum, B. W., 1993, Environmental Hydrogeochemistry of the Thermal Waters in Granites of the Pocheon, Gosung, Yesan, and Jungwon Areas, Ph. D. Dissertation, Seoul Nat'l Univ., p. 251.