

복수정을 이용한 개방형 지열 시스템의 초기투자비 회수기간 분석

Analysis of the Initial Cost Payback Period on the Open-loop Geothermal System Using Two Wells

조정흙(Jeong-Heum Cho)¹, 남유진(Yujin Nam)^{2*}

¹(주)이에이엔테크놀로지 신규 및 해외사업 개발 본부, ²부산대학교 건축공학과

¹Department of New & Intl Business Division, EAN Technology, Seoul, 06178, Republic of Korea

²Department of Architectural Engineering, Pusan National University, Pusan, 46241, Republic of Korea

(Received July 6, 2016; revision received January 2, 2017; Accepted: January 5, 2017)

Abstract Recently, ground source heat pump systems are being used in buildings for cooling and heating to reduce greenhouse gas and save energy. However, ground source heat pump systems mainly use the vertical closed-loop geothermal system design rather than the open-loop geothermal system design. This is due to a lack of knowledge and few research feasibility studies. In this research, a dynamic thermal analysis numerical simulation based on a standard house model was conducted for an open-loop geothermal system. Based on heating load analysis results, the life cycle costs of a standard house using an open two-well geothermal system were analyzed and compared with a vertical closed-loop geothermal system, and a diesel boiler. As a result, it was found that using an open two-well geothermal system shows economic return on investment after three years.

Key words Two-well(복수정), Ground source heat pump(지열 히트펌프), Life cycle cost(생애주기비용)

* Corresponding author, E-mail: namyujin@pusan.ac.kr

기호설명

- P_F : 비반복비용
- P_A : 반복비용
- P : 현재가치분석비용
- A : 매년 동일하게 발생하는 비용
- F : n 년 후에 발생하는 비용
- i : 실질할인율
- j : 명목할인율
- k : 물가변동률

1. 서 론

최근, 국제사회는 2020년 교토의정서 만료 이후 적용될 신기후 체제를 2015년 프랑스 파리에서 채택하였다. 국내의 경우, 신기후 체제에서 2030년까지 BAU(Business As Usual) 대비 37%까지 온실가스 감축을 목표로 제시하였으며, 온실가스를 감축하기 위하여 기존의 화석연료 이용기술을 대체하기 위한 신재생에너지 이용기술이 주목받고 있다. 특히, 지중의 향온성을 이용하여

건축물의 냉·난방부하 및 급탕부하에 효과적으로 대응할 수 있는 지열 히트펌프 시스템이 친환경, 고효율 에너지 이용기술로 큰 주목을 받고 있다. 현재 국내의 경우 지열 히트펌프 시스템은 주로 지중열과 간접 열 교환하는 수직밀폐형 시스템을 중심으로 기술개발 및 보급이 활발히 이루어지고 있으나, 지하수를 열원으로 직접 이용하는 개방형 시스템의 기술연구 및 보급은 밀폐형 시스템에 비해 미미하다.

국내에서는 Lee et al.⁽¹⁾이 하천수 이용 열원 시스템의 건물 냉난방 적용을 위한 경제성 분석을 실시하였으며, Yang et al.⁽²⁾은 SCW(Standing Column Well) 시스템과 가스히트펌프시스템의 경제성 비교를 통해 대학 기숙사의 도입 타당성을 분석하였다. 국외에서는 Russo et al.⁽³⁻⁵⁾이 개방형 시스템의 수치해석을 통한 열영향도 분석 및 경제성 분석을 실시하였다. Nam et al.⁽⁶⁾은 개방형 지열 시스템의 실증 데이터와 지하수 및 지중열 이동 동시해석 시뮬레이션의 수치해석 결과 값을 비교하여 해석모델의 타당성을 검증하였다. 이외에도 개방형 지열 시스템에 관하여 다양한 연구결과들이 있으나, 건

축물의 부하분석을 토대로 개방형 지열 시스템의 전생애주기비용을 고려하여 타 시스템과의 경제성을 비교한 연구는 미미한 실정이다. 이에 본 연구에서는 농촌 표준주택을 대상으로 복수정 이용 개방형 지열 시스템의 도입 타당성을 분석하였다. 기존 결과를 바탕으로 개방형 지열 시스템의 생애주기비용(LCC, Life Cycle Cost)을 계산하였으며, 타 열원설비 시스템과 ROI(Return on Investment) 분석을 실시하였다.

2. 난방부하 분석

2.1 시뮬레이션 개요

열원시스템의 초기투자비용 및 연간운전비용을 산정하기 위해, TRNSYS17을 이용하여 농촌표준 주택모델(국토교통부, 농림-14-27-나)의 피크부하 및 연간총난방부하를 분석하였다. Fig. 1 및 Table 1은 농촌표준 주택모델의 3D 모델링 및 시뮬레이션 조건을 각각 나타낸다. 외기데이터는 TRNSYS17 내 Meteonorm의 서울기후데이터를 이용하였으며, 단열조건은 중부지방 기준 단열조건을 충족하는 모델링을 실시하였다. 난방운전을 위한 공조면적은 57.59 m²로 난방 기간은 1월부터 12월

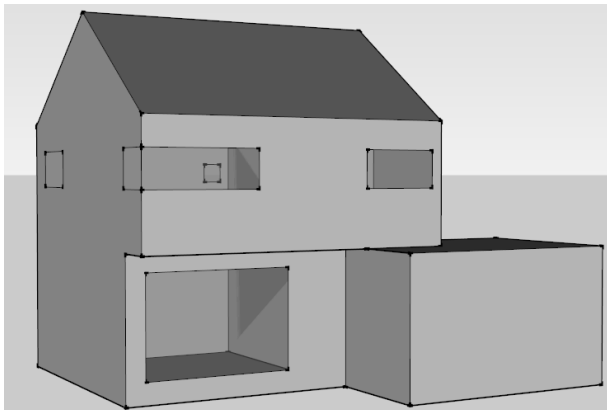


Fig. 1 Standard house model.

Table 1 Simulation condition

Model	Standard house model	
Air-conditioning area	1F : 22.50 m ² /2F : 35.09 m ²	
Weather data	Seoul	
Heating season	From Jan. to Dec.(365 day)	
Operating schedule	20 : 00~07 : 00(11 hr)	
Set temperature	22°C	
U-value	Roof	0.180 W/m ² K
	Well	0.270 W/m ² K
	Bottom	0.410 W/m ² K

까지 실시하였다. 난방 설정온도 및 운전시간은 주택 재실자의 활동 시간을 고려하여 22°C 및 20 : 00~07 : 00(11 hr)로 각각 설정하였다.

2.2 시뮬레이션 해석 결과

Fig. 2는 시뮬레이션 해석결과 산출된 연간 난방부하를 나타낸다. 난방 피크부하는 9.76 kW, 총 연간난방부하는 6,412.03 kWh로 나타났다. 선행연구 결과^(7,8)를 토대로, 표준 주택모델 1채의 난방 피크부하를 적용할 경우, 난방부하를 담당할 수 있는 표준 주택모델의 동수 및 총 피크부하를 Table 2에 정리하였다.

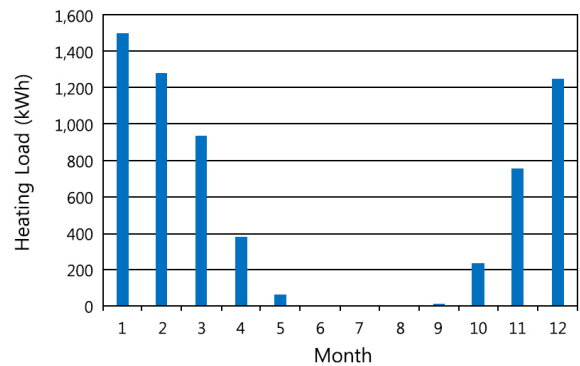


Fig. 2 Annual heating load of standard house.

Table 2 Analysis condition of each case study

Case	Well distance (m)	Flow rate (m ³ /day)	Heat exchange rate (kW)	Number of buildings (-)	Peak load (kW)	Annual heating load (kWh)
1	10	200	44.56	4	39.04	25,648.12
2		400	74.25	7	68.32	44,884.21
3		600	96.55	9	87.84	57,708.27
4		800	115.05	11	107.36	70,532.33
5	20	200	47.85	4	39.04	25,648.12
6		400	95.58	9	87.84	57,708.27
7		600	131.28	13	126.88	83,356.39
8		800	157.16	16	156.16	102,592.48
9	30	200	47.98	4	39.04	25,648.12
10		400	96.24	9	87.84	57,708.27
11		600	144.25	14	136.64	89,768.42
12		800	183.20	18	175.68	115,416.54
13	40	200	48.07	4	39.04	25,648.12
14		400	96.41	9	87.84	57,708.27
15		600	144.53	14	136.64	89,768.42
16		800	192.35	19	185.44	121,828.57

3. 경제성 분석

3.1 초기투자비용 산출

Table 2의 Case별 피크부하를 토대로 초기투자비용을 산출하였다. 지열 히트펌프 시스템의 경우, 현재 정부에서 신재생에너지 지원 사업을 실시하고 있으나, 지자체별 지원 금액 및 대상이 상이하기에 본 연구에서는 신재생에너지 지원 보조금을 고려하지 않았다.

복수정 이용 개방형 시스템의 초기투자비용은 G사

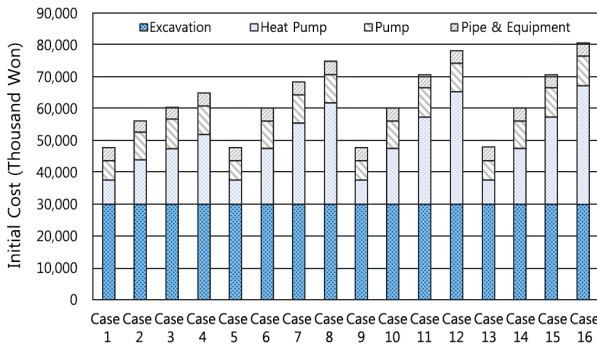


Fig. 3 Initial cost of Two-well geothermal system.

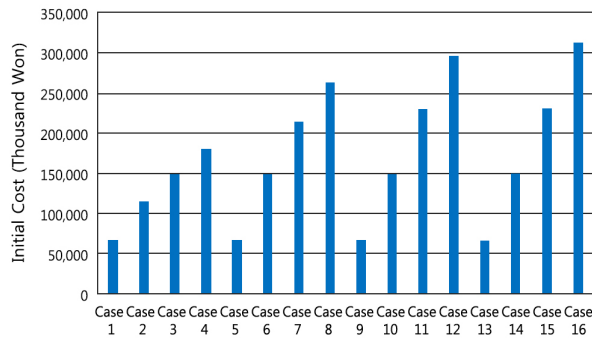


Fig. 4 Initial cost of vertical geothermal system.

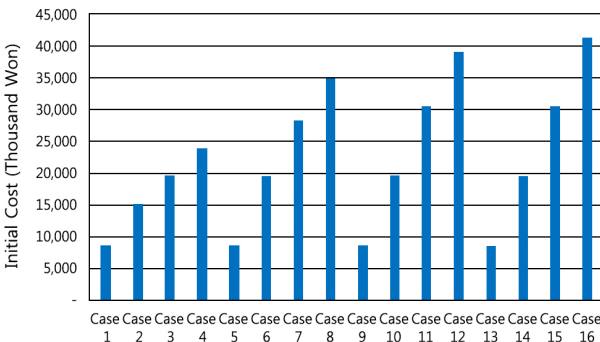


Fig. 5 Initial cost of diesel boiler.

의 견적서를 토대로 Fig. 3과 같이 산출하였다. 관정의 천공 비용은 화강암 지반에서 0.2 m 관경의 관정을 100 m 굴착할 경우, 관정 당 1,500만 원의 비용이 필요하였으며, 관정간의 이격거리가 10 m 멀어질수록 배관비용에 3%씩 가산하여 초기투자비용을 산정하였다. 복수정 시스템의 초기투자비용은 관정간 이격거리 10 m에서 가장 작게 나타났으며, 관정간의 이격거리가 멀어질수록 초기투자비용은 높아져 Case 16에서 80,280천 원으로 가장 높게 나타났다.

수직밀폐형 시스템의 초기투자비용은 신재생에너지 센터에서 공고한 신재생에너지 원별 기준단가(1,690 천원/kW)를 참고하여 Fig. 4와 같이 산출하였다. 경유 보일러의 경우 K사의 기름보일러 표준사양(난방능력 14.4 kW, 난방효율 89%)을 참고하였으며, 주택모델 1채에 보일러 1대를 설치하는 것으로 가정하였다. 보일러의 설치비용 및 기타 설비비용⁹⁾을 고려하여 Fig. 5와 같이 초기투자비용을 산출하였다.

초기투자비용 산출 결과, 경유보일러에 비해 복수정 이용 개방형 시스템은 최대 5.5배, 수직밀폐형 시스템은 최대 7.5배 크게 나타났다.

3.2 연간운전비용 산출

연간운전비용을 산출하기 위해서는 표준주택 모델의 총 연간난방부하에 시스템별 COP(Coefficient of Performance) 및 보일러 효율을 고려하여야 한다. 복수정 이용 개방형 시스템의 COP는 지하수 및 지중열 이동 동시해석 수치 시뮬레이션을 이용한 지중채열 성능 및 시스템 성능해석을 토대로 산출된 S.COP¹⁰⁾(System Coefficient of Performance)를 고려하여 연간운전비용을 산출하였다. 수직밀폐형 시스템의 난방 COP는 물-물 히트펌프의 KS 기준인 3.62¹¹⁾로 설정하여 연간 운전비용을 산출하였다. 복수정 이용 개방형 시스템 및 수직밀폐형 시스템의 COP를 고려한 연간난방부하 및 연간운전비용은 Table 3과 같이 산출되었다. 지열 히트펌프 시스템의 연간운전비용 산출 결과, 복수정 이용 개방형 시스템의 경우 관정간의 이격거리가 멀어질수록, 양수량이 많을수록 수직밀폐형 시스템에 비해 연간운전비용이 절감되는 것으로 나타났다. Table 4는 경유보일러의 운전비용을 산출하기 위한 경유의 열량과 가격을 나타낸다. Table 5는 연간난방부하(6,412.03 kWh)에 보일러 효율을 적용하여 경유보일러의 연간유류소비량 및 연간 운전비용을 나타낸다. 농촌표준 주택모델에 경유보일러를 이용할 경우, Case 16에서 복수정 이용 개방형 시스템에 비해 약 1,097만 원, 수직밀폐형 시스템에 비해 약 1,074만 원이 과다한 것으로 나타났다.

Table 3 Annual operation cost of geothermal system

Case	Two-well		Vertical	
	Annual heating load (kWh)	Operation cost (Won)	Annual heating load (kWh)	Operation cost (Won)
1	7,418.94	871,154	7,085.12	821,243
2	13,252.62	1,548,398	12,398.95	1,437,176
3	17,318.91	2,025,839	15,941.51	1,847,798
4	21,841.99	2,548,466	19,484.07	2,258,419
5	6,961.33	823,706	7,085.12	821,243
6	15,475.44	1,808,341	15,941.51	1,847,798
7	22,690.57	2,638,457	23,026.63	2,669,041
8	28,871.26	3,348,493	28,340.46	3,284,973
9	6,833.66	808,798	7,085.12	821,243
10	15,049.73	1,759,824	15,941.51	1,847,798
11	23,342.49	2,719,554	24,797.91	2,874,352
12	30,752.48	3,578,601	31,883.02	3,695,595
13	6,778.45	802,497	7,085.12	821,243
14	14,850.74	1,736,850	15,941.51	1,847,798
15	22,952.58	2,674,594	24,797.91	2,874,352
16	31,614.46	3,677,024	33,654.30	3,900,906

Table 4 Condition of diesel boiler operation cost

Diesel price	1120.18 Won/L
Boiler efficiency	89.00%
Rated output by using boiler	33.55 MJ/L

Table 5 Annual operation cost of diesel boiler system

Case	Annual heating load (MJ)	Annual Fuel consumption (L)	Operation cost (Won)
1	92,333.23	2,752	3,082,581
2	161,583.16	4,816	5,394,517
3	207,749.77	6,192	6,935,807
4	253,916.39	7,568	8,477,098
5	92,333.23	2,752	3,082,581
6	207,749.77	6,192	6,935,807
7	300,083.00	8,944	10,018,388
8	369,332.93	11,007	12,330,324
9	92,333.23	2,752	3,082,581
10	207,749.77	6,192	6,935,807
11	323,166.31	9,632	10,789,033
12	415,499.54	12,383	13,871,614
13	92,333.23	2,752	3,082,581
14	207,749.77	6,192	6,935,807
15	323,166.31	9,632	10,789,033
16	438,582.85	13,071	14,642,260

4. 도입 타당성 분석

4.1 분석 개요

본 연구는 표준 주택모델에 근거한 부하계산 결과를 토대로 시스템별 경제성 분석을 실시하고, 복수정 이용 개방형 시스템의 도입 타당성을 도출하고자 하였다. 도입 타당성을 분석하기 위하여 각 시스템별 초기 투자비용 및 운전비용 등의 전생애주기비용을 비교분석하였다. 도입 대상 건축물의 생애주기에 발생하는 모든 비용을 분석하기 위하여 미래에 발생하는 비용을 일정한 시점을 기준으로 환산하는 현재가치법을 고려하여 ROI 분석을 실시하였다. 실질할인율은 한국은행 10년(2006~2015)동안의 명목할인율 3.70%와 물가변동률 2.25%를 적용하여 1.4%로 산출되었다. 적용된 현재가치법은 다음 계산식과 같다.

$$P_F = \frac{F}{(1+i)^n} \quad (1)$$

$$P_A = \frac{A[(1+i)^n - 1]}{i(1+i)^n} \quad (2)$$

$$P = P_F + P_A \quad (3)$$

$$i = \frac{(1+j)}{(1+k)} - 1 \quad (4)$$

4.2 분석 결과

Fig. 6~Fig. 9는 표준주택 모델에 각 시스템을 적용하였을 경우 ROI 비교분석 결과를 나타낸 것이다. ROI 비교분석은 15년 동안 초기투자비용 회수기간이 짧을수록 경제성이 있는 것으로 분석하였다.

ROI 분석결과, 표준모델의 설계용량이 가장 작은 Case 1, 5, 9, 13의 경우, 전생애주기비용을 고려하였지만, 지열 히트펌프 시스템의 초기투자비용이 경유보일러에 비해 과다하게 산출되어 경제성이 없는 것으로 나타났다. 그러나 표준모델의 설계용량이 대형화될수록 경유보일러 대비 복수정 이용 개방형 시스템의 초기투자비용 회수기간이 빠르게 나타났으며, Case 16에서 최대 3년차에 초기투자비용을 회수 할 수 있는 것으로 나타났다.

Fig. 10은 복수정 이용 개방형 시스템과 경유보일러의 ROI 분석결과를 도식화하여 나타내었다. 분석 결과, 복수정 이용 개방형 시스템을 농촌주택 표준모델에 적용할 경우, 관정간의 이격거리가 멀어질수록, 양수량이 많아질수록 복수정 이용 개방형 지열 시스템의 초기투자비용 회수가 빠르게 나타나는 것을 확인하였다.

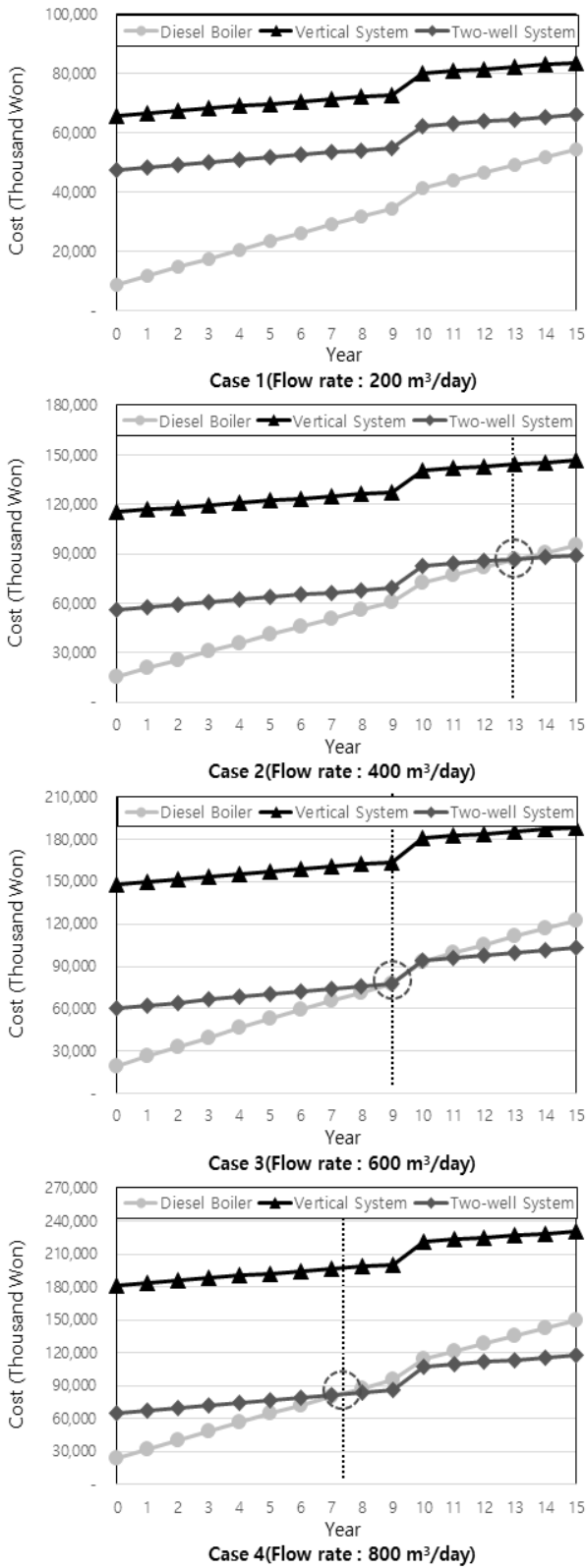


Fig. 6 ROI analysis of well distance 10 m.

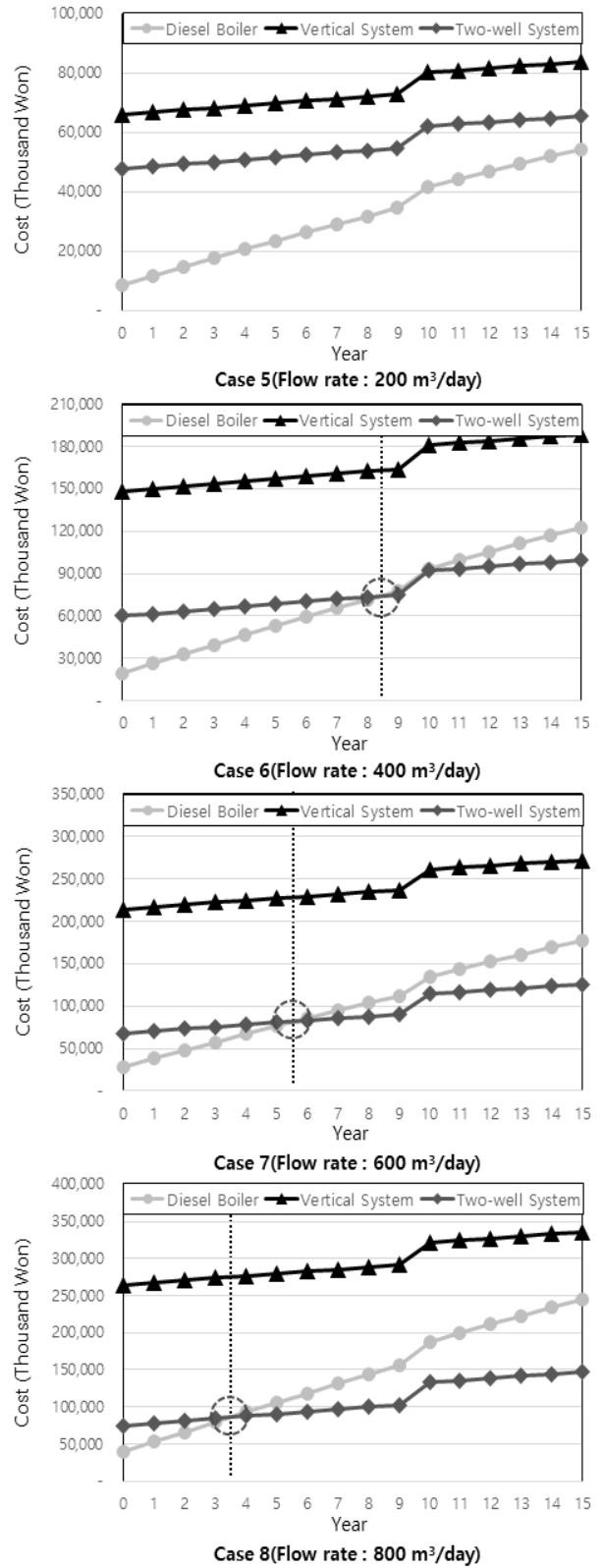


Fig. 7 ROI analysis of well distance 20 m.

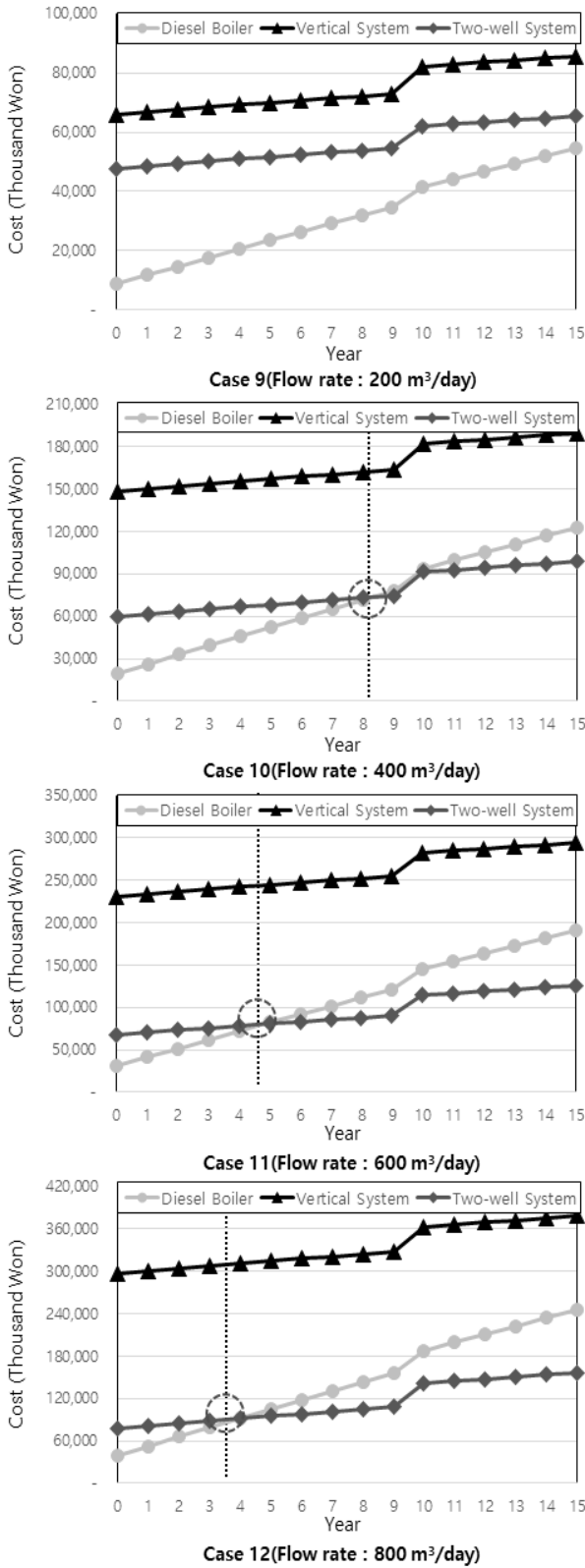


Fig. 8 ROI analysis of well distance 30 m.

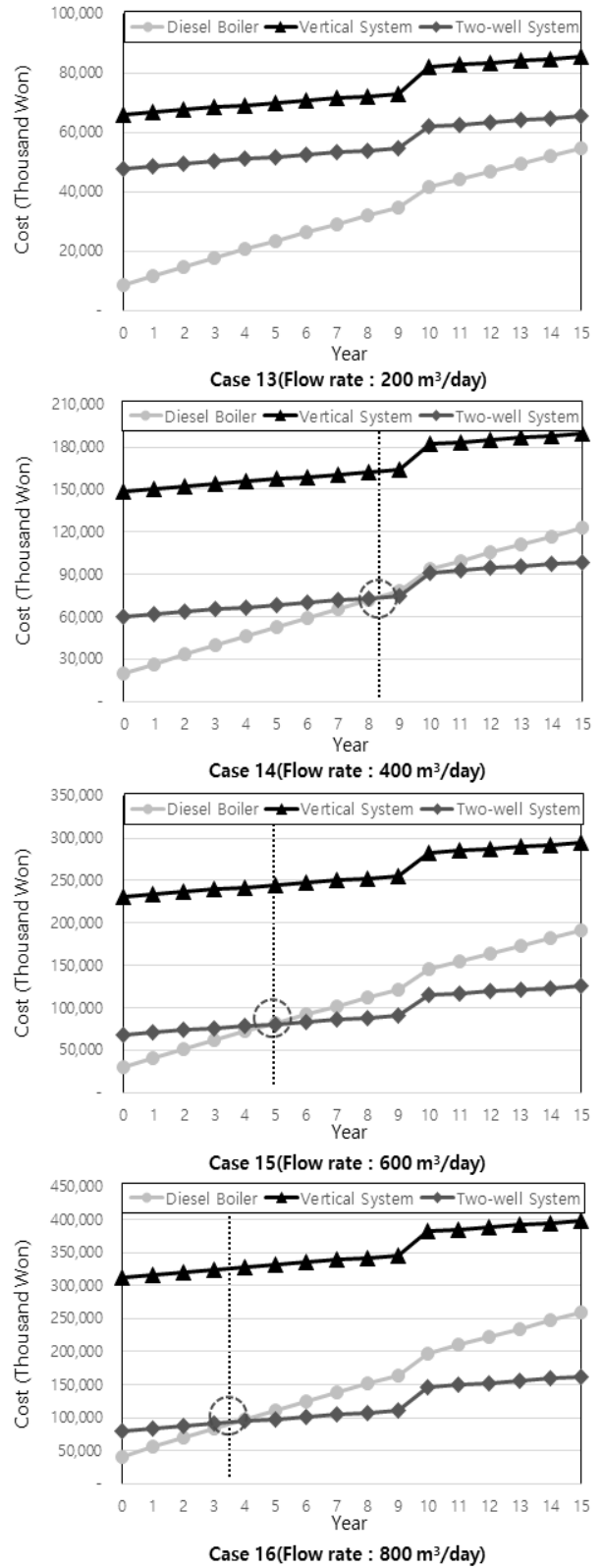


Fig. 9 ROI analysis of well distance 40 m.

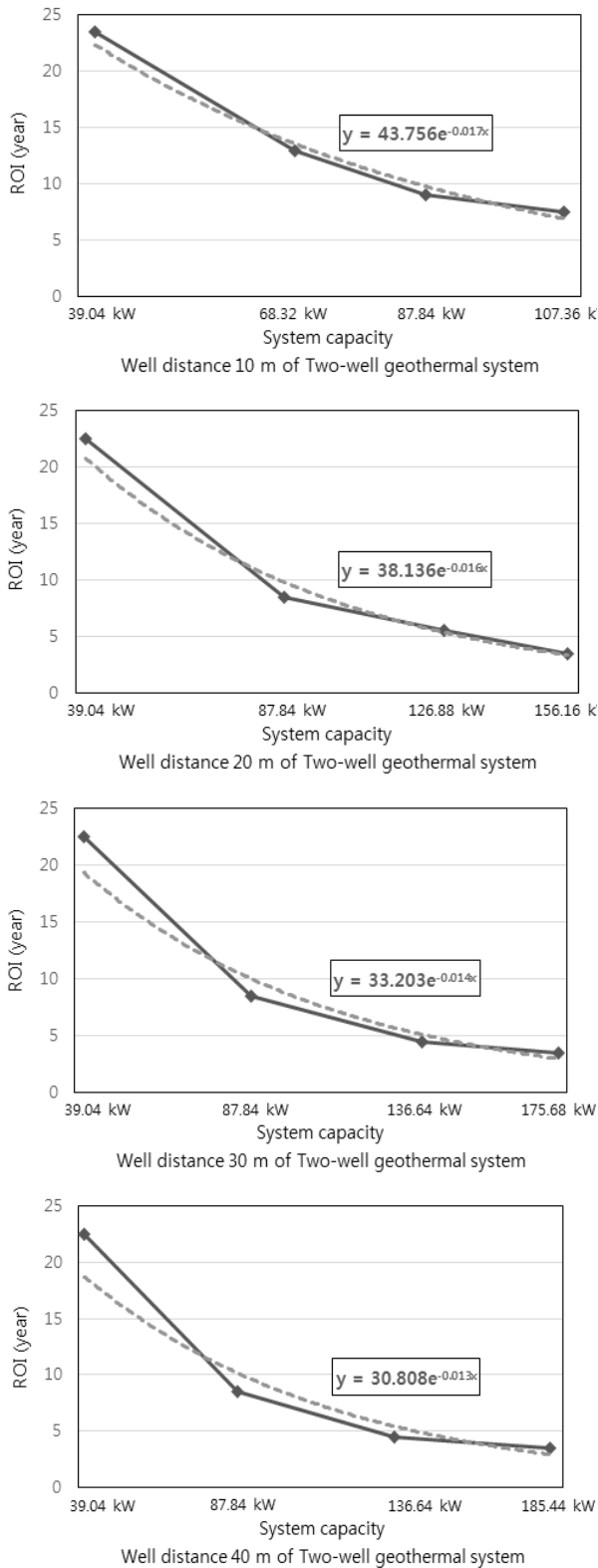


Fig. 10 ROI of the Two-well geothermal system compared with Diesel boiler.

5. 결 론

본 연구는 복수정을 이용한 개방형 시스템의 도입 타당성을 분석하기 위하여, 동적 열해석 시뮬레이션을 이용하여 농촌표준 주택모델의 부하분석을 실시하였으며, 부하 해석결과 및 선행연구에서 수행한 수치해석 결과를 토대로 복수정 이용 개방형 시스템과 타 열원 이용 시스템의 경제성을 비교분석하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 서울 기후조건에서 농촌표준 주택모델의 난방 피크 부하는 9.76 kW, 총 연간난방부하는 6412.03 kWh로 나타났다.
- (2) Case별 ROI 분석결과, 시스템 용량이 68 kW 이상 (Case 2)에서 복수정 이용 지열 시스템은 경유보일러 대비 13년차에 초기투자비용을 회수하였으며, 시스템 설계용량이 대형화될수록 복수정 이용 지열 시스템의 초기투자비회수가 빠르게 나타나 최대 3년차에 초기투자비용을 회수할 수 있는 것으로 나타났다.
- (3) 본 연구에서는 지열 시스템 설치 시 지원하는 정부 및 지자체의 지원금을 고려하지 않았으므로, 지원금을 고려하면 초기투자비 회수기간은 더 빠르게 나타날 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 조정흡의 2016년도 석사학위 논문의 선행 연구를 바탕으로 작성된 논문입니다. 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 연구과제(No. 20123040110010)와 2016년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(2015R1D1A3A01020132)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

References

1. Lee, C. G., Kim, J. D., Im, T. S., Choi, M. S., Pang, S. K., and Ham, H. D., 2013, Economic evaluation on energy system using river water, Transactions of the Korea society of geothermal energy engineers, Vol. 9, No. 2, pp. 25-31.
2. Yang, S. J., Kim, J. M., Kim, J. Y., Hong, W. H., and Ahn, C. H., 2008, A study on economic evaluation of geothermal heat pump system in dormitory of college, Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, Vol. 2, No. 4, pp. 14-19.
3. Russo, S. L. and Civita, M. V., 2009, Open-loop ground-

- water heat pumps development for large buildings : A case study, *Geothermics*, Vol. 38, No. 3, pp. 335-345.
4. Russo, S. L., Taddia, G., Baccino, G., and Verda, V., 2011, Different design scenarios related to an open loop groundwater heat pump in a large building : Impact on subsurface and primary energy consumption, *Energy and Buildings*, Vol. 43, No. 2-3, pp. 347-357.
 5. Russo, S. L., Taddia, G., and Verda, V., 2012, Development of the thermally affected zone (TAZ) around a groundwater heat pump (GWHP) system : A sensitivity analysis, *Geothermics*, Vol. 43, pp. 66-74.
 6. Nam, Y. J. and Ooka, R., 2010, Numerical simulation of ground heat and water transfer for groundwater heat pump system based on real-scale experiment, *Energy and Buildings*, Vol. 42, No. 1, pp. 69-75.
 7. Cho, J. H. and Nam, Y. J., 2015, A study on the characteristics of heat source temperature for two-well geothermal system using numerical simulation, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 27, No. 4, pp. 207-212.
 8. Cho, J. H. and Nam, Y. J., 2015, The effect of soil permeability and pumping rate on performance of two-well geothermal heat pump system, *Transactions of the Korea society of geothermal energy engineers*, Vol. 11, No. 4, pp. 28-34.
 9. Kim, M. Y., Kim, Y. I., and Chung, K. S., 2015, Economic comparison of medium capacity and multi boiler system applied to military officer housing, *Journal of Energy Engineering*, Vol. 24, No. 4, pp. 81-88.
 10. Cho, J. H., 2016, Study on the optimum design method of open-loop geothermal system using numerical simulation, Master's thesis, Pusan national university.
 11. KS B 8292, 2015, Water-to-water ground source heat pump unit, Korean Standards & Certifications.