

로그선형법과 2점법에 의한 저열층의 온도평가방법

김기성

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《현시대는 과학과 기술의 시대인것만큼 지질탐사사업을 현대화하는가 못하는가 하는데 따라 그 성과가 좌우되게 됩니다.》(《김정일선집》 증보판 제14권 505페이지)

저열층의 온도를 정확히 평가하는것은 지열자원을 평가하는데서뿐만아니라 시추작업 진행중이나 시추작업완료후에 추공의 열동력학적상태를 정확히 예측하는데서 매우 중요한 의의를 가진다.

론문에서는 추공막장에서 측정한 막장온도에 기초하여 로그선형법과 2점법으로 저열층의 온도를 평가하는 한가지 방법을 제기하였다.

1. 로그선형법에 의한 온도평가방법

로그선형법은 선원천법[1]에서와 같이 무한히 긴 균일한 선원천에 대한 수학적모형화에 기초한 방법으로서 시추용액이 오래동안 순환된다는 가정에 기초하고있다.

균일한 무한원기둥에서의 열력학적현상은 다음과 같은 열전도방정식에 의하여 표시할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial^2 r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{a^2} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

여기서 r 는 원기둥의 반경, a 는 온도전도도, T 는 온도, t 는 시간이다.

로그선형법에서는 시추용액의 열전달계수가 큰 경우 추공중심에서 시추용액의 온도와 추공과 지층경계면에서의 온도가 같다고 가정한다.

로그선형법에 의하여 식 (1)의 근사풀이를 구하면 다음과 같다.[4]

$$T_{\text{중}} = T_{\text{측}} + 0.5B_0 \ln \left(\frac{t_c + \Delta t}{\Delta t} \right) \quad (2)$$

$$B_0 = \frac{dQ_w}{dz} \cdot \frac{1}{2\pi k_e} \quad (3)$$

여기서 $T_{\text{측}}$ 은 추공막장에서 측정한 온도, $T_{\text{중}}$ 은 저열층의 온도, t_c 는 시추용액의 순환시간, Δt 는 시추용액방치시간, dQ_w/dz 는 단위시간동안에 단위길이에서 생겨나는 열손실량, k_e 는 저열층의 열전도도이다.

식 (2)에서 보는바와 같이 $T_{\text{중}}$ 은 $\ln \left(\frac{t_c + \Delta t}{\Delta t} \right)$ 와 선형관계에 있다. 즉 t_c 와 2개이상의 Δt , 그것에 대응하는 $T_{\text{측}}$ 값을 알면 지층의 온도 $T_{\text{중}}$ 을 구할수 있다.

2. 2점법에 의한 온도평가방법

2점법에서는 열확산방정식에 기초한 방사상열흐름모형을 리용하여 추공축과 저열층에서의 온도분포를 계산하는데 2개의 추공막장온도측정값($T_{\text{측}_1}$, $T_{\text{측}_2}$)과 그것에 대응하는 용액방치시간(t_{21} , t_{22})을 리용한다.

$$\frac{T_{\text{측}_1} - T_{\text{층}}}{T_{\text{측}_2} - T_{\text{층}}} = \frac{E_i(-D_1/F_{t_1}) + \ln F_{t_1} - D_2}{E_i(-D_1/F_{t_2}) + \ln F_{t_2} - D_2} \quad (4)$$

여기서 D_1 과 D_2 는 상수들로서 각각 1.192 5, 0.753 2이며 E_i 는 적분지수함수이다.[2] 그리고 F_{t_1} 과 F_{t_2} 는 다음식으로 계산한다.

$$F_{t_1} = t_{21}/t_h, \quad F_{t_2} = t_{22}/t_h$$

여기서 t_{21} 과 t_{22} 는 각각 굴진을 멈춘 때로부터 $T_{\text{측}_1}$ 및 $T_{\text{측}_2}$ 를 측정할 때까지의 시간이다.

$$t_h = t_H(1 + h/H)$$

여기서 t_H 는 추공을 굴진하는데 걸린 시간, H 는 추공막장의 깊이, h 는 온도를 측정한 깊이이다.

우리는 시추작업을 중지한 때로부터 빠른 시간에 측정한 추공막장온도를 리용하여 저열층의 온도를 평가하기 위하여 t_H 를 시추용액순환시간으로 설정하였으며 추공막장온도를 측정하므로 $H = h$ 로 하였다. 따라서 $t_h = 2t_H$ 이다.

3. 방법의 정확성검증

저열층의 온도가 알려져있는 4개의 추공들에 대한 자료(표 1)를 가지고 우리가 제기한 방법의 정확성을 평가하였다.

표 1. 추공막장측정값

추공번호	추공깊이/m	시추용액순환시간/h	용액방치시간/h	추공막장온도/℃
추공 1	100.1	12.3	6.25	88.6
			11.87	96.5
			16.87	101.7
			20.00	104.4
추공 2	100.0	5.0	2.50	56.6
			5.00	61.3
			7.50	64.3
			10.00	66.6
			15.00	69.6
추공 3	2 000.0	15.0	20.00	71.7
			5.00	46.4
			10.00	49.5
추공 4	558.1	2 040.0	15.00	51.4
			864.00	14.4
			2 112.00	13.0
			2 304.00	12.9
			5 544.00	12.4
			6 264.00	12.4

우리가 제기한 방법으로 계산한 결과와 선행연구[3]에서 제기한 회귀분석법으로 계산한 결과는 표 2와 같다.

표 2. 저열층의 온도계산결과

추공번호	$T_{로그}/^{\circ}\text{C}$	$T_{2점}/^{\circ}\text{C}$	$T_{회귀}/^{\circ}\text{C}$	$T_{중}/^{\circ}\text{C}$	상대 오차/%		
					로그선형법	2점법	회귀분석법
추공 1	115.70	106.78	111.41	120.0	3.58	11.02	7.47
추공 2	74.06	67.22	72.24	80.0	7.42	15.98	9.70
추공 3	56.21	52.84	57.01	60.0	6.32	11.93	4.98
추공 4	11.67	11.44	11.02	12.4	5.89	7.74	11.13

$T_{로그}$ 와 $T_{2점}$ 은 선원천법과 구면방사상열흐름법으로 계산한 저열층의 온도이고 $T_{회귀}$ 는 회귀분석법으로 계산한 저열층의 온도이다.

표 2에서 보는바와 같이 세가지 방법가운데서 정확도가 높은 방법은 로그선형법이다. 그리고 2점법은 시추용액순환시간과 용액방치시간이 비교적 짧을 때에는 회귀분석법에 비하여 정확도가 낮지만 이 시간들이 길 때에는 회귀분석법에 비하여 정확도가 높다.

4. 현실자료분석

선행연구자료[4]에 선행연구[1, 3]에서 제기한 방법과 우리가 제기한 방법을 적용하여 저열층의 온도를 평가하였다.

표 3. 야외자료

추공번호	추공깊이/m	시추용액순환시간/h	용액방치시간/h	추공막장온도/ $^{\circ}\text{C}$
추공 5	4 941	3.5	8.3	116.1
			11.0	125.0
			13.5	127.8
추공 6	1 035	12.0	14.3	83.9
			22.3	90.0
			29.3	94.4
추공 7	3 029	3.0	4.0	228.4
			8.0	240.8
			12.0	254.2
추공 8	1 457	2.5	6.0	131.8
			12.0	137.9
			18.0	144.4
			24.0	148.7
추공 9	400	2.5	6.0	47.5
			12.0	54.6
			18.0	59.8

표 3에 제시한 자료들에 대한 계산결과는 표 4와 같다.

표 4에서 보는바와 같이 5개 추공들가운데서 표준편차가 가장 작은 추공은 추공 9($\pm 5.43^{\circ}\text{C}$)이고 표준편차가 가장 큰 추공은 추공 6($\pm 24.55^{\circ}\text{C}$)이다. 그러므로 추공 9에서 측정한 추공 막장온도로부터 계산한 값이 해당 저열층의 온도와 근사하다는것을 알수 있다.

표 4. 계산결과

계산방법	저열층의 온도/°C				
	추공 5	추공 6	추공 7	추공 8	추공 9
선원천법	151.179 1	107.265 2	267.472 3	152.934 6	65.965 8
구면방사상열 흐름법	171.924 4	163.468 3	285.197 0	163.468 3	75.498 6
로그선형법	151.179 1	107.265 2	267.472 3	152.934 6	65.965 8
2점법	145.506 0	102.932 9	258.388 0	142.934 7	60.460 0
회귀분석법	150.880 0	109.277 0	245.394 0	147.553 0	73.159 0
평균	154.140 0	108.943 0	264.785 0	151.965 0	68.209 0
표준편차	±9.15	±24.55	±13.02	±6.85	±5.43

맺 는 말

로그선형법은 저열층의 온도평가를 위한 다른 방법들에 비하여 시추용액순환시간과 용액방치시간의 영향을 적게 받으며 정확도가 비교적 높은 방법이다. 그리고 2점법은 시추용액순환시간과 용액방치시간이 오랜 경우에 회귀분석법보다 정확도가 높다.

참 고 문 헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), 60, 11, 146, 주체103(2014).
- [2] 최호상 등; 계산력학(력학과용), 김일성종합대학출판사, 387~388, 1996.
- [3] 김중희; 지열자원과 그 개발, 과학백과사전종합출판사, 37~38, 49~51, 주체90(2001).
- [4] E. Santoyo et al.; Computer & Geosciences, 26, 201, 2000.

주체103(2014)년 10월 5일 원고접수

Estimative Method of Geothermal Reservoir Temperature by Log-Linear and Two-Point Methods

Kim Ki Song

We proposed the method to estimate the temperature of the geothermal reservoir using the log-linear and the two-point methods.

Log-linear method is the one that has low effect and high accuracy in circulation time of the mud-fluid and shut-in time as compared with the other method for estimating the temperature of the geothermal reservoir. Two-point method has higher accuracy than the regression analysis method in case of long circulation time and shut-in time of the mud fluid.

Key words: geotherm, shut-in time