

지질학회지 제 54권 제 4호, p. 415-424, (2018년 8월) J. Geol. Soc. Korea, v. 54, no. 4, p. 415-424, (August 2018) DOI http://dx.doi.org/10.14770/jgsk.2018.54.4.415 ISSN 0435-4036 (Print) ISSN 2288-7377 (Online)

복합지열시스템에서 단계양수시험을 이용한 최적양수량 산정

목종구^{1,2}·장범주²·박유철^{1,‡}·오정석¹·이근춘³·김기준³ ¹강원대학교 지질지구물리학부 ²(주)지오쓰리에코 ³(주)산하이앤씨

요 약

본 연구에서는 복합지열시스템 지열관정에서 수행한 단계양수시험을 이용하여 최적양수량을 산정하였다. 단계양수시험은 GH-2, GH-3 및 GH-4 지열공을 양수정으로 하여 양수량을 증가시키면서 각각 4단계로 수행 되었다. 최적양수량 평가는 양수량과 비수위강하량 평가 방법으로 수행하였으며, 분석결과 각 양수정에서 5, 10 m 수위강하가 일어났을 때, GH-2에서 276, 408 m³/day, GH-3에서 197, 265 m³/day 그리고 GH-4에서 320, 581 m³/day으로 계산되었다. 한계채수량은 GH-2에서 315 m³/day, GH-3에서 340 m³/day 그리고 GH-4에서 370 m³/day 이상으로 산정되었다. 따라서 연구지역은 지하수의 양이 풍부한 지역으로 수막재배시설을 위한 복 합지열시스템 설치가 적합한 것으로 판단된다.

주요어: 복합지열시스템, 단계양수시험, 비수위강하량, 최적양수량

Jong-Koo Mok, Bum-Ju Jang, Yu-Chul Park, Jeong-Seok Oh, Geun-Chun Lee and Ki-Joon Kim, 2018, Estimation of optimal pumping rate by step-drawdown tests at combined well and open-closed loops geothermal systems. Journal of the Geological Society of Korea. v. 54, no. 4, p. 415-424

ABSTRACT: This study was performed to estimate optimal pumping rates by step-drawdown tests at the combined well and open-closed loops geothermal (CWG) systems. For step-drawdown tests, GH-2, GH-3 and GH-4 geothermal wells were assigned as pumping wells, and each step-drawdown test was performed with 4 incremental pumping rates. The optimal pumping rates were estimated with pumping rates and specific drawdown (S_w/Q) comparison method. According to analysis results with 5 or 10 m water level drops at each pumping wells, the optimal pumping rates were estimated as 276 or 408 m³/day for GH-2, 197 or 265 m³/day for GH-3 and 320 or 581 m³/day for GH-4. The critical pumping rates were estimated as 315 m³/day for GH-2, 340 m³/day for GH-3 and 370 m³/day for GH-4. The study area is appropriate to operate CWG systems for green house with water curtain facilities because of sufficient supply of groundwater.

Key words: CWG systems, step-drawdown test, specific drawdown, optimal pumping rate

(Jong-Koo Mok, Yu-Chul Park and Jeong Seok Oh, Division of Geology and Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea; Jong-Koo Mok and Bum-Ju Jang, Geo3eco Co., Ltd., Chuncheon 24341, Republic of Korea; Geun-Chun Lee and Ki-Joon Kim, Sanha E&C Co., Ltd., Seongnam 13207, Republic of Korea)

1. 서 론

2000년도에 국내에 도입된 지열냉난방시스템은 정 부 주도의 활발한 보급정책으로 인해 사용이 크게 증 가되었다(Kwon *et al.*, 2012; Song and Lee, 2015). 지열냉난방시스템 적용분야 중에서도 최근에는 수막 재배시설에서 난방 또는 냉방을 목적으로 사용하는 사례가 점차 증가하고 있다(Song and Lee, 2015). 국내 지열냉난방시스템 설치로 인해 냉난방비의 절감뿐만 아니라 작업환경의 개선으로 일의 효율도 증가하는 사례가 보고되고 있으며 특히 파프리카와 화훼 같은 작물에 집중적으로 이용되고 있다(Park *et al.*, 2017). 수막재배시설에 적합한 지열냉난방시스 템의 개발과 에너지 효율을 증대시키기 위해 다양한

^{*} Corresponding author: +82-33-250-8586, E-mail: parkyc@kangwon.ac.kr

분야에서 많은 연구들이 진행되고 있다. 그 중에서 도 수막시설에서는 많은 양의 지하수를 사용하기 때 문에 설치부지에 대한 수리지질학적 특성 파악이 중 요한 연구이다.

대수층의 수리지질학적 특성을 파악하기 위해서 는 현장에서 여러 가지 수리시험(aquifer test)을 수 행해야 한다. 수리시험 중 단계양수시험(step-drawdown test)은 단공에서 일정한 시간 간격으로 양수 량을 증가시키면서 주변 관측정의 수위강하를 측정 함으로써 관정의 효율 및 대수층의 생산성 등을 평 가할 수 있다(Dawson and Istok, 1991; Kruseman and de Ridder, 1991; Hahn, 1998). 일반적으로 단 계양수시험을 수행할 때 각 단계에서 양수정 내 지 하수위가 안정될 때까지 양수를 수행하는데 시험은 최소 3단계 이상 진행되어야 하며 각 단계에서의 양 수시간은 동일하게 유지하는 것이 중요하다(Choi *et al.*, 2010).

본 연구는 개방형과 밀폐형 지열시스템을 결합한 복합지열시스템(combined well and open-closed loops geothermal systems, CWG)을 개발하는 실증과제의 연구로 설치부지의 지열관정에 대한 최적양수량을 평 가하기 위해서 개발된 지열공을 대상으로 단계양수 시험을 수행하였다.

2. 복합지열시스템 개요

지열냉난방시스템은 열교환 유체를 순환시키는 방식에 따라 밀폐형과 개방형으로 구분된다. 밀폐형 (closed-loop)은 밀폐된 배관에 유체를 순환시켜 열 을 교환하는 방식이며, 개방형(open-loop)은 지하수 를 직접 열교환유체로 이용하는 방식이다. 이 연구 에서 제안한 복합지열시스템(CWG)은 개방형의 단 일 지열공 내부에 밀폐형 방식의 지중열교환기를 결 합한 방식으로 현재 운영되는 밀폐형 또는 개방형에 비해서 열에너지 효율이 크게 증대된다(Song et al., 2018). 복합지열시스템은 지하수를 대량으로 이용하 는 수막재배시설에 적합한 시스템으로 지열공으로 부터 지하수를 양수하기 때문에 1차 열교환으로 인 한 지중온도 변화는 거의 발생하지 않고 2차 열교환 을 한 지하수를 농업용수로 직접 사용할 수 있다는 장점이 있다(Mok et al., 2017). 따라서 CWG시스템 을 안정적으로 운영하기 위해서는 일정량 이상의 지 하수 확보가 최우선 되어야 한다. 그림 1은 소구경-암반대수층에서의 복합지열시스템 중 Coaxial Type



Fig. 1. Schematic diagram showing configuration of complex geothermal heat pump combined with closed and open loop systems. The figure was modified from Park *et al.* (2017).

의 모식도이다.

3. 연구지역 및 방법

3.1 연구지역

연구부지는 행정구역상 충청북도 충주시 금가면 오석리 일원으로 주로 수막재배와 논농사가 이루어 지고 있으며 관개수로 등이 잘 정비되어 있다. 산계 는 태백산맥의 서쪽 말단부이며 대부분 고도 300~600 m로 낮은 구릉성 산지가 불규칙하게 분포한다. 연 구지역 수계는 주변 산계에서 발원한 소규모의 하천 들과 태백산맥에서 발원하여 충주호로 유입되어 서 쪽에서 북서방향으로 남한강이 흐르고 있다.

연구지역의 지질은 그림 2와 같이 중생대 쥐라기 부터 백악기에 해당하는 불국사통과 시대미상의 옥 천계가 폭넓게 분포하고 있으며, 이를 신생대 제4기 의 충적층이 부정합으로 피복하고 있다(Park and Yeo, 1971).

연구지역에 2016년에 설치된 지열관정과 관측정 은 거의 일직선상에 위치하며 가운데에 복합지열시 스템 관정(GH-2~4)이 설치되어 있고, 양쪽 끝으로는 관측정(BH-1, 2)이 설치되어 있다(그림 3). 연구부지 의 수리지질을 살펴보면, 20 m 내외의 충적층, 4.5~13.0 m 두께의 풍화암이 나타나며 그 하부에는 파쇄가 발 달한 연암(25~47 m 깊이)과 경암(42 m 깊이 아래) 이 나타난다(표 1~2; 그림 3).

3.2 단계양수시험

현장수리시험은 강수량의 영향을 최소화하기 위 해 건기인 2017년 4월에 수행하였다. 양수 시 수위변 화를 관측하기 위하여 양수정 및 관측정에 자동수위 측정기(Model 3001, Solinst)를 이용하여 1분 간격 으로 자료를 수집하였으며, 부저 및 램프가 부착된 수동수위계로 지하수위를 수시로 측정하여 확인하 였다. 자동수위측정기는 압력식이므로 대기압측정기 (Baro meter) 자료로 수위측정값을 보정하였다. 단 계양수시험은 수막재배용 복합지열시스템인 GH-2, GH-3 및 GH-4 관정에서 심도 100 m에 설치된 7.5 HP 수중펌프를 이용하여 각 관정에서 총 4단계를 일 정시간 간격으로 수행하였다. GH-2와 GH-4 관정의



Fig. 2. Geological map of the study area modified from KIGAM (2017).

단계양수시험은 각 단계별로 정류상태(steady-state) 에 도달한 것으로 판단되는 시점까지 시험을 진행하 였으며, GH-3 단계양수시험은 현장 상황 및 시험조 건을 고려하여 각 단계별 2시간 간격으로 시험을 진 행하였다(표 3). 단계별 양수량은 토출구에 설치된 밸브를 조절하여 유량을 조절하였으며, 유량 측정은 적산유량계와 V-notch를 이용하였다.

3.3 단계양수시험 해석

Jacob (1947)은 단계양수시험 시 양수정에서의 수

위강하에 대해 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$S_W = BQ + CQ^2 \tag{1}$$

여기서 *B*= *B*₁+ *B*₂ (*B*₁: 선형 대수층 손실계수, *B*₂: 선형 우물 손실계수), *C*는 비선형 우물 손실계수, *S*_W 은 수위강하, *Q*는 양수량이다. Jacob (1947)의 최초 제안 이후 Rorabaugh (1953)은 식(1)을 변형하여 일 반적인 해를 제시하였다.



Fig. 3. Location and layout of wells used in pumping and monitoring wells. The figure was modified from Mok *et al.* (2017).

Well		Elevation (m)	Depth (m)	Thickness (m)	Stratigraphic
		73.3	19.0	19.0	alluvium
	GH-2	54.3	32.0	13.0	weathered rock
		41.3	400.0	368.0	hard rock
		73.1	20.0	20.0	alluvium
Pumping	GH-3	53.1	24.0	4.0	weathered rock
(geomerniar)		49.1	150.0	126.0	hard rock
	GH-4	73.1	21.0	21.0	alluvium
		52.1	26.0	5.0	weathered rock
		47.1	150.0	124.0	hard rock
Monitoring -		73.1	18.1	18.1	alluvium
	BH-1	55.0	29.0	10.9	weathered rock
		44.1	150.0	121.0	hard rock
	BH-2	73.2	20.5	20.5	alluvium
		52.7	25.0	4.5	weathered rock
		48.2	150.0	125.0	hard rock

Table 1. Vertical profiles of geological properties at wells used in Pumping and monitoring wells.

Table 2. Specifications of wells used in the step-drawdown tests.

Well	Inner dia. (mm)	Well depth (m)	Well casing length (m)	Depth to water table (m, TOC*)	Type of GHPs**
GH-2	200	400	34	11.12	SCW***
GH-3	200	150	24	11.04	U-tube
GH-4	200	150	26	11.11	Coaxial
BH-1	76	150	50	11.24	monitorino
BH-2	76	150	44	11.37	- monitoring

TOC* : Top of casing

GHPs** : Geothermal heat pumps

SCW*** : Standing column well

$$S_W = BQ + CQ^P \tag{2}$$

여기서 P는 Q에 따라 1.5~2.5값을 갖는다. 그러나 Jacob (1947)이 제시한 2(P) 값이 여전히 널리 사용되고 있다(Ramey, 1982; Skinner, 1988). 단계양수시험을 통해 B와 C 값을 결정할 수 있다. 결정된 B와 C 값 으로 일정 시간(t)과 양수량(Q)에 대해 양수정에서 의 수위강하를 계산할 수 있다. 일반적으로 비수위강 하량과 최적양수량을 추정하기 위해서는 식(3)을 이 용하며 각 단계양수별 비수위강하량(S_W/Q)과 양수량 의 선형관계를 이용하여 B와 C를 추정할 수 있다.

$$S_W/Q = B + CQ \tag{3}$$

여기서 *B*는 상수가 아니며 시간에 따라 변한다 (Kruseman and de Ridder, 1991). 따라서 단계양 수시험의 해석도 단계별 양수지속시간에 의존하게 되며, 대수층과 양수정의 생산성(productivity)을 지시하는 비양수량(*Q*/*S_W*)도 양수시간 혹은 양수량 이 증가함에 따라 감소하게 된다(Lee *et al.*, 2005).

관정의 산출능력은 양수시간이 경과하거나 양수 량의 증가에 따라 감소하는데 우물효율(*E*_W)은 선형 손실 대수층 수위강하량을 선형 및 비선형손실 전체 수위강하량으로 나눔으로써 계산할 수 있다. 그러나 선형 대수층 손실계수와 선형 우물 손실계수의 구분 이 매우 어려우므로 일반적으로 (4)식과 같이 선형 손 실계수 전체를 이용하여 우물효율을 계산한다(Choi

Pumping Well	Step	Pumping rate (m ³ /day)	Duration (min)
	Q1	231	240
CU 2	Q2	258	240
011-2	Q3	330	240
	Q4	370	240
	Q1	285	120
CU 2	Q2	315	120
00-5	Q3	348	120
	Q4	370	120
	Q1	198	240
	Q2	250	240
GH-4	Q3	300	240
	Q4	373	240

Table 3. Pumping rates, durations for the step-drawdown tests.

 Table 4. Results for each step-drawdown test.

GH-2 (pumping well: depth 400 m)						
Observation Well	BH-2	GH-2	GH-3	GH-4	BH-1	
Distance	8.75 m	-	8.86 m	16.86 m	25.88 m	
	$Q_1 = 231 \text{ m}$	³ /day	$t_1 = 240 \min$	$\triangle Q = 0$		
р · ,	$Q_2 = 258 \text{ m}$	$Q_2 = 258 \text{ m}^3/\text{day}$		$Q_2-Q_1 = 27$	$Q_2-Q_1 = 27 \text{ m}^3/\text{day}$	
Pumping rate	$Q_3 = 330 \text{ m}$	³ /day	$t_3 = 240 \min$	$Q_3-Q_2 = 72 \text{ m}^3/\text{day}$		
	$Q_4 = 370 \text{ m}$	³ /day	$t_4 = 240 \min$	$Q_4-Q_3 = 40 \text{ m}^3/\text{day}$		
	GH-3 (pumping well: depth 150 m)					
Observation Well	BH-2	GH-2	GH-3	GH-4	BH-1	
Distance	17.61 m	8.86 m	-	8.00 m	17.02 m	
	$Q_1 = 285 \text{ m}^3/\text{day}$		$t_1 = 120 \min$	$\triangle Q = 0$		
р · ,	$Q_2 = 315 \text{ m}^3/\text{day}$		$t_2 = 120 \min$	$Q_2-Q_1 = 30 \text{ m}^3/\text{day}$		
Pumping rate	$Q_3 = 348 \text{ m}$	$Q_3 = 348 \text{ m}^3/\text{day}$		$Q_3-Q_2 = 33 \text{ m}^3/\text{day}$		
	$Q_4 = 370 \text{ m}^3/\text{day}$		$t_4 = 120 \min$	$Q_4-Q_3 = 22$	m ³ /day	
	GH	GH-4 (pumping well: depth 150 m)				
Observation Well	BH-2	GH-2	GH-3	GH-4	BH-1	
Distance	25.61 m	16.86 m	8.00 m	-	9.02 m	
Pumping rate	$Q_1 = 198 \text{ m}^3/\text{day}$		$t_1 = 240 \min$	$\triangle Q = 0$		
	$Q_2 = 250 \text{ m}^3/\text{day}$		$t_2 = 240 \min$	$Q_2-Q_1 = 52$	m ³ /day	
	$Q_3 = 300 \text{ m}$	$Q_3 = 300 \text{ m}^3/\text{day}$		$Q_3 - Q_2 = 50$	m ³ /day	
	$Q_4 = 373 \text{ m}^3/\text{day}$		$t_4 = 240 \min$	$Q_4-Q_3 = 73 \text{ m}^3/\text{day}$		

et al., 2010).

$$E_{W} = \left\{ \frac{B_{1}Q}{(B_{1} + B_{2})Q + CQ^{2}} \right\} \times 100(\%)$$

$$\approx \left\{ \frac{B(r_{ew}, t)Q}{B(r_{ew}, t)Q + CQ^{2}} \right\} \times 100(\%)$$
(4)

4. 결과 및 토의

4.1 단계양수시험 결과

GH-2, GH-3 및 GH-4 지열관정에서 수행한 단계 양수시험의 내역을 표 4에 정리하였다. GH-2 관정 에서는 양수량을 231, 258, 330, 370 m³/day으로 증 가시키며 각 단계별로 지속시간을 240분으로 양수 하였다. GH-3 관정에서는 양수량을 285, 315, 248, 370 m³/day으로 증가시키며 각 단계별로 지속시간 을 120분으로 양수하였다. GH-4 관정에서는 양수량 을 198, 250, 300, 373 m³/day으로 증가시키며 각 단계별로 지속시간을 240분으로 양수하였다.

각 단계양수시험 동안의 수위변화는 그림 5에 도 시하였다. GH-2~4 관정에서의 최대 수위강하량은 각각 8.57 m, 21.45 m, 6.02 m로 GH-2와 GH-4는 비교적 정상상태(steady-state)이지만, GH-3의 수 위강하량은 GH-2 보다 2.5배, GH-4 보다 3.5배 발 생했음에도 천이상태(transient-state)로 나타났다.

4.2 최적양수량 추정

최적양수량은 단계양수시험 결과 양수량 증가에 따른 수위강하량의 균형이 깨져 급격한 수위강하가 일어나는 시점으로 비수위강하량(*S_W/Q*)이 안정한 수준에서 양수가 가능한 최대 또는 적정양수량을 의 미한다(Lee, 2010; Choi *et al.*, 2010). 각 단계별 유량 에 따른 비수위강하량은 표 5와 같다.

우물효율관련 상수 B와 C를 계산하기 위해 Bierschenk (1963)의 방법을 이용하여 양수량과 비수위강하량 (S_W/Q) 의 관계를 그림 5에 도시하였다.

각 양수정의 양수량과 비수위강하량의 최적의 선 형회귀직선은 GH-2는 $S_W/Q=0.000048 \cdot Q+0.004965$, GH-3은 $S_W/Q=0.000182 \cdot Q-0.010377$ 그리고 GH-4는 $S_W/Q=0.00006 \cdot Q+0.013759$ 이다. 여기서 선형회귀직 선의 기울기와 절편은 각각 *C와 B*에 해당된다. 그림 5에서 각각의 선형회귀직선 식에 수위강하량(S_W)을 대입하면 양수량(Q)에 대한 2차방정식이 성립하여 양수량을 계산할 수 있다. 각 양수정에서 5,10 m 수 위강하 발생까지의 최적양수량은 GH-2에서 276,408 m³/day, GH-3에서 197,265 m³/day 그리고 GH-4 에서 320,581 m³/day으로 계산되었다. 그러나 계 산된 최적양수량 값들은 단계양수시에 정상상태(또 는 준정상상태)에 수위강하가 도달한다는 가정 아래



Fig. 4. Results of step-drawdown tests in GH-2, GH-3 and GH-4.



Fig. 5. Relationship between pumping rate and specific drawdown.

계산한 값들이다.

4.3 한계채수량 산정

각 양수정에 대한 양수량과 수위강하(*S_W*)를 이용 하여 한계채수량을 산정하였다(그림 6). GH-2의 한 계채수량은 315 m³/day, GH-3의 한계채수량은 340 m³/day 그리고 GH-4의 한계채수량은 4단계 유량 인 370 m³/day이상으로 산정되었다.

Lee (2010)가 언급했듯이 지하수위강하량 방법은 변곡점 발생이 가능하나 변곡점 형성이 모호하여 추 정값의 신뢰도가 낮고 임의성이 크긴 하나, 단계양수 시험 자료에서 비수위강하량 방법의 경우 변곡점의 확인이 불명확하여 지하수위강하량 방법으로 한계 채수량을 산정하였다.

5. 결 론

수막재배용 지열관정은 대부분 100 m³/day 이상 의 지하수를 이용하기 때문에 지하수영향조사(허가) 를 수행하여야 한다. 그리고 지하수법 시행령 제13 조에 따르면 양수능력을 산정할 때에는 같은 사업장 에서 2개 이상의 지하수관정이나, 관정간 거리가 50 m 이내인 지역에서 동일인이 2개 이상의 지하수관 정을 개발·이용하기 위해서는 전체 관정의 양수능 력을 합산해야한다. 현장 수막재배시설에 3개 지열 관정(GH-2~4) 모두를 사용한다면 동일사업장이고,

GH-2	$\triangle S(m)$	S _w (m)	Q (m ³ /day)	$S_w/Q (day/m^2)$
step 1	3.74	3.74	231	0.0162
step 2	0.74	4.48	258	0.0174
step 3	2.15	6.63	330	0.0201
step 4	1.94	8.57	370	0.0232
GH-3	riangle S(m)	S _w (m)	Q (m ³ /day)	S _w /Q (day/m ²)
step 1	11.99	11.99	285	0.0421
step 2	2.66	14.65	315	0.0465
step 3	3.37	18.02	348	0.0518
step 4	3.43	21.45	370	0.0580
GH-4	riangle S(m)	S _w (m)	Q (m ³ /day)	S _w /Q (day/m ²)
step 1	3.00	3.00	198	0.0152
step 2	0.76	3.76	250	0.0150
step 3	0.84	4.60	300	0.0153
step 4	1.42	6.02	373	0.0161

Table 5. Specific drawdown (S_w/Q) for each pumping step.



Fig. 6. Relationship between pumping rate and drawdown.

GH-2						
Parameters			Optimal pumping rate (Q)			
B (day/m ²)	$\frac{C}{(day^2/m^5)}$	Pumping rate (m ³ /day)	Explanation			
0 004965	0 000048	276	5 m	drawdown (quasi) steady-state		
	0.000010	408	10 m	arawaown, (quasi) steady state		
GH-3						
Parameters			Optimal pumping rate (Q)			
B (day/m ²)	$\frac{C}{(day^2/m^5)}$	Pumping rate (m ³ /day)	Explanation			
0.010277	0.000182	197	5 m	drawdown (quasi) staady stata		
-0.010377	0.000182	265	10 m	drawdown, (quasi) steady-state		
		GH-4				
Parameters			Optimal pun	nping rate (Q)		
B (day/m ²)	$\frac{C}{(day^2/m^5)}$	Pumping rate (m ³ /day)		Explanation		
0.013759	0.000006	320	5 m	drawdown (quasi) staady stata		
		581	10 m	urawuowii, (quasi) steauy-state		

Table 6. Estimate of optimal pumping rates.

2개 이상의 지하수관정이므로 3개 지열관정의 양수 능력을 합산해야한다.

본 연구에서는 복합지열시스템이 설치된 소구경-암반 지열관정에 대상으로 단계양수시험을 수행하여 수막재배시설에 이용할 최적양수량을 산정하였다. 최적양수량은 각 양수정에서 5, 10 m 수위강하 발생 까지의 최적양수량은 GH-2에서 276, 408 m³/day, GH-3에서 197, 265 m³/day 그리고 GH-4에서 320, 581 m³/day으로 계산되었다. 한계채수량은 수위강 하량 분석방법으로 GH-2에서 315 m³/day, GH-3 에서 340 m³/day 그리고 GH-4에서 370 m³/day 이상으로 산정되었다. 따라서 연구지역은 지하수의 양이 풍부한 지역으로 수막재배시설을 위한 복합지 열시스템 설치가 적합한 것으로 판단된다.

적정양수량은 한계채수량 범위내에서 지역내 지 하수 함양조건과 인근 우물의 수리간섭 등을 고려해 야 한다. 본 연구지역처럼 지열관정(양수정)이 다공 인 경우에 동시양수시험(multi-pumping test)을 수 행한다면 적정양수량 평가의 근거가 좀 더 명확해지 리라 판단된다.

감사의 글

이 성과는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로

한국에너지기술평가원(KETEP)의 연구과제(NO.2015 3030111120)와 한국환경산업기술원의 "토양·지하수 오염방지기술개발사업(2014000530001)"에서 지원을 받아 수행되었습니다. 이 성과의 일부는 2016년도 강 원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였습니 다(관리번호-520160260). 본 논문에 좋은 의견을 주 신 익명의 심사위원님들께 감사드립니다.

REFERENCES

- Bierschenk, W.H., 1963, Determining well efficiency by multiple step-drawdown tests. Publication 64, International Association of Scientific Hydrology, 493-507.
- Choi, H.M., Lee, J.Y., Cheon, J.Y., Jun, S.C. and Kown, H.P., 2010, Estimation of optimal pumping rate, well efficiency and radius of influence using step-drawdown test. Journal of Engineering Geology, 20(2), 127-136 (in Korean with English abstract).
- Dawson, K.J. and Istok, J.D., 1991, Aquifer testing: design and analysis of pumping and slug tests. Lewis Publishers, 344 p.
- Hahn, J.S., 1998, Groundwater environment and pollution. Pakyoungsa, Seoul, 1071 p (in Korean).
- Jacob, C.E., 1947, Drawdown test to determine effective radius of artesian well. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 112, 1047-1070.

- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2017, http://www.kigam.re.kr (August 8, 2017).
- Kruseman, G.P. and de Ridder, N.A., 1991, Analysis and evaluation of pumping test data. International Institute of Land Reclamation and Improvement, 377 p.
- Kwon, K.S., Lee, J.Y. and Mok, J.K., 2012, Update of current status on ground source heat pumps in Korea. Journal of Geology, 48(2), 193-199 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y., 2010, Problems in determining optimal discharge using step-drawdown test. Journal of the Geological Society of Korea, 46(5), 485-495 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y., Song, S.H. and Lee, K.K, 2005, Effects of selected time on analysis in step-drawdown test. Journal of Soil and Groundwater Environment, 10(2), 59-65 (in Korean with English abstract).
- Mok, J.K., Park. Y.C., Park. Y.Y., Kim, S.K., Oh, J.S. and Seon. E.M., 2017, Characterization of area installing combined geothermal systems: Hydrogeological properties of aquifer. Journal of Engineering Geology, 27(3), 293-304 (in Korean with English abstract).
- Park, B.S. and Yeo, S.C., 1971, Explanatory text of the geological map of Moggye sheet. Geological Survey of Korea, 40 p (in Korean).
- Park, Y., Song, J.Y., Lee, G.C, Kim, K.J., Mok, J.K. and

Park, Y.C., 2017, Performance analysis of ground heat exchanger in combined well and open-closed loops geothermal (CWG) system. Journal of Soil and Groundwater Environment, 22(5), 23-29 (in Korean with English abstract).

- Ramey, H.J., 1982, Well-loss function and the skin effect: A review. Recent Trends in Hydrogeology, Geological Society of America, Special Paper 189, 265-271.
- Rorabaugh, M.I., 1953, Graphical and theoretical analysis of step-drawdown test of artesian well. Proceedings of American Society of Civil Engineers, 79, 23 p.
- Skinner, A.C., 1988, Practical experience of borehole performance evaluation. Journal of Institute of Water and Environment Management, 2, 332-340.
- Song, J.Y., Lee, G.C. and Park, N., 2018, Experimental study on heat exchange efficiency of combined well & open-closed loops geothermal systems. Journal of the Architectural Institude of Korea Structure & Construction, 34(5), 43-50 (in Korean with English abstract).
- Song, Y. and Lee, T.J., 2015, Geothermal development in the Republic of Korea: Country update 2010-2014. Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne.

Received	:	July	23,	2018
Revised	:	August	13,	2018
Accepted	:	August	13,	2018