

1m깊이 지온조사자료의 해석에 대한 연구

김기성, 강현철

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《온천, 지하수, 지열탐사를 적극 벌려 지하수와 지열자원을 다 찾아내어 종합적으로 리용하도록 하여야 합니다.》(《김정일선집》 증보판 제14권 503페이지)

1m깊이 지온조사는 땅속열원의 특성을 밝혀내는 정확한 지표지열조사방법의 하나이다. 현재까지 1m깊이 지온조사자료의 해석에서는 무한수평원기둥모형에 대한 열전도방정식의 해석적풀이를 직접 리용하여 열원의 분포특성을 밝혔다.

우리는 1m깊이 지온조사자료를 해석하기 위한 거꿀문제풀이방법을 제기하고 모형계산 실험을 통하여 그 정확성을 검증한데 기초하여 온천근방에서의 1m깊이 지온조사자료를 해석하고 열이상체의 규모와 놓임깊이를 결정하였다.

1. 정문제풀이

땅속의 일정한 깊이에 무한수평원기둥모양의 열원이 있는 경우 지온이상을 일으킨 열원중심까지의 깊이 b 와 열이상체의 머리부까지의 깊이 H 그리고 열원의 반경 r 를 구하는 문제는 다음과 같은 반무한매질에서의 정상열전도문제라 볼수 있다.(그림 1)

열전도방정식과 경계조건은 다음과 같다.[2]

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0$$

$$T = T_0 \quad (x = 0)$$

$$T = T_b \quad (r^2 = (b-x)^2 + y^2)$$

여기서 T 는 온도, T_0 은 지표면에서의 온도, T_b 는 원기둥결면에서의 온도, x 와 y 는 온도를 구하려는 점의 자리표이다.

열전도방정식 (1)의 풀이는 다음과 같다.

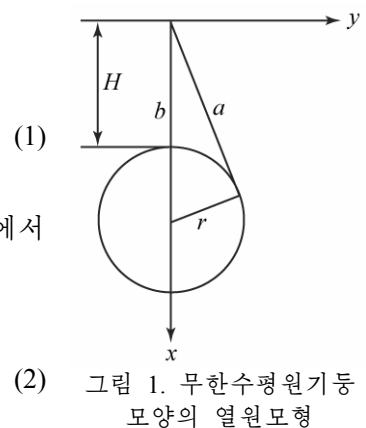
$$T = \frac{T_b}{\ln \frac{b+a}{b-a}} \ln \frac{(x+a)^2 + y^2}{(x-a)^2 + y^2}$$

여기서 $a^2 = b^2 - r^2$ 이다.

1m깊이에서의 지온 $T_{x=1}$ 은 다음과 같다.

$$T_{x=1} = \frac{T_b}{\ln \frac{b+a}{b-a}} \ln \frac{(1+a)^2 + y^2}{(1-a)^2 + y^2} \quad (3)$$

식 (3)을 정문제풀이공식으로 하여 1m깊이 지온탐사자료의 거꿀문제풀이를 하였다.



2. 거꿀문제풀이

거꿀문제풀이에서 리용한 오차함수는 다음과 같다.[1, 3]

$$F = \sum_{i=1}^n [T_{\text{관}}(y_i) - T_{\text{리}}(y_i, a, b)]^2 \quad (4)$$

파라미터 a, b 의 수정방향은 다음과 같다.

$$R_a^{(k)} = -(F'_a)^{(k)}, \quad R_b^{(k)} = -(F'_b)^{(k)} \quad (5)$$

여기서 k 는 반복단계, F'_a 와 F'_b 는 각각 a 와 b 에 관한 오차함수 F 의 도함수로서 다음과 같다.

$$F'_a = 2T_b \sum_{i=1}^n \left[T_{\text{관}(i)} - T_b \frac{\ln \frac{(1+a)^2 + y_i^2}{(1-a)^2 + y_i^2}}{\ln \frac{b+a}{b-a}} \right] \cdot \frac{2b \ln \frac{(1+a)^2 + y_i^2}{(1-a)^2 + y_i^2} - \frac{4(1-a^2 + y_i^2) \ln \frac{b+a}{b-a}}{[(1+a)^2 + y_i^2][(1-a)^2 + y_i^2]}}{\left(\ln \frac{b+a}{b-a} \right)^2},$$

$$F'_b = 2 \sum_{i=1}^n \left[T_{\text{관}(i)} - T_b \frac{\ln \frac{(1+a)^2 + y_i^2}{(1-a)^2 + y_i^2}}{\ln \frac{b+a}{b-a}} \right] \cdot \left[-T_b \frac{2a}{b^2 - a^2} \frac{\ln \frac{(1+a)^2 + y_i^2}{(1-a)^2 + y_i^2}}{\left(\ln \frac{b+a}{b-a} \right)^2} \right]$$

반복단계에서의 파라미터는 다음의 식으로 수정한다.

$$a^{(k+1)} = a^{(k)} + \lambda_k R_a^{(k)}, \quad b^{(k+1)} = b^{(k)} + \lambda_k R_b^{(k)} \quad (6)$$

여기서 $\lambda_k = \frac{F_k}{(F'_a)^2 + (F'_b)^2}$ 이다.

식 (4)–(6)을 리용하여 거꿀문제풀이를 진행하여 열이상체의 머리부까지의 깊이와 반경을 구할수 있다.

거꿀문제풀이는 다음의 조건을 만족시킬 때 끝난다.

$$\frac{|F(p^{(k)}) - F(p^{(k+1)})|}{F(p^{(k+1)})} \leq \varepsilon$$

여기서 ε 은 상대오차한계로서 거꿀문제풀이를 진행할 때 측정자료에 포함되어있는 오차를 고려하여 해석자가 설정한다.

3. 방법의 믿음성검증

장애가 없는 경우와 10%의 우연장애를 추가한 경우 열이상체결면에서의 온도가 40℃ 이고 20m의 깊이에 놓인 반경이 5m인 열이상체가 만드는 1m 깊이에서의 온도이상곡선은 그림 2와 같다.

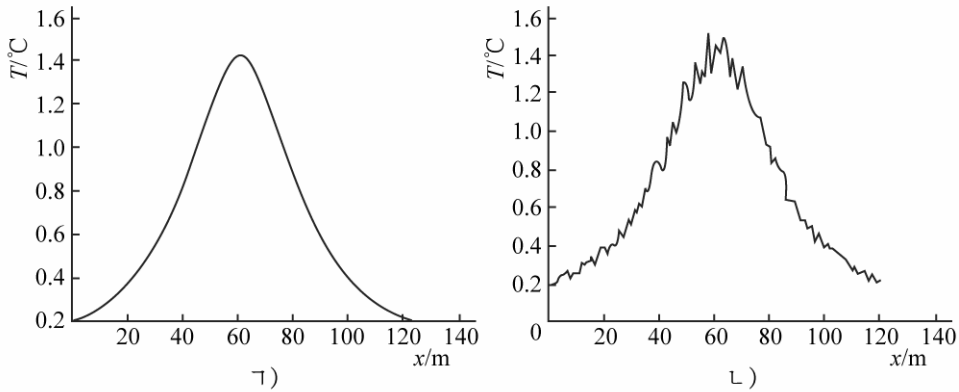


그림 2. 1m깊이 지온이상곡선

1) 장애가 없는 경우, 2) 10%의 우연장애를 추가한 경우

거꿀문제풀이를 진행한 결과 장애가 없는 경우에는 진값의 수십배나 큰 초기값을 주어도 99.4~99.8%의 정확도로 진값으로 수렴하였다. 그리고 10%의 우연장애를 추가한 경우 $\varepsilon=0.0001$ 로 설정하고 거꿀문제풀이를 진행한 결과는 표 1과 같다.

표 1. 10%의 우연장애를 추가한 경우의 거꿀문제풀이결과

r/m			H/m		
초기값	추정값	상대오차/%	초기값	추정값	상대오차/%
1.9	발산		15	발산	
2.0	4.51	9.8	16	19.28	3.6
3.0	4.49	10.2	17	19.32	3.4
3.5	4.53	9.4	14	19.31	3.5
4.0	4.56	8.8	18	19.35	3.2
15.0	5.58	11.6	60	20.75	3.8
20.0	5.56	11.2	80	20.73	3.7
40.0	5.59	11.8	160	20.68	3.4
50.0	5.61	12.2	200	20.72	3.6

표 1에서 보는바와 같이 초기값을 진값보다 크게 설정한 경우에도(진값의 10배정도) 수렴특성이 좋다. 그리고 초기값을 진값의 70%이상으로 설정한 경우에만 진값으로 수렴한다. 그러므로 측정자료를 처리할 때 초기값을 예측값보다 충분히 크게 주어야 해당 이상체의 특성을 정확히 밝혀낼수 있다.

다음으로 성천온천주변에서 진행한 1m깊이 지온조사자료(표 2)를 해석한 결과는 표 3과 같다.

표 2. 1m깊이 지온조사자료(°C)

탐사선	탐사점번호																	
번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
4	8.6	9.0	8.7	9.6	9.2	9.3	9.4	8.7	8.7	9.0	9.3	7.5	8.8	9.2	9.5	8.7	8.3	8.5
5	8.6	8.8	8.7	9.4	9.4	9.2	9.4	8.7	8.7	9.0	9.3	7.5	9.3	9.0	9.3	9.4	8.3	8.8
6	8.7	8.3	9.3	9.4	11.0	11.8	11.7	11.1	10.4	9.6	10.8	10.4	10.6	9.4	9.1	8.8	9.0	8.7

표 3에서 보는바와 같이 열원의 중심은 지표로부터 약 30m의 깊이에 있으며 4~5m정도의 깊이까지 굴진하면 온천을 찾아낼수 있다.

표 3. 거꿀문제물이결과

탐사선번호	파라메터	
	r/m	H/m
4	25.30	4.20
5	25.21	4.21
6	26.18	3.54

맺 는 말

최속하강법을 리용하여 1m깊이 지온측정자료를 해석할 때 초기값을 진값보다 크게 주는 경우에는(진값의 10배까지) 안정하게 수렴하지만 작게 주는 경우에는 진값의 70%이상으로 설정하여야 진값으로 수렴한다.

이 방법을 리용하여 열이상체의 크기와 열원의 중심깊이 등 열이상체의 특성들을 비교적 정확히 밝힐수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 신태경 등; 지구물리탐사자료해석의 기초, 김일성 종합대학출판사, 72~77, 주체88(1999).
- [2] 김종희; 지열자원과 그 개발, 과학백과사전출판사, 74~93, 주체90(2001).
- [3] H. K. Gupta; Encyclopedia of Solid Earth Geophysics, Springer, 625~638, 2011.

주체104(2015)년 7월 5일 원고접수

Analysis of 1m Depth Geothermal Survey Data

Kim Ki Song, Kang Hyon Chol

We analyzed one meter depth geothermal survey data using the gradient method.

In the case of larger initial approximation than the true parameter value, the inverse problem converges stably. We can find out the characteristics such as size and depth of the thermal anomalous body according to the inverse result.

Key words: 1m depth geothermal survey, geotherm